

文章编号: 1671-1505(2025)03-0777-08 DOI: 10.7605/gdxb.2025.031

基于测井曲线重构和地震波阻抗反演的 煤系关键金属矿层精细勘探技术*

王 雷^{1,2} 祖渝文² 邸立伟² 杨敏芳³
边 晓² 凌紫玉² 邵龙义² 鲁 静²

1 中国石油煤层气有限责任公司, 北京 100028

2 煤炭精细勘探与智能开发全国重点实验室, 中国矿业大学(北京)地球科学与测绘工程学院, 北京 100083

3 中国石油勘探开发研究院, 北京 100083

摘 要 云南东部和贵州西部(滇东—黔西)地区上二叠统龙潭组煤系底部, 赋存着累计厚度达数米、以高自然伽马(GR)异常为特征的 Nb-Zr-REY-Ga 型关键金属矿层(简称矿层)。利用地震工作手段及传统波阻抗反演, 可有效地区分砂岩和泥岩, 但受限于波阻抗差异微小却无法识别矿层。为了构建对该矿层的精细地球物理勘探技术, 论文基于测井和地震数据, 以该矿层中镓(Ga)元素为例(临界工业品位 50 $\mu\text{g/g}$ 时自然伽马值 > 2.0 API), 利用信息统计加权方法和矿层自然伽马数据重构了纵波速度曲线, 使计算后得到的波阻抗曲线矿层信号增强了约 120%, 并将矿层约束在大于 16 000 $\text{g/cm}^3 \cdot \text{m/s}$ 的重构后波阻抗数值范围内, 解决了利用波阻抗曲线识别关键金属矿层的技术难题。在利用重构波阻抗数据反演的地震剖面上, 矿层边界清晰、横向可追索性好。经钻井验证, 地震反演预测的矿层厚度误差介于 -18.1%~16.7% 之间。说明利用重构后波阻抗数据进行地震反演可以有效识别和追踪矿层, 达到了对矿层精细探测的目的。该技术方法对有测井异常的煤系关键金属矿层精细勘探具有较好的应用价值和前景。

关键词 煤系关键金属 测井曲线重构 波阻抗反演 勘探技术 二叠系 滇东—黔西

第一作者简介 王雷, 男, 1988 年生, 工程师, 主要从事煤系矿产评价与开发方面的科研和管理工作。

E-mail: wanglei1234568789@163.com。

通讯作者简介 鲁静, 男, 1976 年生, 教授, 博导, 主要从事沉积学、煤系矿产资源评价与开发等方面教学和科学研究。E-mail: lujing@cumtb.edu.cn。

中图分类号: P631.4, TD954 文献标志码: A

Fine exploration technology of critical metals in coal measures based on well logging curve reconstruction and seismic impedance inversion

WANG Lei^{1,2} ZU Yuwen² DI Liwei² YANG Minfang³
BIAN Xiao² LING Ziyu² SHAO Longyi² LU Jing²

* 国家重点研发计划(编号: 2021YFC2902000)、国家自然科学基金项目(编号: 42172196、41772161)、柳江盆地地质遗迹保护项目(编号: Z1303002403442001)、中国矿业大学(北京)大学生创新训练项目(编号: 202402027)联合资助成果。[Co-funded by the National Key Research and Development Program (No. 2021YFC2902000), National Natural Science Foundation of China (Nos. 42172196, 41772161), Liujiang Basin Geological Relics Protection Project (No. Z1303002403442001), China University of Mining and Technology (Beijing) College Students' Innovation Training Project (No. 202402027)]

收稿日期: 2024-07-28 改回日期: 2024-09-26

1 PetroChina Coalbed Methane Company Limited, Beijing 100028, China

2 National key laboratory of Fine Coal Exploration and Intelligent Development, College of Geoscience and Surveying Engineering, China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083, China

3 Research Institute of Petroleum Exploration and Development, PetroChina, Beijing 100083, China

Abstract At the bottom of the Upper Permian Longtan coal measures in eastern Yunnan and western Guizhou, there is a Nb-Zr-REY-Ga type critical metal ore layer with a cumulative thickness of several meters and characterized by natural gamma positive anomalies. By means of seismic work and traditional wave impedance inversion, sandstone and mudstone can be effectively distinguished, but limited by the small difference of wave impedance, the ore layer can not be identified. In order to construct a fine geophysical exploration technology for the ore layer, based on logging and seismic data, this paper takes gallium (Ga) element in the ore layer as an example (γ value > 2.0 API when the critical industrial grade is $50 \mu\text{g/g}$), and uses the information statistical weighting method and the natural gamma data of the ore layer to reconstruct the longitudinal wave velocity curve, so that the calculated wave impedance curve of the ore layer signal is enhanced by about 120%, and the ore layer is constrained within the reconstructed wave impedance value range of $>16\,000 \text{ g/cm}^3 \cdot \text{m/s}$, which solves the technical problem of identifying key metal ore layers by using wave impedance curve. On the seismic section inverted by the reconstructed wave impedance data, the boundary of the ore layer is clear and the lateral traceability is good. Through drilling verification, the average error of the thickness of the ore layer predicted by seismic inversion is 17.6%. It shows that the seismic inversion using the reconstructed wave impedance data can effectively identify and track the ore layer, and achieve the purpose of fine detection of the ore layer. This technical method has good application value and prospect for fine exploration of critical metal ore layers in coal measures with abnormal logging.

Key words critical metals of coal measures, logging curve reconstruction, wave impedance inversion, exploration technique, Permian, eastern Yunnan and western Guizhou

About the first author WANG Lei, born in 1988, engineer, is mainly engaged in development and management of coal measures minerals. E-mail: wanglei1234568789@163.com.

About the corresponding author LU Jing, born in 1976, professor, is mainly engaged in teaching and scientific research in sedimentology, evaluation and development of mineral resources in coal measures. E-mail: lujing@cumtb.edu.cn.

关键金属 (critical metals) 是广泛应用于新材料、新能源和新技术等领域的、现今社会必需但存在较高安全供应的一类金属矿产总称 (侯增谦等, 2020), 是当前重要的战略矿产资源 (翟明国等, 2019)。在一定的区域构造、沉积背景和有利的地球化学循环条件下, 关键金属可以在含煤地层内富集, 形成“煤系关键金属矿床 (Dai *et al.*, 2024)。煤系关键金属通常与煤共生或伴生, 是常规关键金属资源的重要补充。目前中国已经发现多个大型或超大型煤系关键金属矿床, 如云南临沧煤—锆矿床 (魏强和代世峰, 2020)、山西宁武煤田平朔矿区和沁水盆地晋城矿区、阳泉矿区等地的煤—锂矿

床、内蒙古准格尔煤—稼—铝矿床等 (Sun *et al.*, 2022a, 2022b, 2022c), 是传统关键金属矿产的补充。Dai 等 (2010) 在中国滇东—黔西地区上二叠统煤系 (龙潭/宣威组) 底部, 发现富集 Nb、Zr、REY 和 Ga 等多种关键金属的矿层 (被命名为煤系 Nb-Zr-REY-Ga 多金属共富集矿床)。根据钻孔和露头剖面资料, 该矿床具有分布范围广、累积厚度大 (一般 2~8 m)、关键金属浓度高 (主要关键金属浓度是其相应工业品位的 2~5 倍) 的特征, 并表现为自然伽马曲线为高异常, 被认为是中国最具有开发潜力的煤系关键金属资源之一。目前对该煤系 Nb-Zr-REY-Ga 型关键金属矿床的研究, 多集中在

其物质来源 (Zhao *et al.*, 2016, 2017)、赋存状态 (代世峰等, 2022)、矿层自然伽马曲线高异常原因 (Wang *et al.*, 2022a, 2022b; 边晓等, 2024)、利用测井数据进行矿层边界识别和关键金属浓度预测 (边晓等, 2024) 等方面。但利用地震资料和技术对该类型矿层精细勘探方法方面的研究尚未开展, 尽管该矿层明显的自然伽马曲线高异常特征, 为基于测井曲线重构和地震波阻抗反演的关键金属勘探提供了潜在的可行性。

基于声波曲线的波阻抗地震反演是储集层岩性和物性预测的关键技术之一 (管永伟等, 2016; 张明川等, 2016), 它与地震属性和地震相分析、概率神经网络反演等, 都是当前进行储集层岩性和物性解释、预测的主要技术手段 (Lelièvre and Oldenburg, 2009)。然而, 在进行目标层 (如关键金属矿层) 识别和预测时, 受井内环境和地层压实等因素影响 (Zhang *et al.*, 2024), 有时声波曲线不能很好地反映地层岩性和物性变化, 造成声波曲线与地震剖面匹配变差。同时, 其他测井曲线可能对矿层的识别能力较高 (如自然伽马、密度等), 但这些曲线却不能直接用于地震剖面反演。如滇东—黔西地区龙潭/宣威组煤系底部的 Nb-Zr-REY-Ga 多金属共富集矿层, 在自然伽马曲线上表现为明显的高 GR 异常, 但其他测井曲线 (如声波和密度等) 没有明显差异。因此, 要对声波曲线进行重构 (崔健和张星, 2008), 使其既能反映地下介质的速度和波阻抗特征, 又能体现矿层岩性差异, 从而建立起矿层与地震数据之间更直接的联系 (朱国军, 2017)。

基于以上问题, 论文以黔西可乐向斜上二叠统龙潭组底部 Nb-Zr-REY-Ga 型关键金属矿层镓 (Ga) 元素为对象, 利用典型地震、钻孔自然伽马和纵波测井等数据资料, 在对含矿岩系声波曲线重构 (利用矿层敏感自然伽马曲线) 基础上, 进行含矿岩系波阻抗反演、识别关键金属矿层, 探索基于测井曲线重构和地震波阻抗反演的煤系关键金属精细勘探技术。

1 地质背景

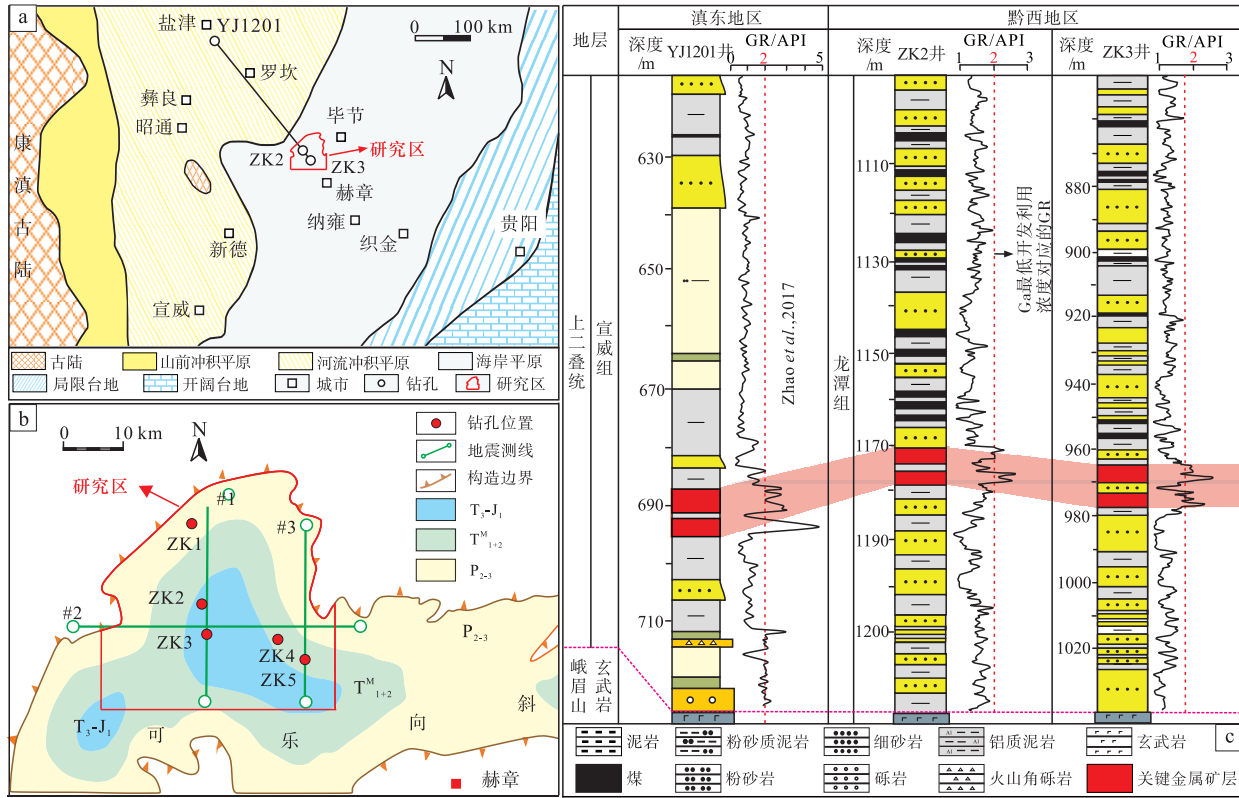
晚二叠世滇东—黔西地区发育一套以峨眉山玄武岩为基底、以宣威/龙潭组—长兴组为代表的含煤岩系。该时期研究区地势西高东低, 西部边缘为

物源区川滇古陆, 自西向东, 依次发育冲积平原 (滇东) 和海岸平原 (黔西) 煤系沉积, 以及碎屑岩和碳酸盐岩浅海沉积 (图 1-a; Wang *et al.*, 2020)。宣威组为一套分布在滇东的陆相煤系, 其上部为陆源碎屑岩夹煤层沉积, 下部 (最年轻的 1 层煤至玄武岩顶) 为含 Nb-Zr-REY-Ga 关键金属的含矿岩系。该含矿岩系在滇东一般厚 10~20 m、含矿层 1~3 层 (累计厚度 2~8 m), 矿层岩性主要为灰色—灰绿色致密状黏土岩。至黔西, 上二叠统煤系 (龙潭组—长兴组) 过渡为一套陆源碎屑岩夹煤层和海相灰岩的过渡相煤系。煤系底部的含矿岩系减薄到 5~10 m, 矿层岩性相变为较单一的灰白色铝土质泥岩。宣威/龙潭组煤系底部含矿岩系中, 矿层与围岩岩性差异不明显, 但在自然伽马测井曲线上表现为明显的高异常 (Dai *et al.*, 2010)。该矿层实测的关键金属元素浓度与其对应的自然伽马数值相关性分析表明, Ga 元素浓度与自然伽马数值呈指数函数关系, 其临界工业品位 (50 $\mu\text{g/g}$) 对应的临界自然伽马值为 2.0 API (边晓等, 2024)。

可乐向斜位于贵州省西北部, 为北东—南西走向的向斜构造 (图 1-a, 1-b)。向斜两翼出露中二叠统茅口组 and 上二叠统峨眉山玄武岩和龙潭组, 向斜核部为三叠系飞仙关组、永宁镇组等以及侏罗系自流井群和下沙溪庙组等。

2 研究材料与方法

论文研究材料位于可乐向斜西部 (图 1-b), 包括 3 条二维地震测线 (#1-#3)、5 口钻孔岩心 (ZK1-ZK5) 及其对应的自然伽马、纵波速度和密度测井数据。本次研究目标地层为龙潭组关键金属矿层下部约 60 m 含矿岩系 (玄武岩顶至最年轻的一层煤底) 和上部约 90 m 含煤岩系 (图 1-c)。在研究区, 钻井揭露该矿层一般由 2~5 个分层组成, 累计厚度 5~8 m。由于该矿层实测镓 (Ga) 临界工业品位 (50 $\mu\text{g/g}$) 对应的临界自然伽马值为 2.0 API (边晓等, 2024), 所以以数值 2.0 API 为矿层和非矿层划分界线。由于 ZK3 井位于 #1 地震测线、并紧邻 #2 地震测线, 同时 ZK5 位于 #3 地震测线, 所以本次研究选取 ZK3 和 ZK5 井为重构井, 其他 3 口井为验证井。由于研究区 Nb-Zr-REY-Ga 型关键金属矿层表现



a—地理位置和沉积背景；b—地震测线及钻孔分布图；c—Nb-Zr-REY-Ga 型关键金属矿层分布图

图 1 滇东—黔西上二叠统关键金属含矿岩系地质背景

Fig. 1 Geological background of critical metal measures and distribution borehole and seismic lines of the Upper Permian in eastern Yunnan and western Guizhou

为明显的高 GR 异常，所以选取自然伽马曲线对纵波速度曲线进行重构。

本次基于声波曲线重构使用信息统计加权的方法（王俊瑞等，2016），依据特定的权值将自然伽马曲线特征加入到声波曲线中得到重构后声波曲线。重构前对所用曲线进行异常值剔除以提高测井数据质量。信息统计加权方法重构声波曲线具体步骤包括（梁建刚等，2023）：

1) 通过公式（1）对目的层段（主要为砂岩与泥岩层）自然伽马曲线数据进行砂泥岩归一化处理。公式（1）中， $GR_{归一化}$ 为归一化后的自然伽马曲线数值， $GR_{原}$ 为原始自然伽马数值， $GR_{原泥max}$ 为泥岩自然伽马最大值， $GR_{原砂min}$ 为砂岩自然伽马最小值。

$$GR_{归一化} = \frac{GR_{原} - GR_{原砂min}}{GR_{原泥max} - GR_{原砂min}} \quad (1)$$

2) 利用归一化后的自然伽马曲线数据，依据公式（2）计算含矿岩系自然伽马曲线数值的异常

指数（GH）。公式（2）中，GH 为异常指数。G 为经验系数（取值范围 0~1），其作用是使含矿岩系中矿层和非矿层自然伽马曲线的形貌差异变大，压制非矿层自然伽马曲线数值对后续重构的影响。

$$GH = \exp\left(\frac{GR_{归一化}}{G}\right) \quad (2)$$

3) 纵波幅度标准化后的含矿岩系异常指数 (V_H) 计算。首先对声波时差数据求导数得到纵波速度数据，再对纵波曲线进行滤波处理，获得高频 (DT_h) 和低频 (DT_l) 数据，并求取纵波曲线高频与低频的差值 (C)。然后利用公式（3），计算纵波幅度标准化后的含矿岩系异常指数。公式（3）中， $GH_{泥max}$ 为矿层异常指数泥岩的最大值， $GH_{砂min}$ 为矿层异常指数砂岩最小值，C 为纵波曲线高频与低频的幅度差值。

$$V_H = \left[\left(\frac{GH - GH_{砂min}}{GH_{泥max} - GH_{砂min}} \right) + 1 \right] \times C \quad (3)$$

4) 利用纵波幅度标准化后的含矿岩系异常指

数 (V_H)，对纵波速度曲线进行重构 (公式 (4))。公式 (4) 中， DT_{GR} 为重构后的纵波速度曲线数值， DT_f 为低频纵波曲线数值， B 为经验系数 (取范围 0~1)。

$$DT_{GR} = DT_f + B \times V_H \quad (4)$$

通过调节经验系数 G 与 B 数值，实现将矿层自然伽马曲线高异常特征加入到纵波速度曲线中，同时又不会掩盖非矿层纵波速度曲线特征，从而解决了原始纵波速度曲线对矿层响应不明显的问题。

本次波阻抗反演使用 Jason 软件，利用模型反演方法。模型反演方法的基本思路是根据地震资料解释成果，利用测井资料进行外推和内插，建立波阻抗模型。将从波阻抗模型中得出的反射系数与子波褶积，得到合成地震记录。将合成地震记录与原始地震记录进行比较，反复迭代，不断修改波阻抗模型参数，直至得到一个最优的波阻抗模型 (矿层反演结果与重构钻井揭露的矿层信息差较一致)，此时的模型即可视为反演结果 (崔若飞等, 2009; 韦瑜等, 2017)。

3 研究结果与分析

3.1 纵波曲线重构结果与分析

ZK3 井揭露的龙潭组关键金属矿层包括上、下 2 个分层 (累计 6.5 m 厚)，中间夹 0.2 m 粉砂岩。矿层以上为砂岩、泥岩夹薄煤层的含煤地层，矿层以下为砂岩、泥岩互层的非含煤地层。龙潭组基底为峨眉山玄武岩。ZK3 井自然伽马值变化在 0.72~2.70 API (平均 1.27 API)，在矿层位置表现为明显的高异常。纵波速度曲线和密度曲线数值分别变化在 2675~5392 m/s (平均 3824 m/s) 和 1.5~2.9 g/cm³ (平均 2.6 g/cm³)，它们在矿层位置特征不明显。利用自然伽马曲线重构后的纵波速度曲线数值变化在 2700~8949 m/s (平均 3890 m/s)。重构前后纵波速度曲线和密度曲线数值相乘，分别得到原始波阻抗和重构波阻抗曲线。相关性分析 (图 2) 表明，重构与原始波阻抗数值具有明显的正相关性 ($n=620$, $R=0.84$, 99% 置信度)，说明纵波速度曲线重构时参数选取合理、重构结果可靠。

代表性重构 ZK3 钻井岩性、矿层位置、自然

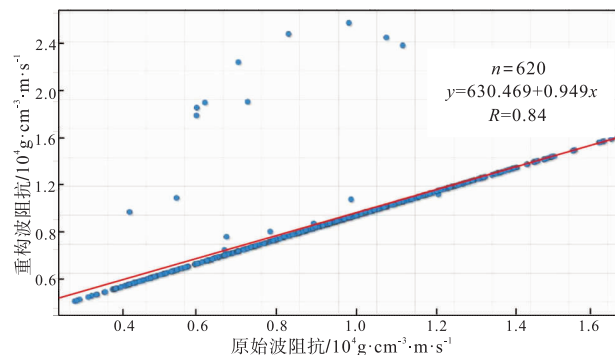


图 2 原始与重构波阻抗数据相关性图 (ZK3 井)

Fig. 2 Correlation between original and reconstructed wave impedance (Well ZK3)

伽马、纵波速度、密度、原始波阻抗及重构后的波阻抗如图 3 所示。与原始波阻抗曲线比较，重构后的波阻抗曲线变化幅度减小 (尤其是非矿层部分)，但原始曲线变化趋势和细节被较好保留 (图 3-a)。与原始波阻抗比较，计算后得到的重构波阻抗曲线矿层信号增强了 120%，显著提高了对矿层的识别精度。由图 3-b 和图 3-c 可以看出，重构前、后砂岩和泥岩的分界阈值均为 9600 g/cm³·m/s (即小于该阈值以泥质岩为主，大于该阈值以砂岩为主)，但重构前波阻抗数据难以识别矿层。比较而言，重构后的波阻抗可以较好识别关键金属矿层，其波阻抗数值主要分布在大于 16 000 g/cm³·m/s 的范围内。综上分析，砂岩与泥岩的分界值在波阻抗重构前后基本一致，说明加入关键金属矿层物性特征后没有掩盖原有纵波曲线特征。因此，利用重构后波阻抗数据进行地震剖面反演，可以有效地提高对关键金属矿层的识别能力。

3.2 波阻抗反演结果与分析

利用 ZK3 井原始和重构波阻抗数据对 #1 地震剖面反演 (图 4)，原始波阻抗反演剖面表现为多套砂岩和泥岩互层 (以 9600 g/cm³·m/s 为砂岩、泥岩阈值，图 4-a)，岩性反演结果 (黄色为砂质岩、绿色为泥质岩) 与测井解释结果吻合度较高，说明地震数据反演参数选择得当、波阻抗模型构建合理。在使用重构波阻抗数据反演得到的反演剖面上 (图 4-b)，矿层 (红色) 边界清晰、横向可追索性良好，说明利用重构后波阻抗数据进行地震剖面反演可以有效地识别矿层，并能对矿层空间展布规律进行追踪，达到了对矿层精细探测的目的。

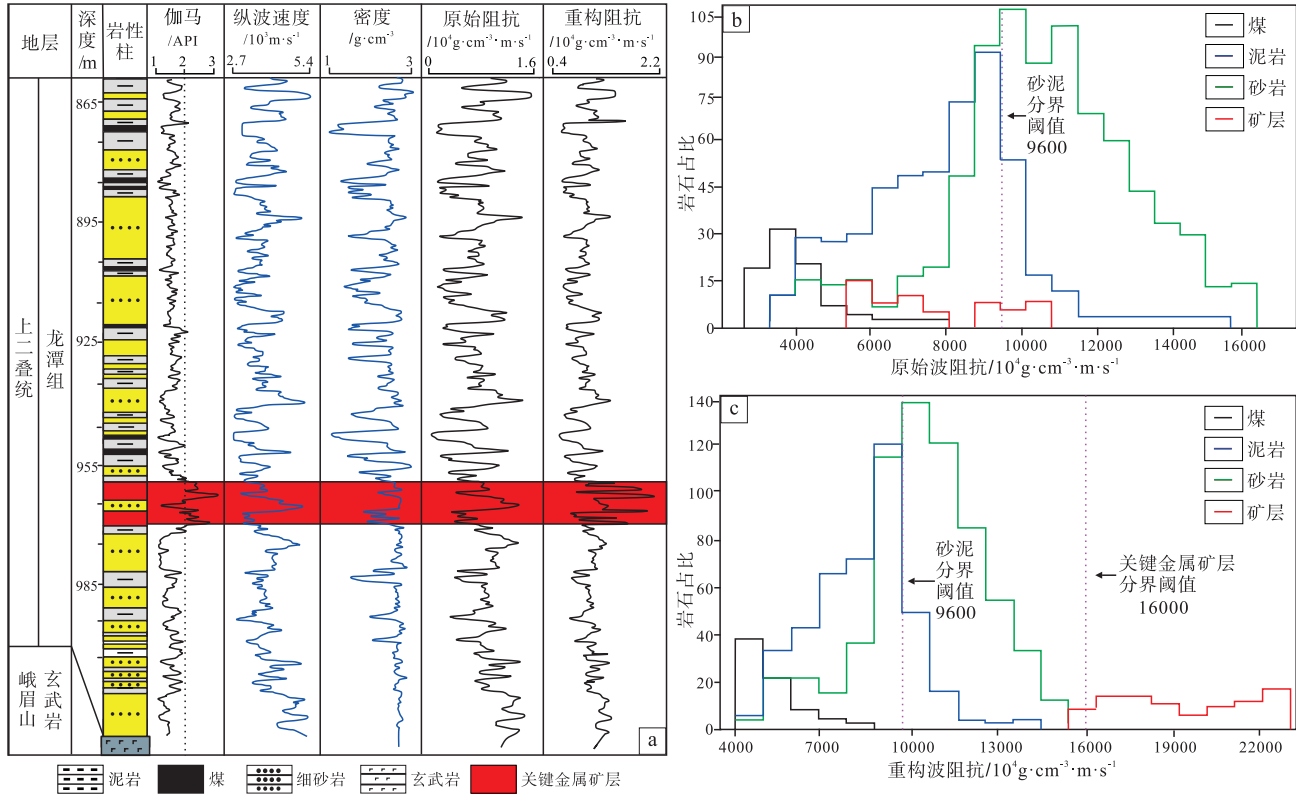
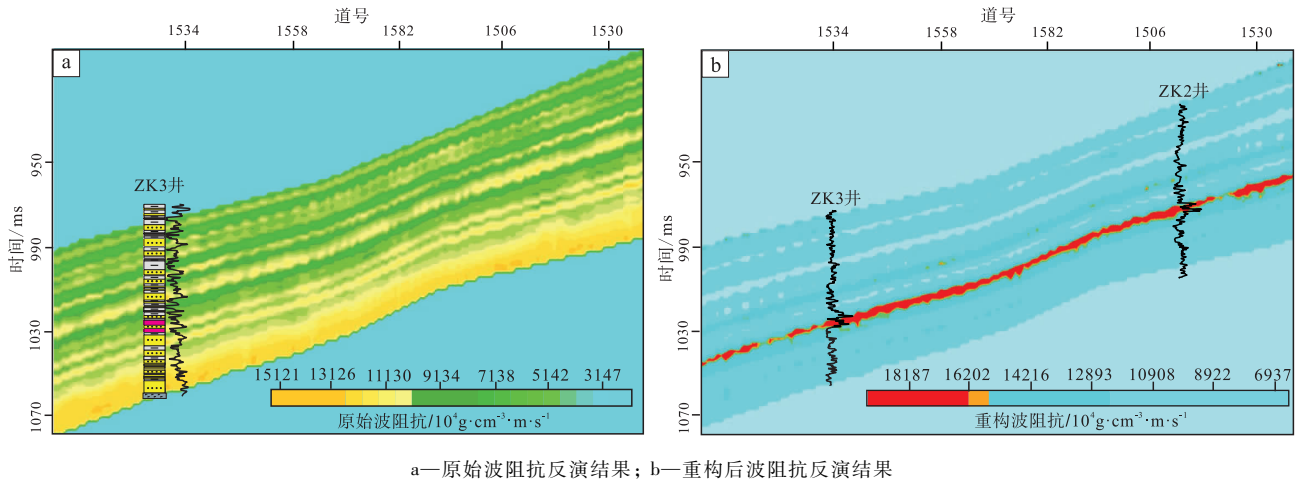


图 3 ZK3 井波阻抗曲线重构结果 (a) 及其对岩性/矿层识别对比图 (b-原始波阻抗识别结果; c-重构波阻抗识别结果)
 Fig. 3 Reconstruction results of Well ZK3 wave impedance curves (a) and its comparison chart in lithology/ore layer identification (b and c are original and reconstructed wave impedance identification respectively)



a—原始波阻抗反演结果; b—重构后波阻抗反演结果
 图 4 #1 地震剖面重构前后波阻抗反演结果对比图

Fig. 4 Comparison of wave impedance results before and after #1 seismic profile reconstruction

3.3 矿层平面分布预测与验证

对 3 条 (#1、#2 和 #3) 利用重构波阻抗数据反演的地震剖面, 进行矿层顶、底界面进行追踪, 获得了 3 条地震剖面上矿层顶、底面时间。然后利用时深转换, 将矿层顶、底面时间换算为顶、底深

度, 从而计算出矿层厚度并预测其分布范围。从利用这些数据预测的矿层厚度平面图(图 5) 可以看出, 矿层厚度一般介于 5.0~7.5 m 之间, 平均 6.0 m。平面上矿层呈透镜状, 在中西部最厚, 向东北和东南方向减薄。

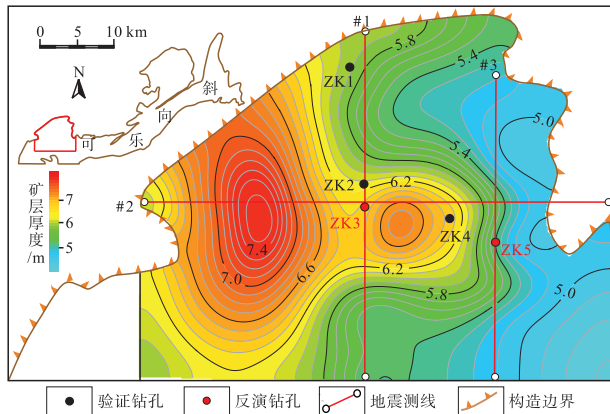


图 5 毕节可乐向斜西部关键金属矿层厚度地震反演预测图
Fig. 5 Prediction map of ore layer thickness by seismic inversion in western of Bijie Kele syncline

利用 ZK1、ZK2 与 ZK4 这三口钻井揭露的矿层厚度与反演厚度对比结果表明(表 1)，3 口井实际揭露矿层厚度分别为 7.2 m、5.4 m 和 7.7 m，而反演预测厚度分别为 5.9 m、6.3 m 和 6.4 m。误差分别为 -18.1%、+16.7% 和 -17.9%，说明论文建立的基于测井曲线重构和地震波阻抗反演的关键金属勘探技术，可以较可靠地对研究区关键金属矿层厚度进行探测。

表 1 矿层厚度地震反演预测误差统计
Table 1 prediction error of ore layer thickness by seismic inversion

钻孔号	钻孔揭露厚度/m	反演预测厚度/m	相对误差/%
ZK1	7.2	5.9	-18.1
ZK2	5.4	6.3	+16.7
ZK4	7.7	6.4	-17.9

4 成果与认识

1) 针对滇东—黔西龙潭组煤系底部 Nb-Zr-REY-Ga 关键金属矿层高 GR 异常特征，利用信息统计加权方法和矿层自然伽马数据重构了纵波速度曲线，使计算后得到的波阻抗曲线矿层信号增强 120%，将矿层约束在大于 $16\,000\text{ g/cm}^3 \cdot \text{m/s}$ 的重构后波阻抗曲线范围内，解决了利用波阻抗曲线识别研究区关键金属矿层的技术难题。

2) 矿层在利用重构波阻抗数据反演的地震剖面上边界清晰、横向可追索性良好。地震反演预测的矿层厚度经过钻井验证，矿层厚度预测误差介于

-18.1%~16.7% 之间，说明利用重构后波阻抗数据进行地震剖面反演可以有效识别和追踪矿层，达到了对矿层精细探测的目的。该技术方法体系对有测井异常的关键金属矿层精细勘探具有较好的应用价值。

参考文献 (References)

边晓,王雷,王喜军,杨敏芳,叶攀,祖清文,索金玲,邵龙义,鲁静. 2024. 基于自然伽马测井的煤系关键金属精细勘探技术. 地质学报,98(8): 2531-2540. [Bian X, Wang L, Wang X J, Yang M F, Ye P, Zu Y W, Suo J L, Shao L Y, Lu J. 2024. Fine exploration technology of critical metals ore beds in coal measures based on natural gamma-ray logging. Acta Geologica Sinica, 98(8): 2531-2540]

崔健,张星. 2008. 曲线重构反演在储层预测研究中的应用. 大庆石油地质与开发,27(3): 133-135. [Cui J, Zhang X. 2008. Application of curve rebuild inversion in reservoir prediction. Daqing Geology and Oilfield Development in Petroleum, 27(3): 133-135]

崔若飞,孙学凯,崔大尉. 2009. 基于地震反演方法的奥陶系顶部含隔水层探测. 岩石力学与工程学报,28(2): 319-323. [Cui R F, Sun X K, Cui D W. 2009. Detection of water-resisting layer in upper Ordovician system based seismic inversion method. Journal of Rock Mechanics and Engineering, 28(2): 319-323]

代世峰,刘池洋,赵蕾,刘晶晶,王西勃,任德盼. 2022. 煤系中战略性金属矿产资源: 意义和挑战. 煤炭学报,47(5): 1743-1749. [Dai S F, Liu C Y, Zhao L, Liu J J, Wang X B, Ren D Y. 2022. Strategic metal resources in coal measures: significance and challenges. Journal of China Coal Society, 47(5): 1743-1749]

管永伟,陈同俊,崔若飞,赵立明,彭刘亚. 2016. 声波阻抗反演识别陷落柱研究. 地球物理学进展,31(3): 1320-1326. [Guan Y W, Chen T J, Cui R F, Zhao L M, Peng L Y. 2016. Identification of collapse columns using acoustic impedance inversion. Progress in Geophysics, 31(3): 1320-1326]

侯增谦,陈骏,翟明国. 2020. 战略性关键矿产研究现状与科学前沿. 科学通报,65(33): 3651-3652. [Hou Z Q, Chen J, Zhai M G. 2020. Current status and frontier of research on critical minerals. Chinese Science Bulletin, 65(33): 3651-3652]

梁建刚,秦喜林,匡海阳,孙大鹏,魏剑平,陈龙. 2023. 自然伽马曲线重构波阻抗反演在勘探含铀有利成矿砂体中的尝试. 中国地质,50(2): 347-358. [Liang J G, Qin X L, Kuang H Y, Sun D P, Wei J P, Chen L. 2023. An attempts to find favorable uranium-bearing ore-forming sand bodies by reconstruction wave impedance inversion using natural gamma curve. China Geology, 50(2): 347-358]

魏强,代世峰. 2020. 中国煤型锗矿床中的关键金属和有害元素: 赋存特征与富集成因. 煤炭学报,45(1): 296-303. [Wei Q, Dai S F. 2020. Critical metals and hazardous elements in the coal-hosted germanium deposits of China: occurrence characteristics and enrichment causes. Journal of China Coal Society, 45(1): 296-303]

王俊瑞,梁力文,邓强,田盼盼,谭伟雄. 2016. 基于多元回归模型重

- 构测井曲线的方法研究及应用. 岩性油气藏, 28(3): 113-120. [Wang J R, Liang L W, Deng Q, Tian P P, Tan W X. 2016. Research and application of log reconstruction based on multiple regression model. *Lithologic Reservoirs*, 28(3): 113-120]
- 韦瑜, 陈同俊, 江晓雨, 崔若飞. 2017. 基于褶积模型的地震反演方法在煤田地质勘探中的应用. 地球物理学进展, 32(3): 1258-1265. [Wei Y, Chen T J, Jiang X Y, Cui R F. 2017. Application of seismic inversion based on convolution model in coalfield geological exploration. *Progress in Geophysics*, 32(3): 1258-1265]
- 翟明国, 吴福元, 胡瑞忠, 蒋少涌, 李文昌, 王汝成, 王登红, 齐涛, 秦克章, 温汉捷. 2019. 战略性关键金属矿产资源: 现状与问题. 中国科学基金, 33(2): 106-111. [Zhai M G, Wu F Y, Hu R Z, Jiang S Y, Li W C, Wang R C, Wang D H, Qi T, Qin K Z, Wen H J. 2019. Critical metal mineral resources: current research status and scientific issues. *Natural Science Foundation of China*, 33(2): 106-111]
- 张明川, 杨文强, 崔若飞. 2016. 基于地震反演方法的太原组灰岩含水量预测. 地球物理学进展, 31(3): 1289-1294. [Zhang M C, Yang W Q, Cui R F. 2016. Prediction of Taiyuan Formation limestones water-bearing based on seismic inversion method. *Progress in Geophysics*, 31(3): 1289-1294]
- 朱国军. 2017. 声波曲线重构技术在储层预测中的应用. 物探化探计算技术, 39(3): 383-387. [Zhu G J. 2017. Application of acoustic curve reconstruction in reservoir prediction. *Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration*, 39(3): 383-387]
- Dai S F, Zhou Y, Zhang M, Wang X, Wang J, Song X, Jiang Y, Luo Y, Song Z, Yang Z, Ren D. 2010. A new type of Nb(Ta)-Zr(Hf)-ree-ga polymetallic deposit in the late permian coal-bearing strata, eastern Yunnan, southwestern China: possible economic significance and genetic implications. *International Journal of Coal Geology*, 83(1): 55-63.
- Dai S F, Zhao L, Wang N, Wei Q, Liu J J. 2024. Advance and prospect of researches on the mineralization of critical elements in coal-bearing sequences. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 43(1): 49-63.
- Lelièvre, Oldenburg. 2009. A comprehensive study of including structural orientation information in geophysical inversions. *Geophysical Journal International*, 178(2): 623-637.
- Sun B L, Zeng F G, Moore, Rodrigues, Liu C, Wang G Q. 2022a. Geochemistry of two high-lithium content coal seams, Shanxi Province, China. *International Journal of Coal Geology*, 260: 104059.
- Sun B L, Liu Y X, Tajemanova, Liu C, Wu J. 2022b. In-situ analysis of the lithium occurrence in the No. 11 coal from the Antaibao mining district, Ningwu Coalfield, northern China. *Ore Geology Reviews*, 144: 104825.
- Sun B L, Kong Y L, Wang G Q, Liu C, Tobechukwu. 2022c. Convergence and its mechanism of lithium isotopic composition with different occurrence states in Li-rich anthracite. *Journal of Coal Society*, 47(5): 1773-1781.
- Wang X T, Shao L Y, Eriksson, Yan Z, Wang J, Li H, Zhou R, Lu J. 2020. Evolution of a plume-influenced source-to-sink system; an example from the coupled central Emeishan large igneous province and adjacent western Yangtze Cratonic basin in the Late Permian, SW China. *Earth-Science Reviews*, 207: 103224.
- Wang N, Dai S F, Nechaev, French, Graham, Zhao F H, Zuo J P. 2022a. Isotopes of carbon and oxygen of siderite and their genetic indications for the late Permian critical-metal tuffaceous deposits (Nb-Zr-Rey-Ga) from Yunnan, southwestern China. *Chemical Geology*, 592: 120727.
- Wang N, Dai S F, Wang X, Nechaev, French, Graham, Zhao L, Song X. 2022b. New insights into the origin of middle to late Permian volcanoclastics (Nb-Zr-REY-Ga-rich horizons) from eastern Yunnan, SW China. *Lithos*, 420: 106702.
- Zhang H, Wu W, Song X. 2024. Well logs reconstruction based on deep learning technology. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 21(1): 1-5.
- Zhao L X, Dai S F, Graham I T, Li X, Zhang B. 2016. New insights into the lowest xuanwei formation in eastern Yunnan Province, SW China: implications for Emeishan large igneous province felsic tuff deposition and the cause of the end-guadalupian mass extinction. *Lithos*, 264: 375-391.
- Zhao L X, Dai S F, Graham I T, Li X, Liu H, Song X, Hower J C, Zhou Y. 2017. Cryptic sediment-hosted critical element mineralization from eastern Yunnan Province, southwestern China: mineralogy, geochemistry, relationship to Emeishan alkaline magmatism and possible origin. *Ore Geology Reviews*, 80: 116-140.

(责任编辑 郑秀娟; 英文审校 陈吉涛)