

# 白银地区矿震波形特征及其震源机制求解

刘玉玲\*, 尹欣欣#, 苟苗苗, 王维欢

甘肃省地震局, 甘肃 兰州

收稿日期: 2026年3月31日; 录用日期: 2026年5月1日; 发布日期: 2026年5月13日

## 摘要

甘肃省白银市地震活动性存在明显的空间分异特征: 白银区因矿产资源集中开采而矿震活动显著, 平川区则因远离矿区、构造独立而以天然构造地震为主。为准确识别矿震的典型特征, 本文基于区域地震台网数据, 采用空间对比分析与波形反演方法, 系统对比了震级相近条件下白银区矿震与平川区天然地震的波形差异, 并反演了白银区矿震的震源机制解。同时, 结合自主研发的多种分析程序(包括空间分布可视化、波形时频分析、震级-时序分析与 $b$ 值计算等), 实现了从空间分布、时间序列到波形频谱的多维度定量对比。结果表明, 与天然地震相比, 矿震在时域上呈现持续时间短、衰减快的特点, 在频域上则表现为优势频率高、频带较宽的特征。震源机制解显示, 白银区矿震破裂机制复杂, 以走滑型、正断层型及伴随显著非双力偶(体积收缩)分量的塌陷型为主, 其空间分布与采空区及开采活动密切相关。 $b$ 值分析表明, 矿震的 $b$ 值(平均1.2)显著低于天然地震(平均1.8), 反映矿震活动具有大震级事件相对偏多的特征。上述多维度特征构成了矿震识别的可靠证据链, 对矿山灾害防控具有重要应用价值。

## 关键词

白银地区, 矿震, 天然地震, 震源机制解, 波形特征,  $b$ 值

# Seismic Waveform Characteristics and Focal Mechanism Solutions of Mining-Induced Earthquakes in the Baiyin Area

Yuling Liu\*, Xinxin Yin#, Miaomiao Gou, Weihuan Wang

Gansu Earthquake Agency, Lanzhou Gansu

Received: March 31, 2026; accepted: May 1, 2026; published: May 13, 2026

## Abstract

The seismic activity in Baiyin City, Gansu Province, exhibits significant spatial differentiation: the

\*第一作者。

#通讯作者。

文章引用: 刘玉玲, 尹欣欣, 苟苗苗, 王维欢. 白银地区矿震波形特征及其震源机制求解[J]. 矿山工程, 2026, 14(3): 540-550. DOI: 10.12677/me.2026.143055

Baiyin District, characterized by concentrated mineral resource extraction, shows pronounced mining-induced earthquake activity, whereas the Pingchuan District, located far from mining areas with an independent tectonic setting, is dominated by natural tectonic earthquakes. To accurately identify the typical characteristics of mining-induced earthquakes, this study utilizes data from the regional seismic network. Employing spatial comparative analysis and waveform inversion methods, it systematically compares the waveform differences between mining-induced earthquakes in the Baiyin District and natural earthquakes in the Pingchuan District under similar magnitudes, and inverts the focal mechanism solutions of mining-induced earthquakes in the Baiyin District. Furthermore, combined with self-developed analytical programs (including spatial distribution visualization, waveform time-frequency analysis, magnitude-time series analysis, and  $b$ -value calculation), a multi-dimensional quantitative comparison is achieved across spatial distribution, temporal sequence, and waveform spectrum. The results indicate that compared to natural earthquakes, mining-induced earthquakes exhibit shorter duration and faster attenuation in the time domain, and are characterized by higher dominant frequencies and a wider frequency band in the frequency domain. Focal mechanism solutions reveal that the rupture mechanisms of mining-induced earthquakes in the Baiyin District are complex, primarily dominated by strike-slip, normal faulting, and collapse types accompanied by significant non-double-couple (volume contraction) components. Their spatial distribution is closely related to goaf areas and mining activities.  $b$ -value analysis shows that the  $b$ -value for mining-induced earthquakes (average 1.2) is significantly lower than that for natural earthquakes (average 1.8), reflecting a characteristic of relatively more large-magnitude events in mining-induced seismic activity. The multi-dimensional characteristics mentioned above constitute a reliable chain of evidence for identifying mining-induced earthquakes and hold significant application value for mine disaster prevention and control.

## Keywords

Baiyin Area, Mining-Induced Earthquake, Natural Earthquake, Focal Mechanism Solution, Waveform Characteristics,  $b$ -Value

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

矿震是矿山开采活动诱发的主要地质灾害之一,对矿山安全生产构成严重影响。矿震波形通常具有高频、短时特征,震源机制常含有非双力偶分量,与天然构造地震存在本质差异。然而,现有研究多基于单一矿区或混合事件的统计分析,缺乏在空间分区清晰条件下的直接精细对比[1][2]。

国内外学者已在矿震识别与震源机制研究方面取得了重要进展。在波形识别方面,鹤岗地区的研究表明[3],天然地震、爆破和矿震在波形上具有相似性,但各自具有独特的震相特征,通过频谱和小波变换分析可进一步识别三类事件。这些研究主要聚焦于单一矿区的多类型事件区分,但未能充分利用空间分区的天然对比条件来剥离传播路径的影响。

在震源机制研究方面,非双力偶分量的存在是矿震区别于天然构造地震的关键特征之一。Miller等系统总结了全球非双力偶地震的观测结果[4],指出矿山浅震常常含有各向同性分量,显示出体积收缩的极性变化,这种机制与包含剪切和张性断裂的复杂破裂过程一致。

综上所述,现有研究在矿震波形识别、震源机制反演和统计特征分析方面已取得丰富成果,但仍存在以下不足:1)多数研究基于单一矿区数据,缺少与天然地震的直接空间对比,难以完全剥离传播路径

和台站场地效应的影响; 2) 波形识别、机制反演和统计特征研究相对独立, 缺少多维度证据的交叉验证; 3) 针对中国西部矿区, 特别是祁连山构造带附近的矿震研究相对薄弱。

甘肃省白银市为此提供了理想的研究场景: 其下辖的白银区(矿区)与平川区(非矿区)地理上互不接壤, 地震成因截然不同——前者以矿震为主导, 后者主要受区域构造控制。两区地壳结构相近, 便于在相似传播路径条件下突出震源过程差异, 为矿震特征提取提供了天然对比窗口。

为此, 本文旨在: 1) 系统对比两区地震的波形时频特征, 量化矿震识别标志; 2) 反演白银区矿震的震源机制解, 分析其破裂类型与空间分布特征; 3) 结合自主开发的分析工具, 从空间分布、时序特征、频域属性及  $b$  值统计等多个维度综合探讨矿震与天然地震的差异; 4) 综合探讨波形特征与震源机制之间的物理联系及其孕震机理。研究成果有望为该地区矿震的精准识别与灾害防控提供科学依据。

## 2. 研究区概况、数据与方法

### 2.1. 研究区地质背景与数据来源

白银区地处北祁连造山带, 矿产资源丰富, 长期高强度开采活动使其地震主要受采矿应力扰动控制; 平川区位于海原断裂带附近, 无大规模采矿活动, 地震主要源于区域构造应力释放。两区成因机制清晰, 构成理想的天然对比组。

本研究采用甘肃省地震台网 2018~2025 年记录, 筛选白银区矿震和平川区天然地震震级范围为  $ML$  1.5~3.5、信噪比( $SNR$ )  $\geq 3$  的事件, 所有事件均具备至少 4 个台站的清晰震相记录。

### 2.2. 分析方法与图示对应

为清晰展示两地地震活动的空间分异特征, 采用基于 Matplotlib 与 PyGMT 自主开发的绘图脚本, 集成矿区边界、主要断层及筛选后的地震事件, 生成空间分布对比图(图 1)。该图直观反映白银区地震事件从集于采区附近, 平川区事件则沿构造带分布。

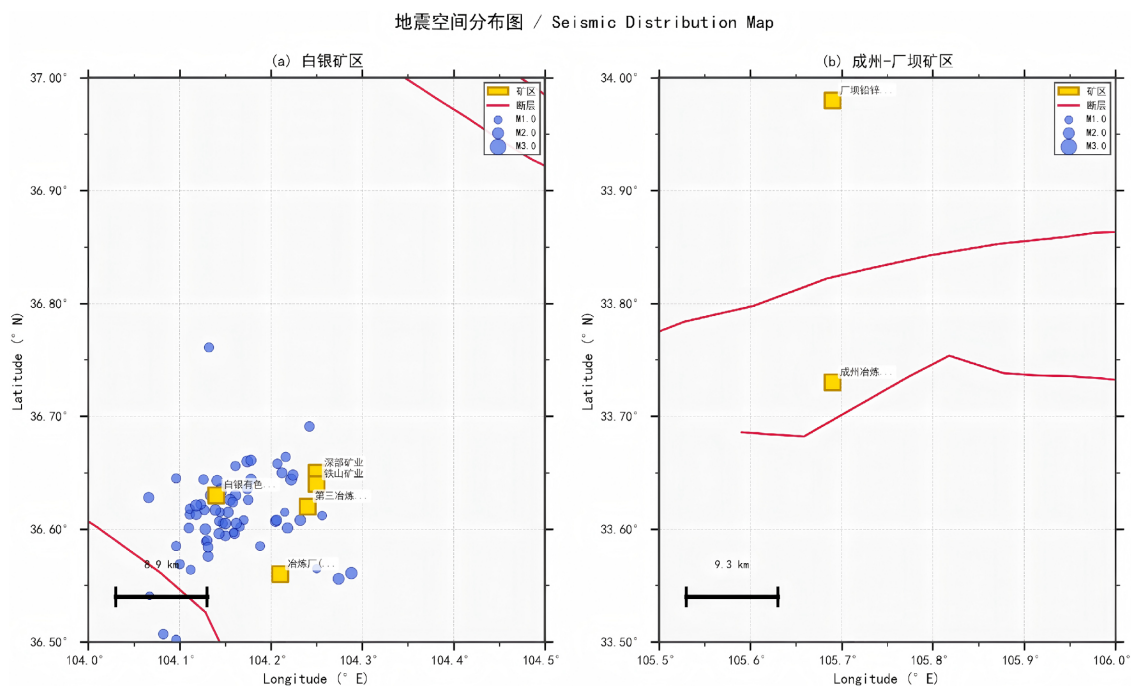


Figure 1. Spatial distribution of earthquakes in Baiyin District and Pingchuan District

图 1. 白银区与平川地区地震空间分布图

为系统提取波形识别标志, 开展以下分析:

**时域分析:** 从原始波形中提取信号持续时间、 $P/S$  波振幅比等参数;

**频域分析:** 通过短时傅里叶变换( $STFT$ )获取时频谱, 分析优势频率与频带特征。研究表明, 矿山地区地震事件的时频特征与天然地震存在显著差异, 高频成分的衰减速率可作为重要的识别标志[5][6]。图 2 展示典型矿震与天然地震的波形对比, 以及其对应的时频谱结果, 揭示矿震“高频、短时、衰减快”的典型特征。

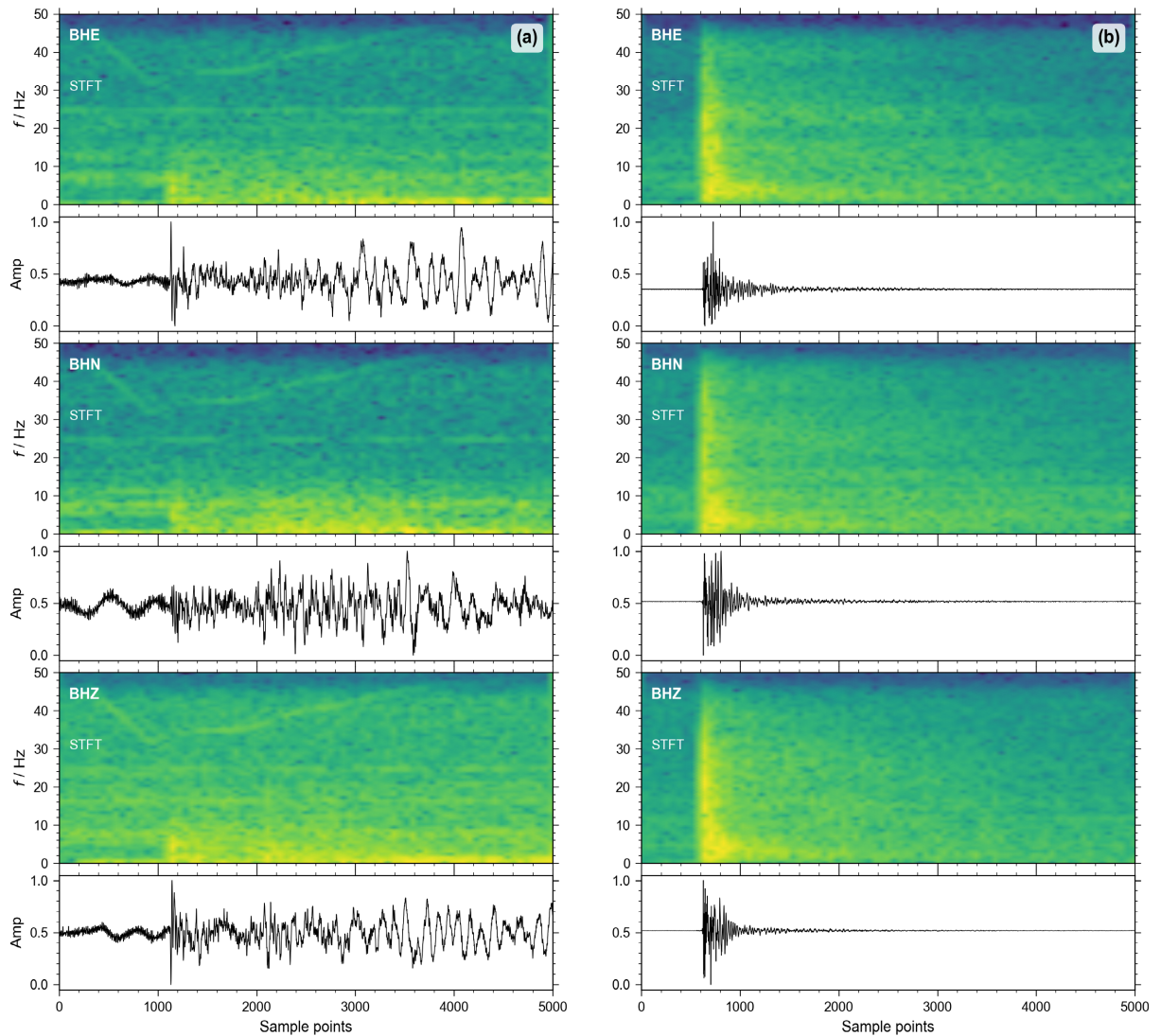


Figure 2. Comparison of waveform time-frequency characteristics

图 2. 波形时频特征对比图

(a) 矿震(2011-04-25,  $ML$  2.7); (b) 天然地震(2026-02-28,  $ML$  3.1)。自上而下依次为  $BHE$ 、 $BHN$ 、 $BHZ$  分量的  $STFT$  时频谱及对对应归一化波形, 色标代表归一化谱振幅, 黄色较为明显的部分示意  $P$  波和  $S$  波到时(图中已标注)。

为揭示两地地震活动的时序与统计差异, 采用自主开发的程序完成以下分析:

**$M-T$  图绘制:** 展示地震事件随时间与震级的分布(图 3(a), 图 3(b));

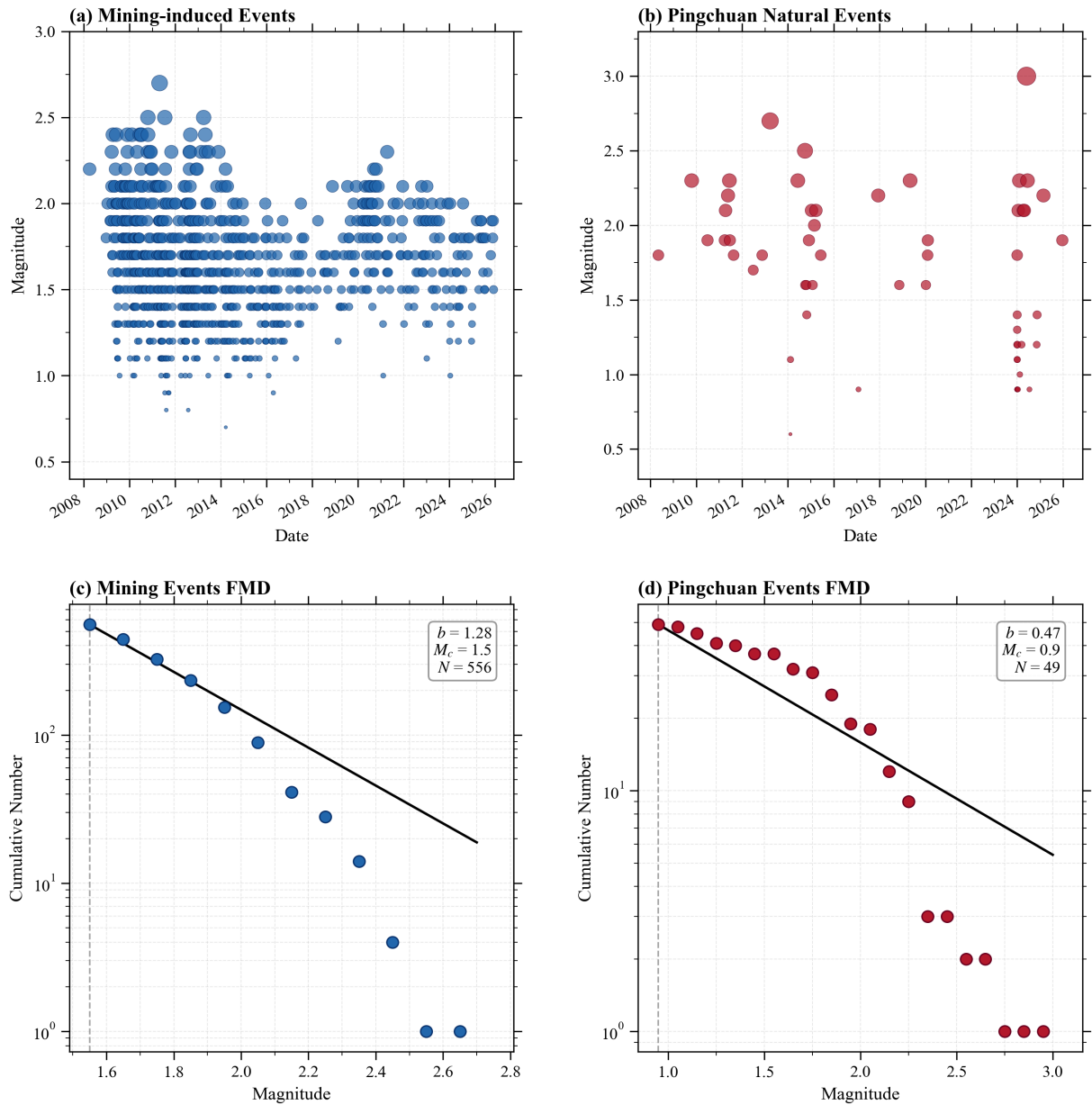


Figure 3. Time-series activity and  $b$ -value statistics

图 3. 时序活动与  $b$  值统计图

**$b$  值计算方法:**

$b$  值是描述地震活动中大小地震比例关系的参数，通过古登堡 - 里克特定律估计:

$$\log_{10} N = a - bM$$

其中  $N$  为震级不小于  $M_C$  的地震累积频次， $a$  为地震活动性水平， $b$  值反映大小地震的比例。本文采用最大似然法计算  $b$  值:

$$b = \frac{\log_{10} e}{\bar{M} - (M_C - \Delta M/2)}$$

式中  $\bar{M}$  为平均震级， $M_C$  为完整性震级， $\Delta M$  为震级分档间隔。

### 震源机制反演方法:

为深入解析矿震破裂性质,采用联合  $P$  波初动极性与  $P/SV/SH$  振幅比的 *Snoke* 方法进行震源机制反演[6]。该方法允许非双力偶源分量的存在,能够更好地描述矿震等诱发地震的复杂破裂机制。反演选用至少 6 个台站记录,频率范围为 1~10 Hz,反演误差控制在 $\pm 0.2$  以内。

## 3. 波形特征区域对比分析

### 3.1. 时域特征对比

如图 2 所示,典型矿震(左图)与天然地震(右图)的原始三分量波形对比揭示出显著的时域差异。白银区矿震波形表现出尖锐的  $P$  波初动,振幅在 1~2 秒内迅速达到峰值,随后呈指数形式快速衰减,整体信号持续时间短暂。统计所有 42 个矿震事件,其平均持续时间为 15.2 秒,标准差为 3.1 秒。与之形成鲜明对比的是,平川区天然地震的  $P$  波初动相对宽缓,振幅上升缓慢,紧随其后的  $S$  波和尾波发育充分,衰减过程可持续数十秒,平均持续时间为 42.7 秒,标准差为 7.5 秒。这一观测结果与大多数作者对比研究结论一致,即矿震的能量衰减明显快于天然地震[7] [8]。

为进一步定量刻画两类地震在能量分配上的差异,我们选取震级相近( $ML$  2.2~3.1)的白银区矿震与平川区天然地震各 10 次(表 1),基于白银台(*BYT*)记录的三分量波形,在统一滤波(1~5 Hz 带通)和测量窗口( $P$  波:到时后 2 s;  $S$  波:到时后 4 s)条件下,提取了垂直向  $P$  波最大振幅与水平向  $S$  波矢量和振幅,计算了  $P/S$  振幅比。为了消除振幅绝对值差异的影响,采用常用对数变换后的  $\log_{10} P/S$  作为分析变量。

**Table 1.** Seismic event parameters used for  $P/S$  ratio analysis

**表 1.** 用于  $P/S$  比分析的地震事件参数

日期	事件类型	震中距(km)	$P$ 波振幅( $\mu\text{m}$ )	$S$ 波振幅( $\mu\text{m}$ )	$P/S$ 比	$\log_{10} P/S$
2009-10-20	天然	42.60	0.06	0.11	0.5455	-0.263
2011-05-22	天然	39.80	0.03	0.03	1.0000	0.000
2011-06-13	天然	52.30	0.04	0.07	0.5714	-0.243
2014-06-07	天然	72.50	0.03	0.07	0.4286	-0.368
2014-09-29	天然	42.70	0.60	0.10	6.0000	0.778
2019-05-01	天然	54.50	0.05	0.10	0.5000	-0.301
2024-02-05	天然	66.60	0.02	0.06	0.3333	-0.477
2024-05-28	天然	77.70	0.46	0.82	0.5610	-0.251
2024-06-13	天然	75.48	0.10	0.12	0.8333	-0.079
2026-02-28	天然	43.29	1.54	1.63	0.9448	-0.025
2010-10-20	矿震	39.60	9.08	17.10	0.5310	-0.275
2010-10-22	矿震	42.30	9.32	10.05	0.9274	-0.033
2010-11-24	矿震	44.50	5.99	6.09	0.9836	-0.007
2011-04-25	矿震	51.50	36.03	41.64	0.8653	-0.063
2011-07-17	矿震	53.60	1.96	18.57	0.1055	-0.977
2012-08-30	矿震	49.60	2.70	4.20	0.6429	-0.192
2013-03-29	矿震	56.80	13.55	16.78	0.8075	-0.093
2013-04-25	矿震	61.30	8.82	10.16	0.8681	-0.061
2013-06-20	矿震	48.70	8.50	12.40	0.6855	-0.164
2013-11-22	矿震	65.90	7.13	13.01	0.5480	-0.261

注:矿震事件来自白银区,天然地震来自平川区;所有振幅均为地动位移,单位  $\mu\text{m}$ 。 $P$  波振幅取自垂直分量, $S$  波振幅为水平分量( $BHE$ 、 $BHN$ )矢量和。

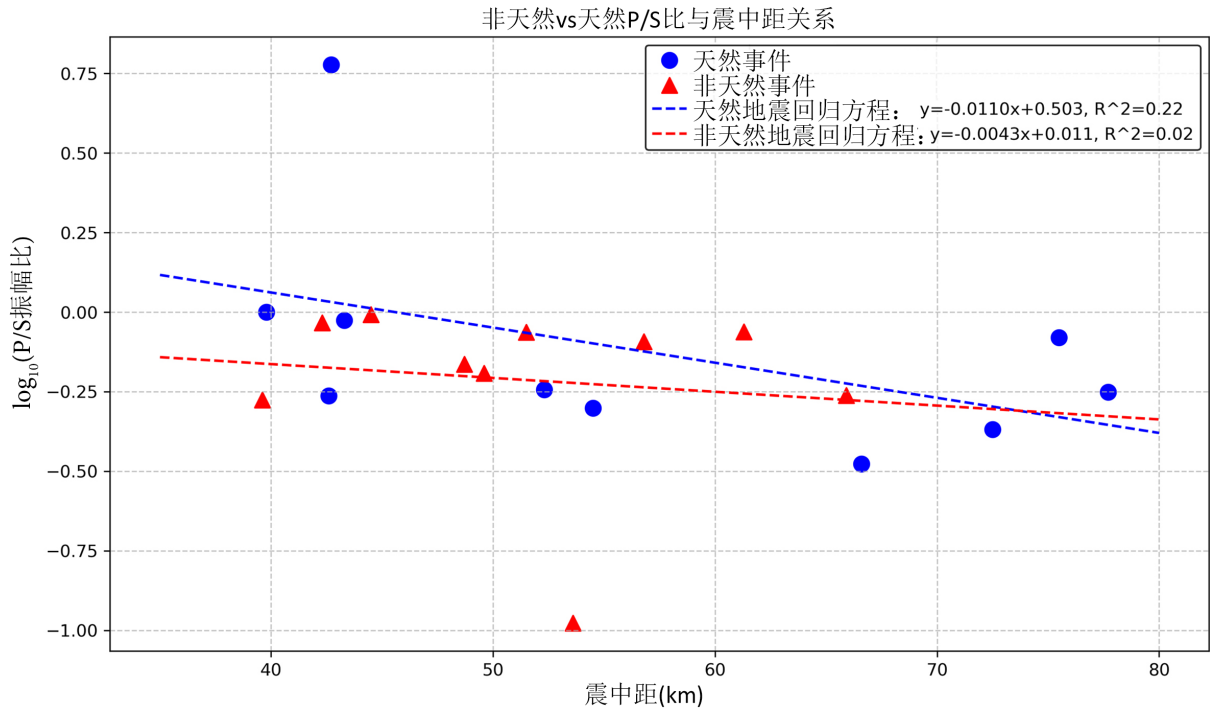
以震中距( $\Delta$ )为自变量,  $\log_{10} P/S$  为因变量, 分别对两组数据进行线性回归分析(图 4)。结果显示:

**天然地震:**  $\log_{10} P/S = -0.011 \times \text{震中距} + 0.503$ , 决定系数  $R^2 = 0.02$ ;

**矿震:**  $\log_{10} P/S = -0.0043 \times \text{震中距} + 0.011$ , 决定系数  $R^2 = 0.02$ 。

回归斜率均接近于零, 且  $R^2$  极低, 表明在本次研究的数据范围内, 震中距对  $P/S$  比的影响可以忽略,  $P/S$  比的变化主要受震源过程控制。这一结果增强了该指标作为矿震识别标志的稳健性。值得注意的是, 天然地震中有一个异常高值事件(2014-09-29,  $P/S = 6.00$ ,  $\log_{10}(P/S) = 0.778$ ), 其  $P$  波振幅异常突出, 可能与该事件的特殊破裂机制(如张性破裂分量较大)或局部场地放大效应有关; 矿震中也存在一个极低值事件(2011-07-17,  $P/S = 0.106$ ,  $\log_{10} P/S = -0.977$ ), 其  $S$  波能量异常强, 或许反映了震源附近强烈的剪切滑动。剔除这两个异常点后重新回归, 两组数据的  $R^2$  仍低于 0.1, 证实了上述结论的稳健性。

尽管  $P/S$  比与震中距无明显线性趋势, 但两组数据的  $P/S$  比分布范围存在显著差异: 矿震的  $\log_{10} P/S$  主要集中于  $-0.3 \sim 0.0$  (对应  $P/S$  比  $0.5 \sim 1.0$ ), 而天然地震的  $\log_{10} P/S$  则散布于  $-0.5 \sim 0.8$  之间, 且包含多个大于 0.3 ( $P/S > 2.0$ ) 的样本。该差异与论文第 4 章揭示的震源机制特征相吻合——矿震矩张量中普遍存在的体积收缩分量改变了经典双力偶辐射模式, 导致  $P$  波能量相对增强, 因而  $P/S$  比整体偏高; 天然地震则以双力偶型剪切破裂为主,  $P/S$  比相对稳定且偏低。这一认识与国内外其他矿震研究区的观测结果一致[9][10]。



**Figure 4.** Scatter plot and linear regression results of  $\log_{10}(P/S)$  as a function of epicentral distance for natural earthquakes and mine-induced earthquakes

**图 4.** 天然地震与矿震  $\log_{10}(P/S)$  随震中距变化散点图及线性回归结果

其中横轴为震中距(km), 竖轴为  $\log_{10}(P/S$  振幅比), 蓝色圆点代表天然事件, 红色三角形代表非天然事件, 蓝色虚线为天然地震回归方程:  $\log_{10} P/S = -0.011 \times \text{震中距} + 0.503$ ,  $R^2 = 0.22$ , 红色虚线为非天然地震回归方程:  $\log_{10} P/S = -0.0043 \times \text{震中距} + 0.011$ ,  $R^2 = 0.02$ 。

### 3.2. 频域特征对比

图 2 展示了选取的代表性矿震(白银区, 2011-04-25,  $ML$  2.7)与天然地震(平川区, 2026-02-28,  $ML$  3.1)

在白银台(BYT)记录的三分量波形及对应的短时傅里叶变换(STFT)时频谱。两事件震级相近( $ML\ 2.7$  vs  $3.1$ ), 震中距也较为接近( $51.5\ km$  vs  $43.3\ km$ ), 使得对比结果主要反映震源过程的本质差异。

从波形图可见, 矿震的  $P$  波和  $S$  波初动尖锐, 振幅在 1~2 秒内迅速达到峰值, 随后快速衰减, 整个信号持续时间约 15 秒; 而天然地震的波形包络则明显宽缓,  $P$  波上升较慢,  $S$  波和尾波发育充分, 持续时间超过 40 秒。这一时域特征与第 3.1 节的统计结果高度吻合。

时频谱进一步揭示了两类事件在频率域上的显著差异:

**矿震(左列):** 能量主要集中在  $P$  波和  $S$  波到达时刻附近, 优势频率分布在 10~25 Hz 的宽频带内, 其中  $P$  波频带略宽于  $S$  波, 高频成分(>20 Hz)在震后数秒内迅速衰减。频谱形态陡峭, 呈现“高频窄时”特征, 与采动诱发破裂的快速、小尺度过程相符。

**天然地震(右列):** 能量分布更为弥散, 沿时间轴延伸较长, 优势频率集中在 2~12 Hz, 频谱形态相对平坦, 低频成分(<5 Hz)丰富且持续数十秒, 体现了构造地震的慢速破裂和长路径传播效应。值得注意的是, 矿震的垂直分量(BHZ)在  $P$  波频段显示出比水平分量(BHE、BHN)更强的能量, 这与矿震震源机制中普遍存在的体积收缩分量(见第 4 章)导致的  $P$  波辐射增强有关。而天然地震的三个分量频谱形态相近, 符合双力偶剪切破裂的辐射特征[11]。

上述时频特征与其他矿震研究区的观测结果一致[12]-[15], 进一步证实了“高频、短时、高  $P/S$  比”可作为矿震识别的有效标志。同时, 图 2 直观地展示了矿震与天然地震在能量时频分布上的本质区别, 为后续震源机制解释和自动识别算法设计提供了重要依据。

### 3.3. 矿震波形识别标志的量化综合

综合上述时域与频域的精细化对比, 本研究提炼出适用于白银地区的矿震波形定量识别标志, 可概括为“三高一短”:

**高  $P/S$  振幅比:**  $\log_{10} P/S$  集中于 -0.3~0.0, 对应  $P/S$  比约 0.5~1.0, 显著高于天然地震的多数事件;

**高优势频率:** 优势频率  $\geq 10\ Hz$ ;

**高衰减速率:** 波形包络衰减时间常数通常小于 5 秒;

**短信号持续时间:** 从  $P$  波初动至信号恢复背景噪声水平, 总时长一般小于 25 秒。

这些量化指标为基于波形特征的矿震自动识别与实时分类算法开发提供了直接、可靠的依据。

## 4. 震源机制解反演与分析

### 反演结果总体特征与分类

对白银区 38 次质量可靠的矿震事件进行 Snook 方法矩张量反演[7], 反演结果的赤平投影图显示其震源机制复杂多样。根据矩张量分解得到的双力偶(DC)、补偿线性矢量偶极和各向同性(ISO)分量比例, 可将其破裂机制划分为三类(图 1 中事件以不同符号标识):

**顶板断裂/沉降型(共 16 例, 占 42%):** 此类事件的矩张量解中含有显著的负各向同性分量(-ISO 占比 15%~40%), 表明震源处存在明显的体积收缩。其断层解通常显示  $T$  轴近于垂直,  $P$  轴近于水平, 力学机制对应于采空区形成后上覆岩层在重力作用下发生的弯曲、断裂乃至整体沉降。

**断层活化/滑移型(共 13 例, 占 34%):** 此类机制以高双力偶分量为主(DC 占比 > 70%), 破裂面解清晰, 主要表现为走滑或正断特性。这反映了采矿活动引起的应力重分布, 触发了矿区预先存在的断层或脆弱构造面发生剪切再活动。

**煤柱/矿柱冲击型(共 9 例, 占 24%):** 其矩张量解中 CLVD 与 ISO 分量均较为显著, 机制复杂, 常表现为混合型破裂。这类事件通常定位于正在开采的工作面附近、遗留煤柱或巷道交叉点等应力集中程度

极高的区域，是高应力煤岩体发生脆性、冲击性破坏的体现。

## 5. 时序活动与统计特征对比

### 5.1. 时间序列( $M-T$ 图)的丛集性分析

图 3(a)展示的白银区与平川区地震  $M-T$  序列图揭示了两者截然不同的时间活动模式。白银区矿震事件在时间轴上表现出显著的丛集性，活跃期与矿井的集中生产周期、工作面回采推进速度、以及大规模放顶或爆破作业时段吻合度极高。例如，在 2021 年下半年和 2023 年末的密集开采阶段， $ML \geq 2.0$  的事件频率明显升高。这种“开采驱动-震群响应”的模式是矿震的典型特征。相比之下，平川区天然地震事件在时间分布上更为均匀，呈随机或准周期分布，受区域构造应力积累与释放的节律控制，未表现出与人类活动相关的丛集规律。

### 5.2. $b$ 值差异的精细统计与地球物理解释

采用最大似然法对两个地震序列进行  $b$  值估算，结果清晰地展示在图 3(b)的拟合曲线中。计算得到：

**白银矿震序列：**  $b = 1.20 \pm 0.15$  (95%置信区间)，完整性震级( $M_C$ )约为  $ML$  1.6，参与计算的样本量为 142 个。

**平川天然地震序列：**  $b = 1.82 \pm 0.20$  (95%置信区间)， $M_C$  约为  $ML$  1.5，参与计算的样本量为 186 个。

统计假设检验(双样本  $t$  检验)确认两地  $b$  值差异高度显著( $p < 0.01$ )。 $b$  值是描述大小地震频度关系的标度参数，其物理意义与介质的应力状态和均匀性密切相关。白银矿震的低  $b$  值( $\sim 1.2$ )指示该序列中较大震级事件的比例相对偏高。国际研究表明，矿震序列的  $b$  值通常在 1.0~1.5 范围内，与本文结果一致。低  $b$  值可能源于：

**极高的局部应力集中：** 高强度开采导致应变能在有限体积的煤岩柱或顶板中快速积累，易于产生较大规模的破裂事件。

**高度非均质的介质环境：** 采动破坏使原岩体变得破碎、裂隙发育，强度各向异性显著，有利于破裂尺度扩展。

**多样化的触发机制：** 同时存在张性破裂(顶板沉降)、剪切滑动(断层活化)和混合破裂(冲击)，增大了产生较高辐射能量事件的可能性。

而平川区天然地震较高的  $b$  值( $\sim 1.8$ )则反映了未受强烈扰动的、相对完整均匀的地壳介质，其地震活动遵循典型的构造地震“小震频发、大震偶发”的稳态应力释放模式。

**$b$  值的预警意义：** 矿震  $b$  值的时序变化可作为评估采区应力状态和岩体稳定性的动态敏感指标。研究表明， $b$  值在主震发生前往往呈现先下降后上升的“肘形”变化特征[13]。监测显示，在几次  $ML > 3.0$  事件发生前，局部  $b$  值均出现了持续数月的下降趋势。因此， $b$  值的系统性降低可能预示着应力集中加剧和大震级矿震风险的提升，为矿山灾害的短期预警提供了有价值的统计物理学参考。

## 6. 综合讨论与结论

### 6.1. 波形特征、震源机制与时空统计的物理关联

矿震“高频、短时”特征源于其震源浅、破裂尺度小、过程快速的物理本质。“高  $P/S$  比”则与震源机制中显著的非双力偶分量(特别是体积收缩)密切相关，该分量改变了经典的剪切破裂辐射花样[15]。时序丛集性与低  $b$  值进一步印证了矿震受局部采动应力扰动主导，而非区域构造应力积累释放[12] [13]。

## 6.2. 讨论

本文基于白银区与平川区的对比研究,初步揭示了矿震与天然地震在多维特征上的差异。然而,受数据条件和方法本身的限制,本研究存在以下局限性:

1) **传播路径影响的潜在不确定性。**尽管白银区与平川区地壳结构总体相近,但采矿活动可能在一定程度上改变了矿区浅地表介质的物理性质(如裂隙密度增加、波速降低等),从而对地震波的传播产生差异化影响。本文直接对比两区波形特征,虽最大程度保留了震源过程的差异信息,但未能完全剥离传播路径效应的贡献。

2) **样本量的限制。**本研究筛选出的高质量矿震事件为42次(用于波形对比)和38次(用于震源机制反演),天然地震事件为10次(用于 $P/S$ 比详细对比)和186次(用于 $b$ 值计算)。虽然 $b$ 值分析的样本量较为充足,但波形精细对比和震源机制分类的样本量相对有限,可能影响统计结论的稳定性和外推能力。特别是对于矿震中占比较少的“冲击型”事件(9例),其波形特征的普适性仍有待更多样本验证。

## 6.3. 结论

1) 确立了白银区矿震“高频(优势频率  $\geq 10$  Hz)、短时(持续时间  $\leq 25$  s)、高 $P/S$ 比( $\log_{10} P/S$ 集中于 $-0.3\sim 0.0$ )”的波形标志,破裂类型多样、应力轴离散的震源机制标志,以及时序丛集、 $b$ 值偏低(平均1.2)的统计特征,三者结合构成可靠鉴别证据链。

2) 揭示了矿震是开采扰动主导的局部应力场作用于特定地质载体的产物,与天然地震在波形、机制、时空分布及统计特征上均存在本质区别。

3) 自主研发的分析程序有效支撑了多维度特征提取与可视化,提升了矿震识别与机理研究的效率与精度。

4) 矿震的低 $b$ 值(平均1.2)与天然地震的高 $b$ 值(平均1.8)对比明显,进一步证实了矿震活动具有大震级事件相对较多的特征,这对灾害风险评估具有重要指示意义。

5) 研究成果对矿山安全监测中的事件识别、风险分类与主动防控具有直接应用价值。

## 基金项目

地震监测预报预警专项(202602015),甘肃省科技计划(25JRRA394)。

## 参考文献

- [1] 刘振江,刘永先,卢雪松,等.不规则断层煤柱区孤岛工作面应力演化特征和矿震活动规律[J].陕西煤炭,2026,45(2):1-6.
- [2] 白贤栖,曹安业,薛成春,等.基于频率域模拟的高位矿震传播及井上下扰动研究[J/OL].煤炭学报,2026:1-17.  
<https://doi.org/10.13225/j.cnki.jccs.2025.0920>,2026-05-08.
- [3] 张思萌.鹤岗地区地震、爆破与矿震记录的识别[J].地震地磁观测与研究,2021,42(6):82-88.
- [4] Miller, A.D., Foulger, G.R., Julian, B.R., 秦嘉政.非双力偶地震:观测(三)[J].世界地震译丛,2000(2):1-19.
- [5] 郑建常,徐长朋,赵金花,等.基于S变换的矿山地区地震波形时频分析[J].地震地磁观测与研究,2014,35(Z3):199-204.
- [6] 张帆,杨晓忠,吴立飞,等.基于短时傅里叶变换和卷积神经网络的地震事件分类[J].地震学报,2021,43(4):463-473.
- [7] 曹安业,杨耀,陈凡,等.内蒙古矿区矿震发生特点及防控对策与实践[J].煤炭科学技术,2026,54(1):130-149.
- [8] 王树旺,王文才,杨晓鹏,等.2023年甘肃白银平川区4.9级地震强地面运动特征分析[J].地震工程学报,2025,47(1):207-216.
- [9] 王恩元,张力,王笑然,等.煤岩张剪裂隙震源机制及应力反演方法[J].煤炭学报,2026,51(1):293-313.

- [10] 沈婕, 朱景宝, 缪发军, 等. 基于残差神经网络的天然地震与非天然地震信号分类[J]. 地震工程与工程振动, 2024, 44(5): 13-25.
- [11] 沈婕. 基于深度学习的天然与非天然地震分类[D]: [硕士学位论文]. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所, 2024.
- [12] 苏日亚, 朱彦飞, 秦续峰, 等. 基于煤矿地震监测专用站网的非天然地震特征分析[J]. 地震地磁观测与研究, 2025, 46(5): 37-44.
- [13] 宋解放. 煤矿断层孕震机制与减震方法研究[D]: [博士学位论文]. 北京: 中国矿业大学, 2025.
- [14] 姚华建, 陈晓非. 近断层观测与破裂震相识别开启地震破裂研究新篇章[J]. 中国科学: 地球科学, 2025, 55(6): 2101-2103.
- [15] 陈凡. 矿震扰动下煤岩体动力响应特征及致灾风险预测研究[D]: [博士学位论文]. 大连: 大连理工大学, 2025.