第 59 卷 第 5 期
2026 年（总 249 期）

西 北 地 质
NORTHWESTERN GEOLOGY

Vol. 59 No. 5
2026(Sum249)

引文格式：刘小平，杨飞龙. 黄土塬地区煤田地震勘探检波器适应性研究与应用[J]. 西北地质，2026，59(5)：374−383. DOI：10.12401/j.nwg.2026062

Citation：LIU Xiaoping，YANG Feilong. Adaptability Study and Application of Geophones in Cofield Seismic Exploration on the Loess Plateau[J]. Northwestern Geology，2026，59(5)：374−383. DOI：10.12401/j.nwg.2026062

黄土塬地区煤田地震勘探检波器适应性研究与应用

刘小平[1]，杨飞龙[2,*]

（1. 甘肃煤田地质局综合普查队，甘肃 天水 741000；2. 西安石油大学地球科学与工程学院，陕西 西安 710065）

摘 要：针对黄土塬区地表切割剧烈、地震波强衰减制约煤田地震勘探精度的难题，笔者开展60 Hz动圈式、10 Hz SmartSolo节点及DSU-1全数字检波器同步对比试验。在统一采集参数下，基于单炮记录、频谱特征与信噪比的多维定量评价表明：60 Hz检波器低频衰减严重，难以满足深部探测需求；10 Hz节点检波器低频能量充沛但高频细节缺失；DSU-1全数字检波器凭借5～100 Hz宽频带、零相位及>140 dB高动态范围优势，波场保真度最优，平均信噪比达8.5 dB，成像剖面同相轴连续、分辨率高，煤层及隐蔽构造刻画能力显著增强。研究构建了检波器适用性评价体系，提出了黄土塬区高精度煤田地震勘探检波器选型方案，为同类复杂区勘探提供了技术支撑。

关键词：煤田地震勘探；黄土塬；检波器选型；DSU-1数字检波器；波场保真度

中图分类号：P631.4；P618.11 **文献标志码**：A **文章编号**：1009-6248(2026)05-0374-10

Adaptability Study and Application of Geophones in Cofield Seismic Exploration on the Loess Plateau

LIU Xiaoping[1], YANG Feilong[2,*]

（1. Comprehensive Survey Team, Gansu Bureau of Coal Geology, Tianshui 741000, Gansu, China；2. School of Earth Sciences and Engineering, Xi'an Petroleum University, Xi'an 710065, Shaanxi, China）

Abstract：To address the challenge of low precision in coalfield seismic exploration caused by intense surface incision and severe seismic wave attenuation in the Loess Tableland area, this study conducts a synchronous comparative experiment involving 60 Hz moving-coil geophones, 10 Hz SmartSolo nodal geophones, and DSU-1 fully digital geophones. Under unified acquisition parameters, multidimensional quantitative evaluations based on shot records, spectral characteristics, and signal-to-noise ratios (SNR) demonstrate that: the 60 Hz geophone suffers from severe low-frequency attenuation and fails to meet deep exploration requirements; the 10 Hz SmartSolo nodal geophone provides abundant low-frequency energy but lacks high-frequency details; leveraging advantages such as a 5–100 Hz wide frequency bandwidth, zero-phase response, and a high dynamic range exceed-

收稿日期：2026-07-16；**修回日期**：2026-08-11；**责任编辑**：吕鹏瑞

基金项目：陕西省自然科学基础研究计划重点项目(2026JC-QYCX-095)，国家自然科学基金(42304135)联合资助。

作者简介：刘小平(1979−)，男，高级工程师，主要从事地震数据采集与解释。E−mail：763544664@qq.com。

*通讯作者：杨飞龙(1988−)，男，博士，副教授，主要从事地震资料处理与解释。E−mail：feilongy@xsyu.edu.cn。

© Editorial Office of *Northwestern Geology*. OA under CC BY-NC-ND

ing 140 dB, the DSU-1 fully digital geophone achieves optimal wavefield fidelity, with an average SNR of 8.5 dB. Furthermore, it yields imaging profiles characterized by continuous event tracking and high resolution, significantly enhancing the characterization of coal seams and concealed structures. This research establishes a geophone applicability evaluation system and proposes a geophone selection scheme for high-precision coalfield seismic exploration in the Loess Tableland, providing robust technical support for exploration in similar complex regions.

Keywords: coalfield seismic exploration; loess tableland; geophone selection; DSU-1 digital geophone; wavefield fidelity

随着中国煤炭资源开发重心向西部转移, 黄土塬区已成为煤田地震勘探的主战场之一。该区域地表切割剧烈、黄土覆盖层巨厚且结构疏松, 地震波在传播过程中面临极强的吸收衰减与散射干扰, 导致原始单炮记录信噪比极低, 成为制约深部煤层及隐蔽致灾构造精准探测的关键瓶颈(张向鹏, 2010; 董守华等, 2023; 彭苏萍等, 2026)。在地震采集三大要素(震源、检波器、观测系统)中, 检波器作为地震信号的“感知终端”, 其频率响应特性、相位保真度及耦合方式直接决定了原始数据的信息承载能力。因此, 针对黄土塬复杂近地表条件, 开展不同类型检波器的适应性对比研究, 探索最优的检波器选型与配套采集参数, 对于提升西部煤田地震勘探精度具有重要的理论意义与工程实用价值(陈强等, 2010)。

煤田地震勘探长期依赖自然频率 10～40 Hz 的动圈式速度型检波器, 依靠多串多并的组合接收方式压制随机噪声, 在区域构造控制与主采煤层起伏探测中积累了成熟经验(程建远等, 2004)。然而, 随着勘探目标向落差≤5 m 的小断层、陷落柱及冲刷带等隐蔽地质异常体转变, 常规动圈检波器的局限性日益凸显。受电磁感应原理制约, 该类检波器存在低频段幅频响应非线性、高频衰减显著及相位畸变等固有缺陷, 加之组合效应对有效高频成分的损失, 使其难以满足高精度构造成像的需求。特别是在西部黄土塬区, 巨厚的低速层进一步加剧了常规检波器对深层煤层反射波能量的吸收衰减, 导致深层信号淹没于干扰波中(付锁堂等, 2020)。为突破上述技术瓶颈, 基于微机电系统(MEMS)的数字加速度检波器凭借其宽频带(0.1～800 Hz)、大动态范围及良好的幅频与相频线性响应特征, 逐渐成为煤田高密度三维地震勘探的核心装备(Mougenot, 2004; Diallo et al., 2026)。研究表明, MEMS 数字检波器采用单点接收模式, 可有效规避传统组合产生的空间假频与波形畸变, 显著提升煤层反射波的高频成分与横向分辨率, 对小构造的识别能力显著优于模拟检波器组合(刘俊杰等, 2013)。张利兵等(2020)通过采区对比试验证实, MEMS 检波器在黄土覆盖区接收的低频能量更充沛、波形保真度更高, 处理后煤层反射波同相轴连续性及小断层成像清晰度均得到明显改善。此外, 在井下槽波探测领域, MEMS 数字检波器因其宽频带与高信噪比优势, 其绕射偏移成像结果与井下揭露构造的吻合度显著优于动圈检波器, 更适用于工作面内隐蔽构造的精细探测(赵朋朋, 2025)。在新一代数字采集系统中, SmartSolo(IGU-16HD 系列)节点地震传感器集成了 MEMS 检波器与独立采集存储单元, 实现了无缆单点全频带接收。该装备具有布设灵活、道一致性好、抗电磁干扰能力强等特点, 已在山西、陕西等地煤矿区成功应用, 尤其在地形复杂的黄土塬区表现出极高的施工效率, 所获资料高频成分丰富, 剖面品质与有缆系统相比具有可比性甚至更优(鲍晓龙等, 2021)。法国 Sercel 公司推出的 DSU-1 数字检波器同样基于 MEMS 技术, 具备极低的相位失真与大动态范围, 在煤田数字高密度勘探中表现出优于模拟检波器的子波保真度, 有利于识别小断层及煤层的细微变化。但研究亦指出, 在强干扰环境下, 其低频信噪比表现略逊于低频模拟检波器, 需结合观测系统进行针对性优化(马宁等, 2022)。与之形成对比的是 60 Hz 高频动圈式检波器, 此类检波器曾在早期高分辨率勘探中用于提升浅部地层分辨率, 在潜水位浅、低速层薄的勘查区具有一定效果(唐文榜, 1987)。然而, 潘冬明等(2010)指出, 60 Hz 及以上的高频检波器会严重压制煤层反射波中的低频成分, 造成深煤层及下组煤反射波能量的大幅衰减, 且受上组煤屏蔽效应的影响, 在多煤层地区深部成像中存在明显局限。因此, 在现代煤田高精度勘探中, 高频动圈检波器的应用空间已逐渐受限, 主要局限于浅层采空区探测或工程地震领域。

尽管动圈式、MEMS 及新一代数字检波器在煤田勘探中应用广泛，但针对黄土塬区强衰减、厚风化层及强噪声的复杂近地表环境，其适应性差异尚未明晰，最优组合策略亦未形成定论。现有研究多聚焦于单体性能测试，缺乏常规动圈、SmartSolo 节点与 DSU-1 数字检波器在同工区、同观测系统下的系统性对标分析。鉴于此，笔者通过开展 3 类检波器的同步采集试验，结合地质与地球物理特征，综合单炮品质、频谱响应、成像效果及作业效能进行量化评价，提出了黄土塬区高精度地震勘探的检波器选型与观测系统优化配置方案，为黄土塬及类似复杂区的煤田地震高精度勘探奠定了技术基础。

1 研究区地层特征

1.1 黄土层发育情况

研究区位于鄂尔多斯盆地西部，地貌受构造与侵蚀作用控制，地表出露特征具有明显的二元结构。除局部沟谷深切处可见白垩系基岩裸露外，广大区域均被第四系松散沉积物覆盖（樊双虎等，2020；周静萍等，2024）。根据地层钻孔揭露，区内发育地层由老至新依次为：奥陶系中统平凉组（O_2p）、中上三叠统延长组（T_3yn）、下侏罗统富县组（J_1f）、中侏罗统延安组（J_2y）、中侏罗统直罗组（J_2z）、中侏罗统安定组（J_2a）、白垩系下统六盘山群（K_1L）及第四系（Q）。第四系覆盖层全区分布，以浅褐黄色马兰黄土（Q_3m）为主（图 1），结构疏松、孔隙度大、透水性强，底部多见不规则状钙质结核富集。在马福川等主要沟谷地带，发育有全新统（Q_4）冲洪积砂、砾、卵石层，呈条带状或串珠状沿河谷展布；其物质来源主要为上游青龙山断褶带基岩风化剥蚀产物，岩性成分复杂，以石英岩、灰岩及砂岩砾石为主。研究区主要过井地质剖面的地层序列完整连续，构造形态呈规律性起伏，清晰反映了区内构造演化特征（图 1）。

1.2 含煤地层与煤层发育特征

研究区主要含煤地层为侏罗系中统延安组（J_2y），沉积总厚度为 353.08 m。该组含煤性良好，共发育独立煤层 8 层，累计平均厚度为 23.52 m，总体含煤系数为 6.6%。含煤岩系主要分布于延安组中–下部层段，对应 3 个层段、6 个中型沉积旋回；该含煤岩段平均总厚度为 245.57 m，内部发育独立煤层为 15 层，累计平均厚度为 22.59 m，含煤系数达 9.2%，构成区内主要聚煤中心。

在可采性方面，该含煤岩段内可采煤层共 11 层，依次为煤 1-1、煤 1-2、煤 2-1、煤 3-1、煤 4-1a、煤 4-1b、煤 5-1a、煤 5-1b、煤 7-1、煤 8-1a 及煤 8-1b。可采煤层累计平均厚度为 18.44 m，可采含煤系数为 5.2%；剔除夹矸影响后，纯煤平均厚度为 18.21 m。可采煤层厚度大多为 2.0 m，整体呈以中厚煤层为主、局部发育厚煤层的赋存格局。

1.3 含煤地层地球物理特征

受岩性与物性差异控制，含煤地层与上覆松散层在测井曲线上呈现出显著的响应差异（图 2）。按岩性、岩相组合特征，可将延安组划分为 4 段（J_2y^1-J_2y^4）、8 个沉积旋回（$J_2y_1^1$-$J_2y_4^8$），各段间均为连续沉积，每段均由两个沉积旋回组成，下部 6 个旋回层中 每个旋回之岩性从下向上依次为厚层状灰–灰白色粗、中、细粒砂岩，深灰–灰黑色粉砂岩、砂质泥岩、泥岩夹碳质泥岩及煤层；顶部第Ⅷ旋回一般不含煤，上部第Ⅶ旋回在个别钻孔仅见不可采薄煤（0 号），多数钻孔无煤。中–下部三段 6 个沉积旋回为本区延安组的主要含煤岩段，该组地层各旋回沉积环境为扇三角洲背景下的分流河道、间湾–沼泽–泥碳沼泽–浅湖相沉积。延安组的自然伽马（GR）与密度（DEN）曲线在煤层段均表

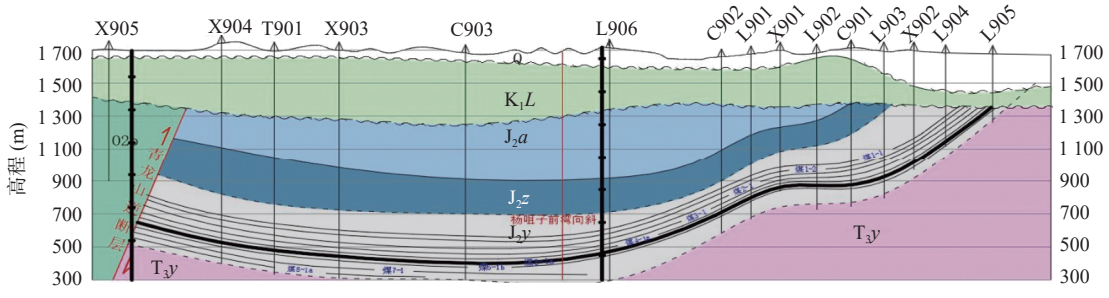


图1 研究区主要过井地质剖面

Fig. 1 Key well-based geological profiles of the study area

现为显著的低值异常(图 2b)。黄土层因富含有黏土矿物及放射性元素, GR 曲线呈高值背景, 且随岩性变化呈现非平稳的起伏波动; 进入煤系地层后, 受煤岩自身放射性元素匮乏及其屏蔽效应的影响, GR 值明显降低, 曲线形态转变为低幅值的“凹陷”或平直段。三侧向电阻率(LL3)曲线在煤层段则表现为高幅值异常。含水黄土层导电性良好, LL3 曲线呈低值平滑特征; 而下伏含煤基岩(砂岩、泥岩及煤层)岩性相对致密, 电阻率显著抬升, 曲线表现为高值突变或阶梯状抬升, 与上部松散沉积层界限清晰。

2　检波器特性分析

检波器作为地震勘探的感知终端, 其耦合特性与动态响应直接决定原始资料的信噪比与成像精度。在煤田高精度勘探中, 常规模拟检波器虽成本低廉, 但存在低频响应不足及大动态范围非线性失真等问题; 相较之下, 数字检波器凭借高采样率与宽动态范围, 在波形保真度与抗干扰能力上具有显著优势。因此, 系统剖析不同类型检波器的幅频响应与相位一致性, 是揭示黄土塬区波场传播规律、优化复杂区采集参数的关键。基于检波器物理特性, 通过对比分析其响应特征, 为观测系统设计提供理论支撑。

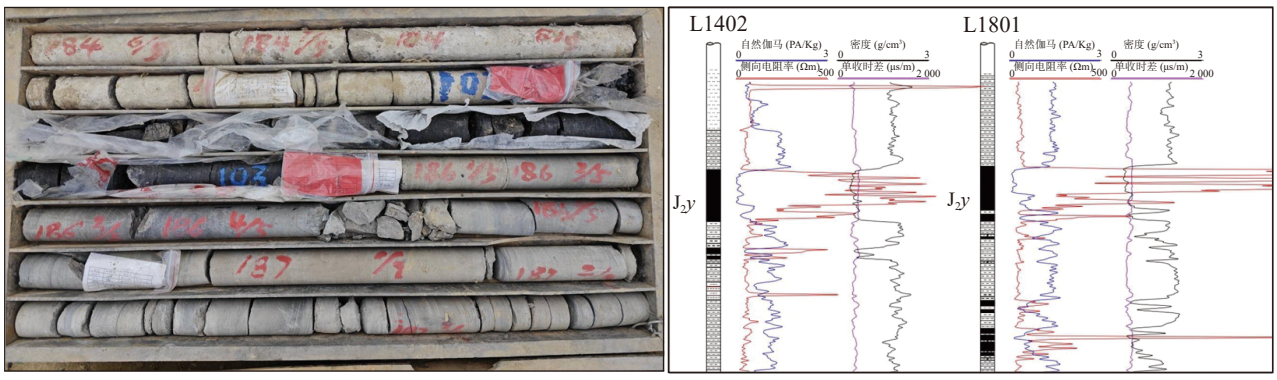
2.1　幅频特性

文中分别使用 60 Hz 高频动圈式检波器、10 Hz SmartSolo 节点式检波器(模拟检波器)和 DSU-1 数字检波器进行对比分析, 前两者属于模拟速度型检波器, 后者属于 MEMS 数字加速度型检波器, 二者在工作原理与频带响应上存在本质差异。模拟速度型检波器本质上为二阶阻尼振荡系统, 其幅频响应呈现典型的带通特性。如图 3a 所示, 在低于自然频率(Fn)的频段, 两者响应曲线均以约 12 dB/oct 的斜率向低频端急剧衰减(图 3a; 模拟检波器曲线在 Fn 左侧的陡降); 因 60 Hz 检波器 Fn 较高, 其低频衰减起始点远移, 深层低频信号(如煤层底界反射波)损失更为严重, 而 10 Hz 节点式虽 Fn 较低, 在超低频段仍受此规律限制。在高于 Fn 的频段, 幅值趋于稳定, 表现为高通特性。值得注意的是, 结合相位响应(图 3b), 此类检波器在 Fn 附近存在非线性共振区, 易诱发显著相位畸变(图中 Fn 处相位快速穿越), 且在低频段(f≪Fn)对微弱信号拾取能力有限, 难以满足煤田高精度勘探对深层低频信息的需求。

DSU-1 数字加速度检波器基于微机电系统(MEMS)加速度传感技术, 工作于自然频率以下的平坦响应区(图 3a)。其幅频特性在 0～800 Hz 范围内保持高度平直(无明显谐振峰), 动态范围可达 120 dB。与模拟检波器不同, DSU-1 通过数字信号处理实现零相位响应(图 3b), 从根本上消除了高低频段的幅相畸变, 确保了地震子波的波形保真度。此外, DSU-1 直接输出数字信号, 具备优异的电磁干扰抑制能力。在煤田勘探中, 工业电产生的 50 Hz 工频干扰是主要噪声源之一; 传统模拟采集常采用 50 Hz 陷波器或带阻滤波压制干扰, 但此类操作易对邻近频带(尤其是低频有效波)造成不可逆的能量衰减。相比之下, DSU-1 借助数字域滤波技术, 可在消除 50 Hz 干扰的同时, 最大限度保留有效波频带, 显著提升复杂干扰环境下的资料信噪比。

2.2　检波器性能参数

文中使用的 3 种类型检波器基本性能进行对比, 3 种检波器在机电耦合特性与信号还原能力上存在显著差异(表 1)。在灵敏度方面, 10 Hz SmartSolo(IGU-



a. 岩性特征; b. 测井响应特征

图2　中侏罗统延安组地层特征

Fig. 2　Characteristics of the Middle Jurassic Yan'an Formation

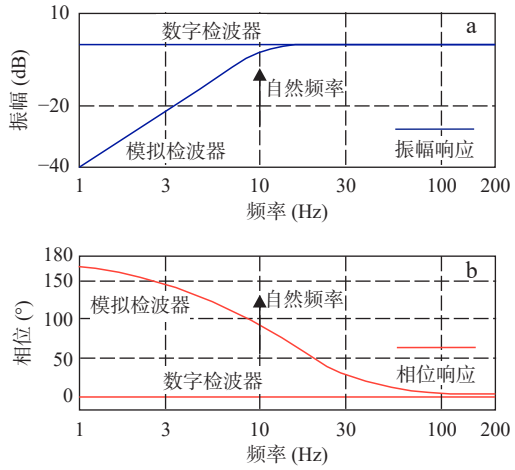


图3 数字检波器与模拟检波器的振幅曲线(a)、相位响应曲线(b)

Fig. 3 (a) Amplitude response curves and (b) phase response curves of digital and analog geophones

16HR)节点式检波器以 85.8 V/m/s 的表现优于常规 60 Hz 动圈式检波器(39～55 V/m/s),而 DSU-1 数字检波器凭借 24-bit 量化位数及大于 140 dB 的动态范围,实质上实现了对微弱信号的超高分辨率采集,其等效灵敏度远超模拟器件(表 1)。阻尼特性对比显示,DSU-1 与 SmartSolo 的阻尼系数均稳定在临界阻尼 0.7,有利于缩短瞬态响应时间并减少自由振荡;而 60 Hz 检波器处于 0.45～0.65 的欠阻尼状态,易引发较长的尾部振荡,不利于高频信号的精确归位(表 1)。尤为关键的是谐波失真指标,DSU-1 与 SmartSolo 的谐波失真分别低于−110 dB 和 0.000 2%～0.000 5%(表 1),相较于 60 Hz 检波器(<0.2%)降低了 2～3 个数量级,表明数字检波器在信号保真度上具有压倒性优势。

综合各项参数判定,DSU-1 数字检波器因具备宽频带响应、零相位失真及极高的动态范围,其综合性能最优;10 Hz SmartSolo 节点式检波器次之,其在模拟向数字过渡中展现了较好的均衡性能;常规 60 Hz 动圈式检波器受限于自身物理结构,在灵敏度、阻尼特性及谐波失真控制上略显不足。

2.3 施工效率与成本

在黄土塬区复杂地形条件下,3 种检波器的施工效率与市场价值呈现出明显的差异化特征。施工效率方面,10 Hz SmartSolo 节点式检波器凭借无缆自主采集、单体轻量化的优势,布设与运输最为便捷,综合效率最高;DSU-1 数字检波器虽为有缆设备,但其检波单元与传输线缆一体化集成,有效规避了接头接触不良及接收道中断等常见故障,施工可靠性较好,效率次之;60 Hz 高频动圈式检波器单体重达 10 Hz SmartSolo 的 15 倍、DSU-1 的 1.6 倍,且存在接触不良、接收道不通及数据传输延迟等工程缺陷,施工效率最低。市场价值方面,设备购置单价由高到低依次为 DSU-1、60 Hz 高频动圈式检波器和 10 Hz SmartSolo;而在实际项目租赁模式下,DSU-1 与 10 Hz SmartSolo 的租赁成本基本持平,60 Hz 高频动圈式检波器虽单机租金偏低,但因配套辅助设备(交叉站、大线等)租赁需求量大,综合租赁成本反而居首。

3 对比试验分析

为最大限度剔除非研究变量的干扰,确保不同检波器响应特征对比的科学性与有效性,本次野外对比试验严格遵循单一变量控制原则。在激发端,统一采用 3 井组合激发模式,单井药量为 2 kg,激发层位选择在降速带中,以消除激发层位岩性差异对震源子波的影响。在接收端,3 种检波器以实测物理点坐标为基准,呈“品”字形紧凑布设,确保各传感器在同一波阵面到达时经历一致的近地表耦合条件。此外,数据

表 1 检波器参数一览表

Tab. 1 Parameters of geophones

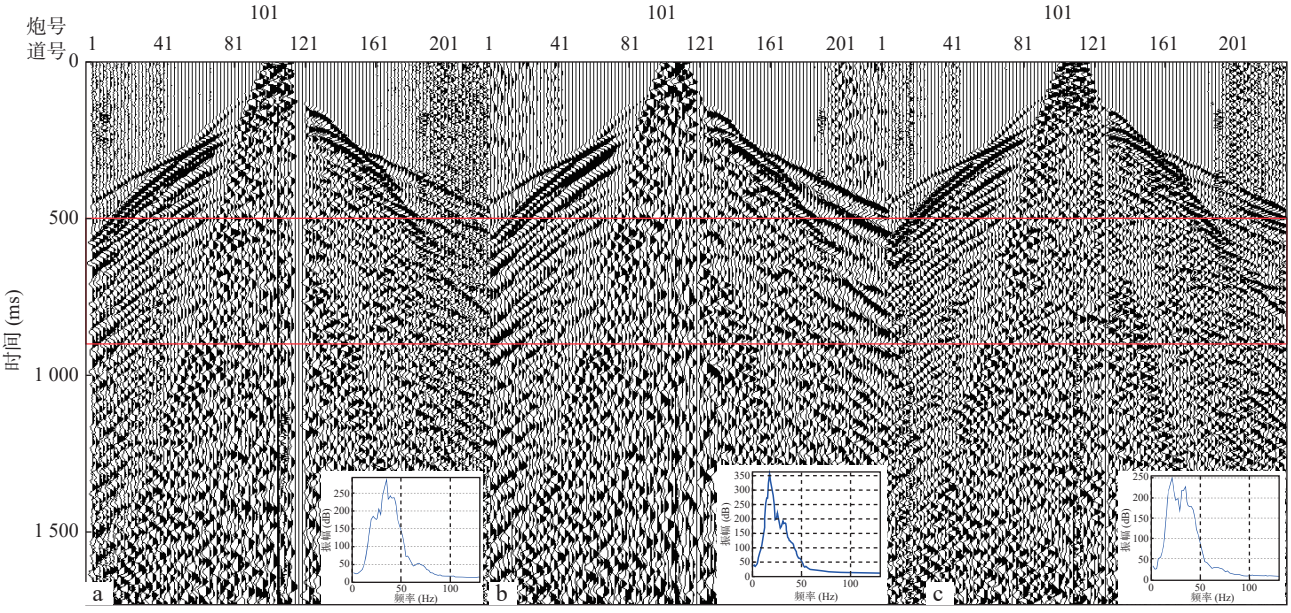
设备型号参数	60 Hz高频动圈式检波器	428XL(DSU-1)	10 Hz SmartSolo(IGU-16HR)
自然频率(Fn)	60 Hz±5%	1～1 000 Hz	10 Hz
灵敏度(G)	39～55 V/m/s	24-bit(> 140 dB)	85.8 V/m/s
线圈电阻(Rc)	668～940 Ω	280 Ω	430～500 Ω
阻尼系数	0.45～0.65	0.7	0.7
谐波失真	< 0.2%	<−110 dB	0.000 2%～0.000 5%
工作温度	−40～+70 ℃/+90 ℃	−40～+70 ℃	−40 ～+70 ℃

采集系统参数全部统一: 采样率设为 1 ms, 记录长度为 2 s, 覆盖次数为 72 次。通过标准化作业流程, 有效保证了采集数据的同源性与可比性, 为后续检波器性能的定量分析奠定了坚实的数据基础。

3.1　原始单炮记录分析

通过对主要目的层段原始单炮数据进行频谱分析, 获取了 60 Hz 高频模拟检波器、10 Hz SmartSolo 节点式检波器和 DSU-1 全数字检波器的原始单炮记录及频谱特征(图 4)。三者波形特征、振幅响应及频率成分存在较明显的差异(图 4), 体现了不同传感机制对地震波场的响应特性。在波形与频率特征方面, 60 Hz 高频检波器受限于二阶系统带通特性, 主频偏高, 波形尖锐且相位信息丰富, 对煤层反射波的高频成分具有一定的放大效应; 10 Hz SmartSolo 节点检波器低频响应灵敏, 对深层低频反射波能量具有较强的聚焦能力, 但其高频衰减特性亦十分明显; DSU-1 数字检波器凭借宽频带响应优势, 完整记录了地震子波的波形细节, 同相轴能量强弱交替特征清晰, 频带宽度显著优于模拟设备, 在 700 ms 目的层附近能够清楚的看到煤层反射波场特征, 单炮记录信噪比较高。在振幅与信噪比特征方面, 60 Hz 检波器对浅层强反射能量响应敏感, 但在深层弱信号接收上存在局限, 且因通频带窄, 对高频随机噪声的压制能力较弱; 10 Hz SmartSolo 节点检波器虽在低频段表现出较高的灵敏度, 但对高频干扰的抑制作用相对有限; DSU-1 数字检波器依托大于 140 dB 的高动态范围, 在保证强反射波信号的同时, 有效压制相对弱能量的部分背景噪声, 大幅改善了资料的整体信噪比。

综合上述分析, 针对以煤层为主要目标的精细勘探, 60 Hz 检波器虽分辨率尚可, 但因低频缺失及信噪比受限, 难以有效识别深部弱反射层位; DSU-1 全数字检波器在频带宽度、动态范围及保真度方面的综合优势明显, 能够为复杂地质条件下的煤田高精度勘探提供更可靠的原始数据支撑。



a. 60 Hz 高频检波器串; b. 10 Hz 节点检波器; c. DSU-1 检波器; 红色方框表示时窗

图4　3 种检波器原始单炮记录及频谱特征对比图

Fig. 4　Comparison of raw shot gathers and spectral characteristics for three types of geophones

3.2　原始记录能量分析

3 种类型检波器单炮数据能量的统计分析结果显示, 不同检波器在中深层存在明显的能量差异(图 5)。黄土塬区复杂的近地表结构加剧了地震波的传播衰减, 检波器性能成为制约反射波能量接收的关键因素。60 Hz 高频检波器受限于高自然频率的带通特性, 在放大高频成分的同时压制了低频能量, 导致煤层反射波总能量偏弱; 10 Hz SmartSolo 节点检波器虽对主频附近的低频信号响应较优, 有利于深层弱信号采集, 但对高频噪声抑制能力不足, 致使记录信噪比偏低。相比之下, DSU-1 全数字检波器凭借 5～100 Hz 以上的超宽频带响应, 实现了对全频段煤层反射波能量的

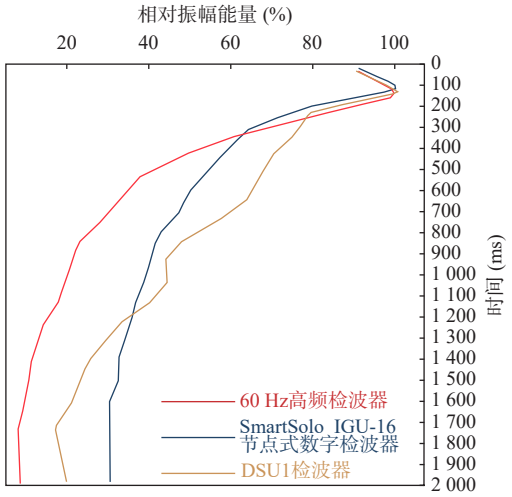


图5 3 种检波器单炮数据的能量时变曲线示意图

Fig. 5 Schematic diagram of time-varying energy curves of single-shot data for three types of geophones

均衡接收，尤其在低频段优势显著。此外，检波器与大地耦合条件对能量传递具有重要影响。针对黄土塬区表层岩性横向变速剧烈导致的非一致性耦合问题，DSU-1 采用单点接收与高密度采样技术，可通过高精度地表一致性处理有效补偿耦合差异引起的能量畸变，显著提升能量稳定性。常规 60 Hz 检波器串因组内各单元耦合不均且信号预先混合，难以在数据处理阶段精准校正振幅差异，在复杂地形区尤为明显。因此，检波器类型直接决定了反射波能量的保真度与稳定性，基于目标层深度及幅频响应特征优选检波器，是提升黄土塬区地震勘探精度的核心环节。

3.3 信噪比分析

信噪比是信号功率(P_{signal})与噪声功率(P_{noise})的比值，是评价地震数据品质的首要量化指标，在数据处理流程中居于核心地位(高鹏等，2010)。地震信号通常采用分贝(dB)标度对其进行对数表征：$SNR_{(dB)}=10\times\log_{10}(P_{signal}/P_{noise})$。基于 3 种检波器的采集数据定量对比分析(图 6)，其信噪比响应特征呈现显著差异。60 Hz 高频模拟检波器虽主频响应较高，但受限于窄频带特性及低阻尼系数，对高频随机噪声压制能力不足，导致数据整体信噪比偏低；尤其在黄土塬区地形起伏剧烈、近地表散射干扰强烈的复杂地表条件下，该问题更为突出。相比之下，DSU-1 全数字检波器凭借宽频带响应特性及大于 140 dB 的高动态范围，在有效波占优的时频域内展现出优异的信噪分离能力。研究区多期重复采集试验统计表明，DSU-1 平均信噪比可达 8.5 dB，显著优于 60 Hz 高频检波器(6.2 dB)及 10 Hz SmartSolo 节点式检波器(7.1 dB)(图 6)。通过对检波器机理进行分析表明，10 Hz SmartSolo 检波器虽在<10 Hz 低频段对面波等规则干扰具有一定压制优势，但受其低频高灵敏度设计导向影响，仪器对高频干扰的衰减能力有限，导致高频强能量干扰占比偏高，制约了记录整体信噪比的提升。从煤田地震勘探应用来看，高信噪比数据是识别薄煤层弱反射波、精细刻画煤层空间展布的前提。DSU-1 全数字检波器不仅能显著增强厚煤层反射波的同相轴连续性，更能有效提升薄煤层弱反射信号的可检测性。

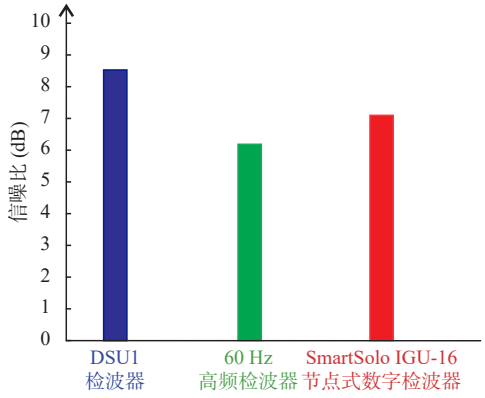


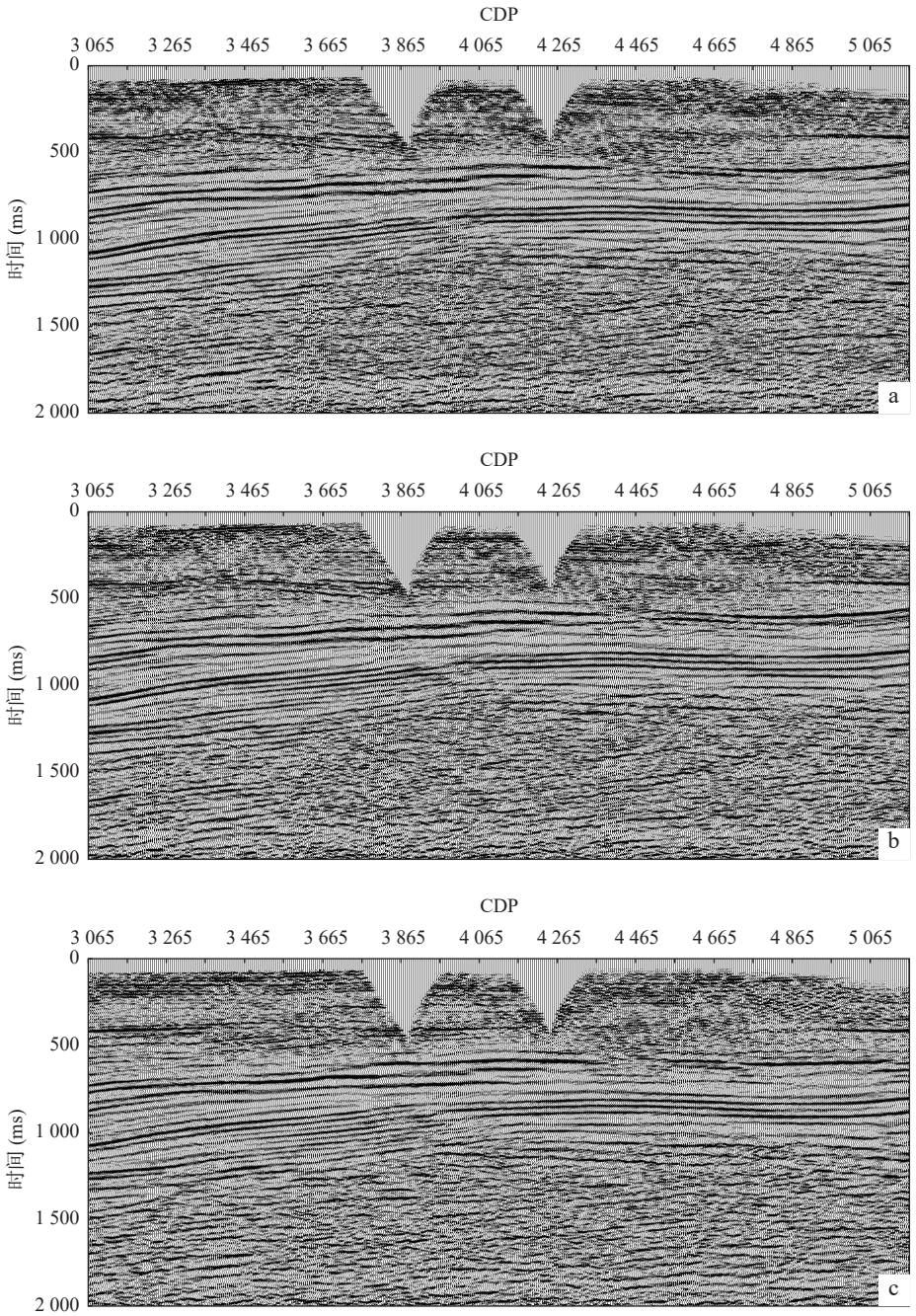
图6 3 种检波器原始数据信噪比对比示意图

Fig. 6 Schematic diagram of SNR comparison of raw data from three types of geophones

3.4 煤层反射波场特征分析

反射波的同相轴连续性与分辨率是评价地震资料品质的核心指标，二者高度依赖于检波器的波场保真采集能力。黄土塬区发育强烈的多次波与侧面波干扰，对同相轴横向连续性构成严峻挑战。DSU-1 全数字检波器凭借宽频带响应与近乎零相位畸变特性，实现了全频段有效波与干扰波的无损记录，为叠前精细波场分离提供了理想的数据基础。该方法在精准压制噪声的同时，完整保留了有效波波形，不仅显著增强了同相轴横向连续性，更因频带信息的完整性，大幅拓宽了成像剖面的频谱宽度，使得同相轴细节丰富、纵向分辨率显著提升，在识别小断层及隐蔽地质异常体方面优势突出。

3 种检波器原始数据经统一参数处理后的成像时间剖面(图 7)显示，DSU-1 全数字检波器展现出优异的宽频响应特性，对中、高、低频信号均具有良好的保真度，支持对反射波实施无损伤滤波处理。其处理结果从浅至深反射波频带宽广，时间剖面同相轴丰富，



a. 60 Hz 高频检波器串；b. 10 Hz 节点检波器；c. DSU-1 检波器

图7　3 种检波器时间剖面对比示意图

Fig. 7　Schematic diagram of time-section comparison for three types of geophones

显著提升了反射波分辨率, 在识别微小断裂及隐蔽地质异常体方面效果显著。相比之下, 60 Hz 高频检波器虽对高频信号敏感, 但受限于窄频带响应, 且对近源强高频干扰存在增益放大效应, 反而降低了反射波的整体分辨率。10 Hz SmartSolo 节点检波器虽在低频段表现优于 60 Hz 检波器, 但因高频灵敏度衰减, 导致反射波高频细节信息丢失, 同样制约了时间剖面的分辨率。反射波的连续性与分辨率是衡量地震资料品质的核心指标, 二者均高度依赖于检波器对波场信息的高保真采集能力。黄土塬区多次波、侧面波等干扰发育, 对同相轴的横向连续性构成严峻挑战。DSU-1 全数字检波器凭借宽频带、零相位畸变的特性, 实现了对全频段有效波与干扰波的无损记录, 为叠前精细波场分离提供了理想的输入条件。基于此, 可在精准

压制干扰的同时，完整保留有效波波形，不仅显著增强了同相轴的横向连续性，更因保留了完整的频率成分，使得处理后的剖面频带大幅拓宽，同相轴细节丰富，纵向分辨率显著提升，在识别小断层及隐蔽地质异常体方面优势突出。

3.5 频谱分析

通过对上述成像结果（时窗为 500～1 500 ms）进行频谱分析可以系统揭示不同检波器对地震波频率成分的响应机制及其与地质目标的匹配关系。60 Hz 高频模拟检波器在 30～80 Hz 频段表现出显著的响应优势（图 8），其频谱主瓣明显向高频端偏移。这一结果与研究区特殊的地质特征相吻合：研究区煤层多为薄层（单层厚度较小），且层数较多。薄层顶底界面对地震波的干涉作用导致了“薄层调谐效应”，使得反射波频谱向高频端扩展；多套薄煤层的叠置反射进一步增强了高频能量的显示，导致该区煤层反射波整体呈现主频偏高的特征。相比之下，DSU-1 全数字检波器有效频带覆盖范围适中，完整记录了浅部煤层及围岩反射波的高频细节，有效保留了低频反射波成分，维持了不同地层反射波间的相对能量关系，为后续反演提供了保真的振幅信息。10 Hz SmartSolo 节点式检波器则在 5～30 Hz 低频段表现突出，对煤层上覆厚层砂岩的弱反射信号具有较强的聚焦能力。但需指出的是，节点检波器对高频信息的响应相对弱化，这一特性虽有利于压制部分高频干扰，却可能限制其对薄煤层及小尺度地质异常体的识别精度，尤其在黄土塬区低频干扰发育的背景下，其信噪比改善效果需审慎评估。

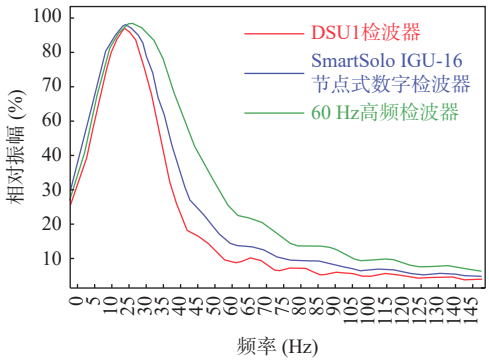


图8 3 种检波器频谱对比图

Fig. 8 Comparison of amplitude spectra for three types of geophones

综合研究区主要煤层反射波频带集中于 20～60 Hz 的特征，DSU-1 全数字检波器的宽频带特性显著优于其他两类设备，是该区域地震勘探的理想选择。此外，频谱分析还揭示了检波器在噪声压制机制上的本质差异：60 Hz 高频检波器虽能在一定程度上突出目标频段信号，但其伴随的高频环境噪声水平较高，且缺乏灵活的数字滤波手段，易掩盖有效波，反而不利于时间剖面分辨率的提升；而 DSU-1 全数字检波器忠实记录了有效波与干扰波的原始特征，保留了完整的波场信息，为后续在叠前处理阶段实施精准、针对性的去噪处理（如自适应滤波、面波压制等）奠定了基础，从而从根本上保障了时间剖面的高信噪比与高分辨率。

4 结论

（1）数字检波器在频带宽度与相位一致性上优于模拟检波器。DSU-1 全数字检波器频响为 5～100 Hz，相较于 60 Hz 模拟检波器和 10 Hz SmartSolo 节点检波器，其有效避免了低频缺失与高频截断现象，波场保真度显著提高。

（2）DSU-1 检波器大幅提升了复杂区地震资料的信噪比与分辨率。采集数据信噪比平均可达 8.5 dB，经处理后剖面同相轴连续性显著增强，对黄土塬区煤层及基底构造的成像细节恢复能力较强。

（3）建立了面向勘探目标的检波器适用性评价体系。研究表明，60 Hz 检波器适用于浅层高分辨勘探，DSU-1 检波器是深部复杂构造成像的首选，而 10 Hz SmartSolo 节点检波器在深层弱信号提取方面表现良好。

利益冲突声明（Conflict of Interests）：

所有作者声明不存在利益冲突。

All authors disclose no relevant conflict of interests.

参考文献（References）：

鲍晓龙，白涛，侯刚栋，等. SmartSolo 节点地震数据采集系统的工作原理及应用[J]. 煤炭与化工，2021，44(8)：34−37.

BAO Xiaolong, BAI Tao, HOU Gangdong, et al. Working principle and application of smartsolo node seismic data acquisition system[J]. Coal and Chemical Industry, 2021, 44(8): 34−37.

陈强，常锁亮，樊国强，等. 巨厚黄土地区煤田地震资料采集关

键技术[J]. 煤田地质与勘探, 2010, 38(4): 59−64.

CHEN Qiang, CHANG Suoliang, FAN Guoqiang, et al. , Research on key techniques for coalfield seismic data acquisition in thick loess area[J]. Coal Geology & Exploration, 2010, 38(4): 59−64.

程建远, 张广忠, 胡继武. 黄土塬区的三维地震勘探技术[J]. 中国煤田地质, 2004, 16(6): 40−43.

CHENG Jianyuan, ZHANG Guangzhong, HU Jiwu. 3D Seismic Prospecting Technique in Loess Tableland[J]. Coal Geology of China, 2004, 16(6): 40−43.

董守华, 黄亚平, 金学良, 等. 煤田高密度三维地震勘探技术的发展现状及趋势[J]. 煤田地质与勘探, 2023, 51(2): 273−282.

DONG Shouhua, HUANG Yaping, JIN Xueliang, et al. , Development status and trend of high-density 3D seismic exploration technology for coal fields[J]. Coal Geology & Exploration, 2023, 51(2): 273−282.

付锁堂, 王大兴, 姚宗惠. 鄂尔多斯盆地黄土塬三维地震技术突破及勘探开发效果[J]. 中国石油勘探, 2020, 25(1): 67−77.

FU Suotang, WANG Daxing, YAO Zonghui. Progress of 3D seismic exploration technologies and oil and gas exploration and development performance in the loess tableland area of the Ordos Basin[J]. China Petroleum Exploration, 2020, 25(1): 67−77.

樊双虎, 张天宇, 卢玉东, 等. 鄂尔多斯西南缘陇县-岐山断层构造地貌特征定量分析[J]. 西北地质, 2020, 53(2): 60−76.

FAN Shuanghu, ZHANG Tianyu, LU Yudong, et al. Quantitative Analysis of Morphotectonic Features of the Longxian-Qishan Fault in the Southwestern Margin of Ordos Block[J]. Northwestern Geology, 2020, 53(2): 60−76.

高鹏, 吴志成. 地震勘探在陕北深部煤田预查中的应用[J]. 西北地质, 2010, 43(2): 120−127.

GAO Peng, WU Zhicheng. Application of Seismic Prospecting Technology in Investigating Deeply Buried Jurassic Coal Field of North Shaanxi[J]. Northwestern Geology, 2010, 43(2): 120−127.

刘俊杰, 王彦春. 煤田数字高密度地震勘探的应用效果探析[J]. 中国煤炭, 2013, 39(1): 37−39+47.

LIU Junjie, WANG Yanchun. On appliacation effectiveness of digital high-density seismic prospecting in coalfield[J]. China Coal, 2013, 39(1): 37−39+47.

马宁, 左卫华, 张晨林. YF-SOLO-5Hz 与 DSU1 地震检波器数据采集效果的对比分析[J]. 地质装备, 2022, 23(1): 23−30.

MA Ning, ZUO Weihua, ZHANG Chenlin. Comparison and Analysis of Data Acquisition Effect between YF-SOLO-5Hz and DSU1 Geophone[J]. Eeological Equipment, 2022, 23(1): 23−30.

潘冬明, 李娟娟, 胡明顺, 等. 多煤层的反射地震响应特性研究[J]. 地球物理学进展, 2010, 25(5): 1769−1744.

PAN Dongming, LI Juanjuan, HU Mingshun, et al. Study of reflection response to Multilayer coal seams[J]. Progress in Geoghys, 2010, 25(5): 1769−1744.

彭苏萍, 崔晓芹, 杜文凤, 等. 中国煤田地震勘探技术发展现状及趋势[J]. 石油地球物理勘探, 2026, 61(1): 239−254.

PENG Suping, CUI Xiaoqin, DU Wenfeng, et al. , The current status and development trends of coalfield seismic exploration technology in China[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2026, 61(1): 239−254.

唐文榜. 高分辨率地震勘探在煤田勘查中的应用和效果[J]. 物探与化探, 1987, 11(2): 89−93+95−100.

TANG Wenbang. The application of high-resolution seismic exploration to coalfield survey and its effect[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 1987, 11(2): 89−93+95−100.

张利兵, 董守华. 煤矿采区地震勘探不同检波器接收试验与分析[J]. 煤田地质与勘探, 2020, 48(6): 33−39.

ZHANG Libing, DONG Shouhua. Reception test and analysis of different geophones in caol mining districts seismic exploration [J]. Coal Geology& Exploration, 2020, 48(6): 33−39.

赵朋朋. MEMS 槽波地震仪的应用效果研究[J]. 能源与环保, 2025, 47(7): 59−66.

ZHAO Pengpeng. Research on application effect of MEMS slot wave seismometer[J]. China Energy and Environmental Protection, 2025, 47(7): 59−66.

张向鹏. 戈壁地区煤田野外地震勘探资料采集的技术难点分析与对策[J]. 西北地质, 2010, 43(2): 44−47.

ZHANG Xiangpeng. Technical Difficulty Analysis and Countermeasures for Field Data Gathering of Seismic Exploration for Coal in Gobi District[J]. Northwestern Geology, 2010, 43(2): 44−47.

周静萍, 李震, 肖飞, 等. 马岭地区前侏罗纪古地貌精细刻画及其控藏作用研究[J]. 西北地质, 2024, 57(3): 251−261.

ZHOU Jingping, LI Zhen, XIAO Fei, et al. Paleogeomorphology Character of Pre-Jurassic and Its Implications for Hydrocarbon Accumulation Research in Maling Area[J]. Northwestern Geology, 2024, 57(3): 251−261.

Diallo M S, Giraldo-Buitrago J, Mouaki Benani Chebihat A, et al. Recovering low frequency data below the natural frequency of-the geophone: Theoretical Review and Optimal PracticalDesign[J]. The Leading Edge, 2026, 45(7): 525−536.

Mougenot D. How digital sensors compare to geophones? [C]. SEG Technical Program Expanded Abstracts, Society of Exploration Geophysicists, 2004, 23(1): 5−8.