

doi: 10.12029/gc20200116002

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[J]. 中国地质, 50(2): 347–358.

Liang Jianguang, Qin Xilin, Kuang Haiyang, Sun Dapeng, Wei Jianping, Chen Long. 2023. An attempt to find favorable uranium-bearing sand bodies by reconstructed wave impedance inversion using natural gamma curve[J]. *Geology in China*, 50(2): 347–358(in Chinese with English abstract).

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

梁建刚^{1,2}, 秦喜林³, 匡海阳^{1,2}, 孙大鹏^{1,2}, 魏剑平⁴, 陈龙⁵

(1. 中国地质调查局天津地质调查中心, 天津 300170; 2. 中国地质调查局铀等能源地质重点实验室, 天津 300170; 3. 油气资源与勘探技术教育部重点实验室(长江大学), 湖北 武汉 430100; 4. 山西省地球物理化学勘查院, 山西 运城 044000; 5. 北京多分量地震技术研究院, 北京 100002)

摘要:【研究目的】在砂岩型铀矿勘查中, 利用地震工作手段及传统波阻抗反演, 可有效地区分砂、泥岩, 却受限于波阻抗差异微小无法区分砂岩中是否含铀。【研究方法】为了寻找含铀有利砂体, 本次工作尝试了利用对含铀最为敏感的自然伽马曲线联合声波曲线重构波阻抗, 以提高反演结果对储层含铀信息的甄别能力, 弥补传统波阻抗反演对含铀砂体和非含铀砂体无差异地球物理响应的缺陷。【研究结果】经多个钻探实例验证, 该方法确实有效增强了波阻抗反演对岩层属性的描述能力, 缩小找矿范围, 提高了钻探验证见矿率。【结论】自然伽马曲线重构波阻抗值得在利用石油资料二次开发的砂岩型铀矿勘查中推广。

关键词:敏感性; 波阻抗重构; 含铀有利砂体; 自然伽马曲线; 矿产勘查工程

创 新 点: 利用对含铀最为敏感的自然伽马曲线联合声波曲线重构波阻抗, 弥补传统波阻抗反演对含铀砂体和非含铀砂体无差异地球物理响应的缺陷, 可提高石油资料二次开发寻找铀矿的利用率。

中图分类号: P631.44 文献标志码: A 文章编号: 1000–3657(2023)02–0347–12

An attempt to find favorable uranium-bearing sand bodies by reconstructed wave impedance inversion using natural gamma curve

LIANG Jianguang^{1,2}, QIN Xilin³, KUANG Haiyang^{1,2}, SUN Dapeng^{1,2}, WEI Jianping⁴, CHEN Long⁵

(1. Tianjin Center, China Geological Survey, Tianjin 300170, China; 2. Key Laboratory of Uranium and Other Energy Geology, China Geological Survey, Tianjin 300170, China; 3. Key Laboratory of Exploration Technologies for Oil and Gas Resources, Ministry of Education (Yangtze University), Wuhan 430100, Hubei, China; 4. Geophysical and Chemical Exploration Institute of Shanxi Province, Yuncheng 044000, Shanxi, China; 5. Beijing Institute of Multicomponent Seismology, Beijing 100002, China)

收稿日期: 2020–01–16; 改回日期: 2020–11–17

基金项目: 中国地质调查局项目“油气田勘查区砂岩型铀矿调查与勘查示范”(DD20170128–08)资助。

作者简介: 梁建刚, 男, 1980 年生, 正高级工程师, 主要从事航磁异常查证和铀矿勘查; E-mail: liangjianguang1980@163.com。

通讯作者: 秦喜林, 男, 1988 年生, 讲师, 主要从事地震储层预测和岩石物理研究工作; E-mail: xlq_2016@outlook.com。

Abstract: This paper is the result of mineral exploration engineering.

[Objective] During the exploration of sandstone-type uranium deposits, the seismic exploration and traditional wave impedance inversion can effectively distinguish sandstone and mudstone, whereas the small difference of wave impedance cannot distinguish whether the sandstone contains uranium. **[Methods]** In order to find favorable uranium-bearing sand bodies, this paper attempts to reconstruct wave impedance by combining acoustic curve with natural gamma curve, which is most sensitive to uranium ore bodies, so as to improve the inversion ability to uranium-bearing reservoir stratum. This work can make up for the defect that the traditional impedance inversion has no significant geophysical difference of uranium-bearing sand bodies and barren sand bodies. **[Results]** It has been verified by several drilling cases, and this method effectively enhances the describing ability of rock properties with wave impedance inversion. It also effectively reduces the scope of prospecting and improves the ore finding rate of drilling verification. **[Conclusions]** Reconstructed wave impedance inversion using natural gamma curve is worthy to be popularized in the exploration of sandstone-type uranium deposits by using petroleum data.

Key words: susceptibility; wave impedance reconstruction; favorable uranium-bearing sand bodies; natural gamma curve; mineral exploration engineering

Highlights: The reconstruction of wave impedance using natural gamma curves combined with acoustic curves, which are the most sensitive to mineral deposits, compensates for the shortcomings of traditional wave impedance inversion in terms of indistinguishable geophysical responses to uranium bearing and non uranium bearing sand bodies. It can improve the utilization rate of secondary development of petroleum data for searching for uranium deposits.

About the first author: LIANG Jiangang, male, born in 1980, professor of engineering, mainly engaged in aeromagnetic anomaly verification and uranium exploration; E-mail: liangjiangang1980@163.com.

About the corresponding author: QIN Xilin, male, born in 1988, lecturer, mainly engaged in seismic reservoir prediction and petrophysical research; E-mail: xlq_2016@outlook.com.

Fund Support: Supported by the project of China Geological Survey (No.DD20170128-08).

1 引 言

砂岩型铀矿凭借大矿量、低成本、开采污染小等优势,现已成为中国铀资源量增长最快和占有铀资源量最大的铀矿床类型。作为外生后成铀矿床,砂岩型铀矿床主要产于陆块(地台)或中间地块上的大中型自流盆地以及造山带山间盆地的陆相、海陆交互相沉积岩中,其中以河流相和三角洲相沉积最为重要。产铀砂岩的时代主要是中—新生代,少数为中元古代和新古生代。

当前,中国铀矿勘探的主攻方向是北方中新生代沉积盆地(Ma et al., 2016; Jin et al., 2016, 2020),找矿主要类型为可地浸砂岩型,2012年以来,中国地质调查局天津地质调查中心利用油田钻孔资料和测井资料的二次开发技术在松辽盆地北部大庆长垣南端四方台组地层中首次发现工业铀矿体。同时在成矿地质背景较好,但缺少石油钻孔及地震资料的区域布置了二维地震剖面工作,试图进一步扩大找矿范围。

本次二维地震工作通过传统波阻抗反演,统一了工作区的层位划定,圈定了砂体,达到了地震勘

探的第一步预期目标。当然,人们对地震勘探成果的要求越来越高,不但从层位划分、构造解释提高到岩性反演,更对岩性属性反演越来越精细(郝亚炬等, 2015; 李金磊和尹正武, 2015; 顾维力等, 2017)。铀矿的工业品位为万分之一数量级,除放射性测井外,其他地球物理特性如密度、声波速度等很难有明显的差异(蔡伟祥等, 2016)。为此,常规测井约束波阻抗反演难以反映储层是否含铀矿这一变化规律,从而如何突出储层含铀成为一项亟待解决的储层反演问题。

在以寻找含油储层为目标的石油部门,通常借助测井曲线重构手段来克服复杂储层预测(朱国军, 2017; 朱凌霄等, 2018)。本文将测井曲线重构的思想引入到寻找铀矿的实践中,通过对大庆长垣南端大量油田钻孔测井曲线开展敏感性分析,选用自然伽马曲线与声波曲线重构波阻抗曲线,开展波阻抗反演。

反演结果选定的多处含铀有利砂体得到钻孔验证,效果良好。这种通过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,值得利用石油资料二次开发的砂岩型铀矿勘查中推广。

2 测井曲线重构技术

波阻抗曲线重构是利用储层对不同的物理参数的响应差异,选取对地层和岩性变化敏感的自然电位、自然伽玛等测井曲线构建具有阻抗量纲的新曲线。重构后的曲线结合了阻抗的低频信息,所以它既能反映地层速度和波阻抗的变化,又能反映岩性的细微差异(宋梅远,2014;蒋振会和齐颖,2016)。

因此,波阻抗曲线重构技术的第一步就是敏感性曲线选取,通常是经交会分析实现,即在对目标层段各个井曲线资料物性统计分析的基础上,得出目标体最为敏感的曲线类型;第二步为将上述选定的敏感性曲线与声波曲线相融合,得到具有波阻抗量纲的拟声波曲线。

因为该拟声波曲线融合了地震、地质、钻井等资料,充分结合地震资料横向连续性好及测井资料纵向分辨率高的特征,从而扩展丰富了地震资料的低频信息,最终反演获取高精度的波阻抗数据体,对储层的描述精度得到显著提升。

曲线重构技术就是以岩石物理特征为基础,当声波曲线不能有效识别研究对象和地质目标时,针对具体的地震地质难题,借助自然伽玛、自然电位和电阻率等响应特征明显的测井曲线,通过一定的数学手段和技巧重构一条反映储层地球物理特征的“拟声波”曲线,用于测井约束反演。利用这些能直观的反映地层岩性特征的非速度类曲线,可以在速度类测井曲线中加入一些地层的岩性信息,以突出储层与围岩之间的速度差异,提高地震反演的分辨率,从而显著提高波阻抗反演对储层描述的能力。

具体实现过程,通常有三种方式:(1)利用Faust公式,利用法斯特(Faust)公式将电阻率近似的转变为声波测井曲线(陈钢花和王永刚,2005),或者根据Gardner密度和声波之间的经验公式计算声波时差(陈志德等,2015),本质上都是经验公式或者统计拟合;(2)依据特定的权值分别将其他特征曲线加入到声波曲线中以拟合得到重构后声波曲线,从而突出原始声波时差无法响应的地层岩性(马光克等,2013;王俊瑞,2016),本质上是信息统计加权;(3)通过采用小波变换技术,在不同频率段对相应层进行区域特征选择,最终实现对增强目标地质体的小波变换重构技术(宋维琪和陈伟,2009;赵继龙

等,2013)。

本文就是尝试将石油部门已相对成熟的曲线重构技术用于寻找含铀有利砂体。实现方法上考虑上述方法各自的优缺点,如需要原曲线与重构曲线之间的关系,如陈钢花和王永刚(2005)利用Faust公式将电阻率曲线拟合声波曲线,其基础是馆陶组电阻率与声波曲线具有良好的统计关系,并不适用于所有地层,因为声波曲线和电阻率曲线除了受岩性影响之外,岩层中的流体对电阻率的影响比对声波的影响更大。结合铀矿的特殊点及敏感曲线交会分析的结果,本文采用上述第二种,即信息加权法。

3 应用实例

3.1 研究区地质特征

砂岩型铀矿床为外生后成铀矿床,主要产于陆块(地台)或中间地块上的大中型自流盆地以及造山带山间盆地的陆相、海陆交互相沉积岩中(张岳桥和廖昌珍,2006;张向涛等,2017;赵岳等,2018)。

松辽盆地是一个以渗入型为主的自流水盆地,盆地周边含铀花岗岩系为区域含矿提供物源(Boekhout et al., 2015);盆地内沉积时间长、厚度大、构造相对稳定,油气保存较完好,地层富含有机质碎屑,形成层间氧化带十分有利;西斜坡、大庆长垣、朝长等斜坡及天窗构造,具有良好的构造条件(Jin et al., 2022);盆地冲泛平原相、河湖交互相带发育,嫩江组和青山口组发育区域性分布的大套泥岩,可作为隔水层,泥-砂-泥体系配置较好,形成良好的存储条件。综上所述,生、储、运、盖条件具备,找矿潜力巨大。

盆地内四方台组与下覆嫩江组为不整合接触,含铀砂体主要在上白垩统四方台组底部的砂层,为白垩纪辫状河沉积的产物,是本区寻找砂岩型铀矿的主要目的层(金若时等,2017;冯晓曦等,2017;刘华健等,2017,2018)。

2015年以来,中国地质调查局天津地质调查中心对石油部门测井资料,开展了二次开发,排查了近十万口井,发现大量放射性异常孔,钻若干工业孔(汤超等,2018;陈路路等,2022)。在此基础上开展地球物理勘查。

其中D00线最初施工5D901-1、5D901-2、5D901-3共3个钻孔,其中5D901-1、5D901-3为工

业孔,5D901-2为矿化孔,为进一步追踪含矿层,沿三孔连线方向布设二维地震探勘剖面5 km,施工参数:可控震源中间激发,两边各80道接收,道间距10 m(795-5-10-5-795)、炮间距20 m、覆盖次数40次,采样间隔0.5 ms、记录长度2 s,检波器频率60 Hz。

3.2 含矿砂体的地球物理特征

经过对工作区已有钻孔编录及测井成果的分析,区内砂岩型铀矿主要岩性为粉细砂岩—粗砂岩,单层厚度6~21 m,其间内部泥岩隔层厚度6~14 m;砂岩声波时差429 $\mu\text{s}/\text{m}$,换算成速度为2330 m/s;隔层泥岩声波时差632 $\mu\text{s}/\text{m}$,换算成速度为1580 m/s;砂、泥岩速度差750 m/s,比例达到32%,砂、泥岩速度差异明显,在密度相差不大的情况下,砂、泥岩界面具有较大的波阻抗差异,具备了利用地震勘探区分砂、泥岩的地球物理基础。

地震剖面上,古河道主要表现为底部下凹、顶部稍凸、两端逐渐尖灭,内部反射为变振幅、连续性差,有顶超、底超、反射终止等不协调现象;在河床底部及两岸为强振幅、相位清晰、频率变化大等特征。据此,在砂岩型铀矿勘查中,地震勘探利用泥岩、砂岩界面的波阻抗差异,查明砂体展布,圈定古河道,解决储层问题,成为了重要的技术手段。

解决完储层问题,接下来的问题是要区分含矿与非含矿问题。

砂岩型铀矿品位一般为万分之一,不足以在密度和波速上引起明显异常,这决定了传统地震解释是无法判定所圈定的砂体是否含矿,应该配合地面放射性测量工作。

但是,本区第四纪覆盖及泰康、明水组含水层阻碍了深部放射性物质到达向上穿透,地面高精度能普测量无异常,只能依赖测井数据进行波阻抗重构反演。

3.3 测井曲线重构

3.3.1 测井曲线标准化

研究区内面积大,钻井数量庞大,且时间跨度大,从20世纪60年代到本世纪初,行业部门较多,有石油部门针对油气的勘探井、开采井的深钻,有核工业部门针对铀矿的浅井,测井目的不同,曲线组合和质量控制要求参差不齐。加之测井仪器不断更新和数据基值等因素影响,井与井之间曲线还存在着较大的系统误差。为此,使用测井曲线之前,需要开展异常点

剔除、归一化等预处理及曲线标准化。

(1)异常点剔除

井壁不规则处,仪器碰撞、遇卡等原因致使测井曲线值出现异常或跳动,而不反映地层实际情况。对这些不正常的部分应该进行编辑,人为进行修正。

(2)测井曲线归一化处理

测井曲线归一化目的是消除不同时间和不同仪器的测量导致的系统误差,使研究区域内不同井、不同层系的同种曲线横向上具有一定的可对比性,同一层位、同一岩性具有相近的测井响应特征值,能用同一解释模式和相同的解释标准进行有效解释。从而保证测井-地震联合储层参数研究具有较好的一致性和可对比性。

(3)测井曲线标准化处理

测井曲线标准化处理包括2方面:一是修复异常值用以解决单井中因井况造成的偏差。二是多井之间测井曲线标准化处理:通过求取各井目的层段各测井曲线的平均值及标准方差,把所有井目的层段曲线的标准方差和平均值使用公式分别调整为同一个数值(统计出的井数较多的中间值)。

$$Q_{\text{归一化}} = Q_{\text{原}} / (Q_{\text{原max}} - Q_{\text{原min}})$$

其中, $Q_{\text{归一化}}$ 为归一化后的曲线, $Q_{\text{原}}$ 为原测井曲线, $Q_{\text{原max}}$ 原测井曲线最大值, $Q_{\text{原min}}$ 原测井曲线最小值。

3.3.2 敏感性曲线标选取

测井数据从不同角度反映同一岩石的物理性质,因此各条测井曲线之间存在相关性和差异性。相关性表明了岩石物理性质的内在联系,差异性反映了观测角度的不同。

研究区目的层段主要岩性为砂泥岩,其中主要含矿目的层为含铀砂岩,直接采用声波曲线进行约束反演难以有效识别出含铀砂岩。对研究区内井曲线进行必要的岩性速度特征分析以确定相关敏感曲线是曲线精确重构的基础。

在对目标层段井曲线资料物性统计分析的基础上,经过对目的层段各测井曲线进行敏感性分析(图1),发现GR(自然伽玛)对含铀层识别最好(重叠部分较少),AC(声波)能识别高速砂岩与低速泥岩,SP(自然电位)、RT(电阻率)、DEN(密度)对砂泥岩的识别均有较大过渡带。AC识别砂岩、泥岩很

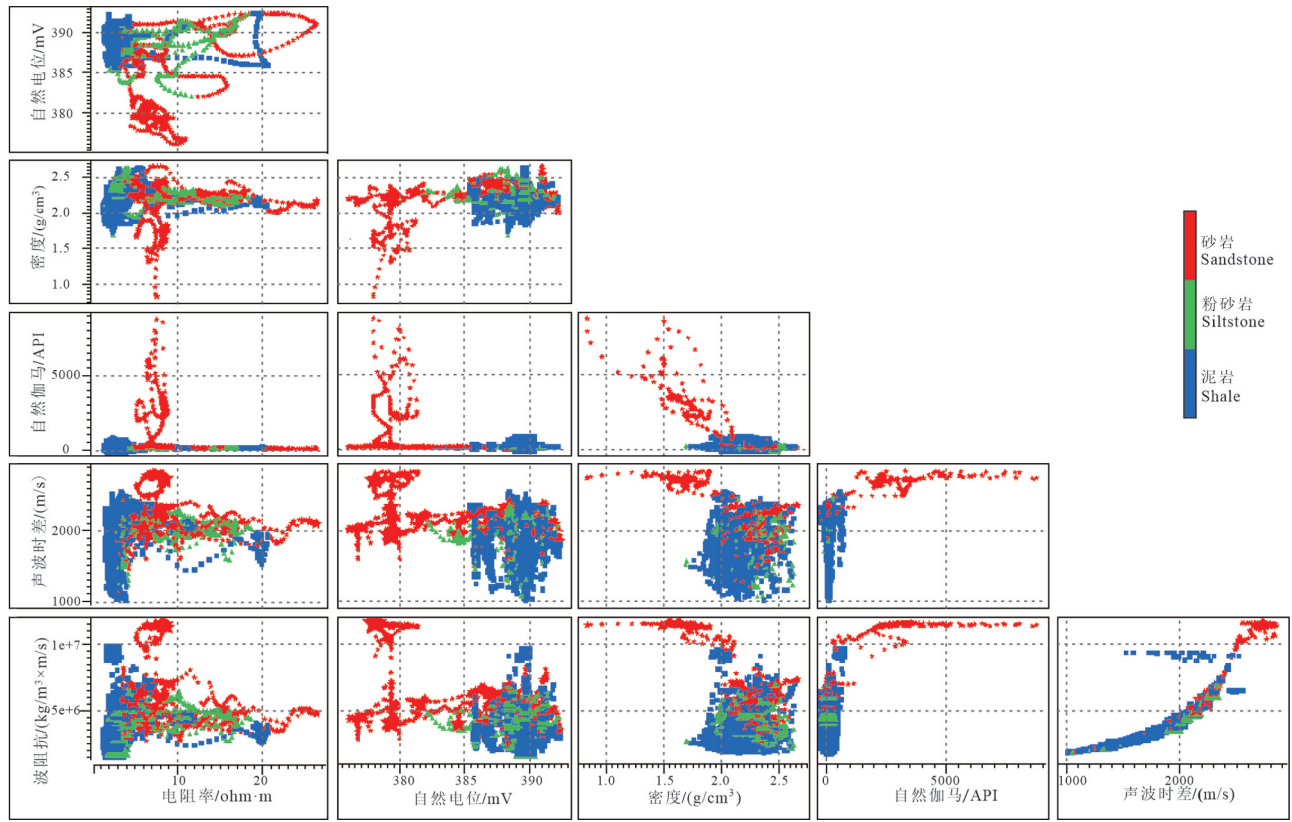


图1 测井曲线与岩性敏感性分析
Fig.1 Sensitivity analysis of log curve and lithology

敏感,GR区分含铀层、非含铀敏感。

为此,本次采用GR曲线重构波阻抗曲线。

3.3.3 波阻抗重构

为了寻找含铀有利砂体,运用GR曲线对声波曲线进行重构,发挥声波曲线和GR曲线各自的特点,即将声波曲线中原有的趋势特征加强,并保留其细节变化,然后用于反演处理,相当于在反演处理过程中加强了地质、测井信息的参与,有效提高反演结果对储层的地质表现能力。

GR曲线含铀异常特征的重构步骤如下:(1)GR曲线正常砂泥岩归一化;(2)GR曲线含铀异常门槛确立,并求含铀异常指数曲线;(3)对声波曲线进行高、低频分离,并最终得到声波曲线的高低频幅度差;(4)用声波曲线的高低频幅度差对含铀异常指数曲线进行幅度标准化(公式(1));(5)进行特征曲线重构,得到重构曲线(公式(3)):

$$GH = ((GR - GR_{\min砂}) / (GR_{\max泥} - GR_{\min砂})) / G \quad (1)$$

$$V_H = ((GH - GH_{\min}) / (GH_{\max} - GH_{\min}) + 1) \times C \quad (2)$$

$$DT_{GR} = DT_f + B \times V_H \quad (3)$$

其中,GH为含铀异常指数,GR为自然伽马,GR_{min砂}、GR_{max泥}分别为正常砂岩和泥岩的自然伽马,G为含铀异常倍数门槛值,V_H为声波幅度标准化含铀异常指数,GH_{max}、GH_{min}分别为砂岩含铀异常指数最大值、最小值,C为原声波高低频幅差,DT_{GR}为重构曲线,DT_f为低频声波曲线,B为经验系数,B值的取范围(0~1),取值原则为让重构波阻抗足以反映加入的物性特征又不至于淹没原有声波曲线特征,并根据反演结果修改B值再重新反演,再修改,直到取得真实客观的反演结果。

重构波阻抗曲线将原有声波曲线中的趋势特征加强,并保留其细节变化,然后用于反演处理,相当于在反演处理过程中加强了自然伽马信息的参与,可以有效提高反演结果对储层含铀信息的甄别能力(图2)。

传统波阻抗反演根据研究区内铀储层在自然伽马拟声波波阻抗曲线上的表现特征(图3),经交汇分析,提取门槛值,砂岩波阻抗的门槛值为4.835×10⁶ kg/m³·m/s,含铀砂岩波阻抗的门槛值为8.035×

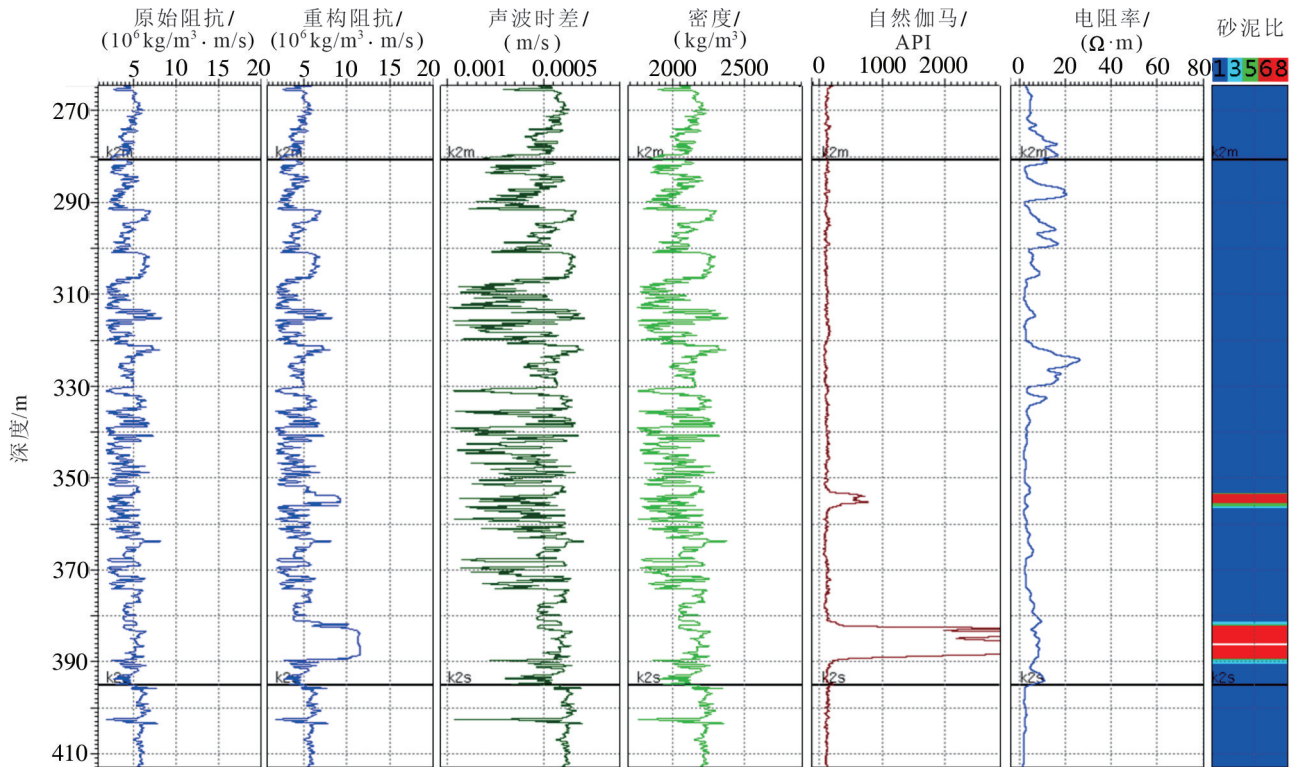


图2 5D901-1井测井曲线重构前后对比

Fig.2 Comparison of well 5D901-1 logging curve before and after reconstruction

$10^6 \text{ kg/m}^3 \cdot \text{m/s}$ (杨振峰等, 2014; 王伟等, 2017; 余为维等, 2019)。

3.4 波阻抗反演

3.4.1 合成地震记录

对合成的地震记录进行精细的地震地质标定是提高反演质量的关键。标定过程中纵向上精细

标定每口井从井旁地震道提取目的层子波, 以波形、相位、能量特征相近为准则, 精细调整得到良好吻合的合成记录。横向上多井合成记录综合调整。通过多井标定结果分析可知, 负极性子波合成记录在波组特征与相关系数上要优于正极性子波的合成结果, 因此选择负极性子波进行标定及后续

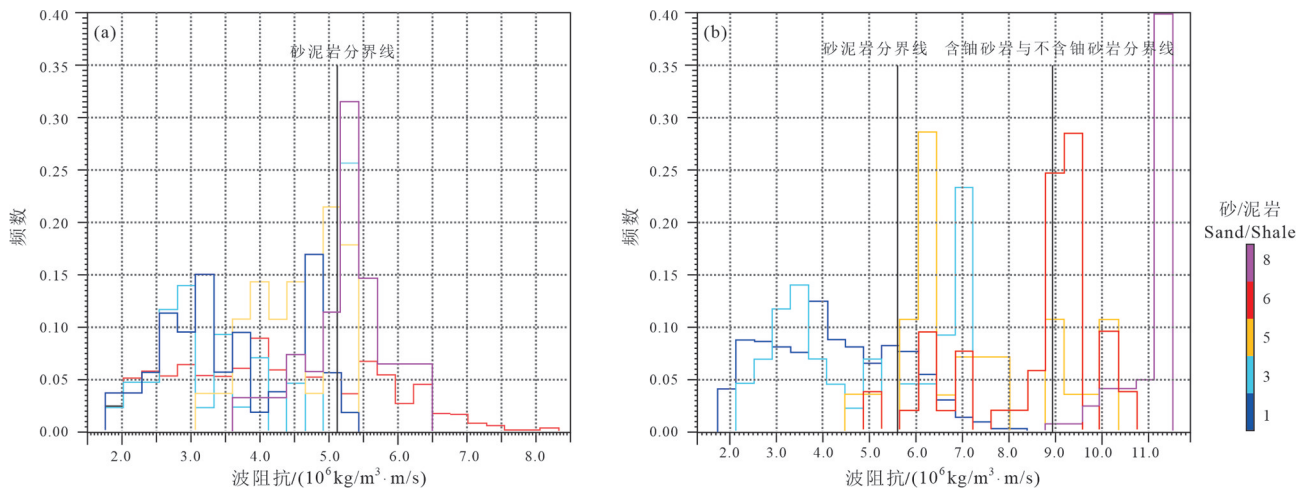


图3 传统波阻抗反演(a)与GR曲线重构阻抗反演(b)分选对比

Fig.3 Sorting comparison of inversion between traditional wave impedance (a) and GR curve reconstruction impedance (b)

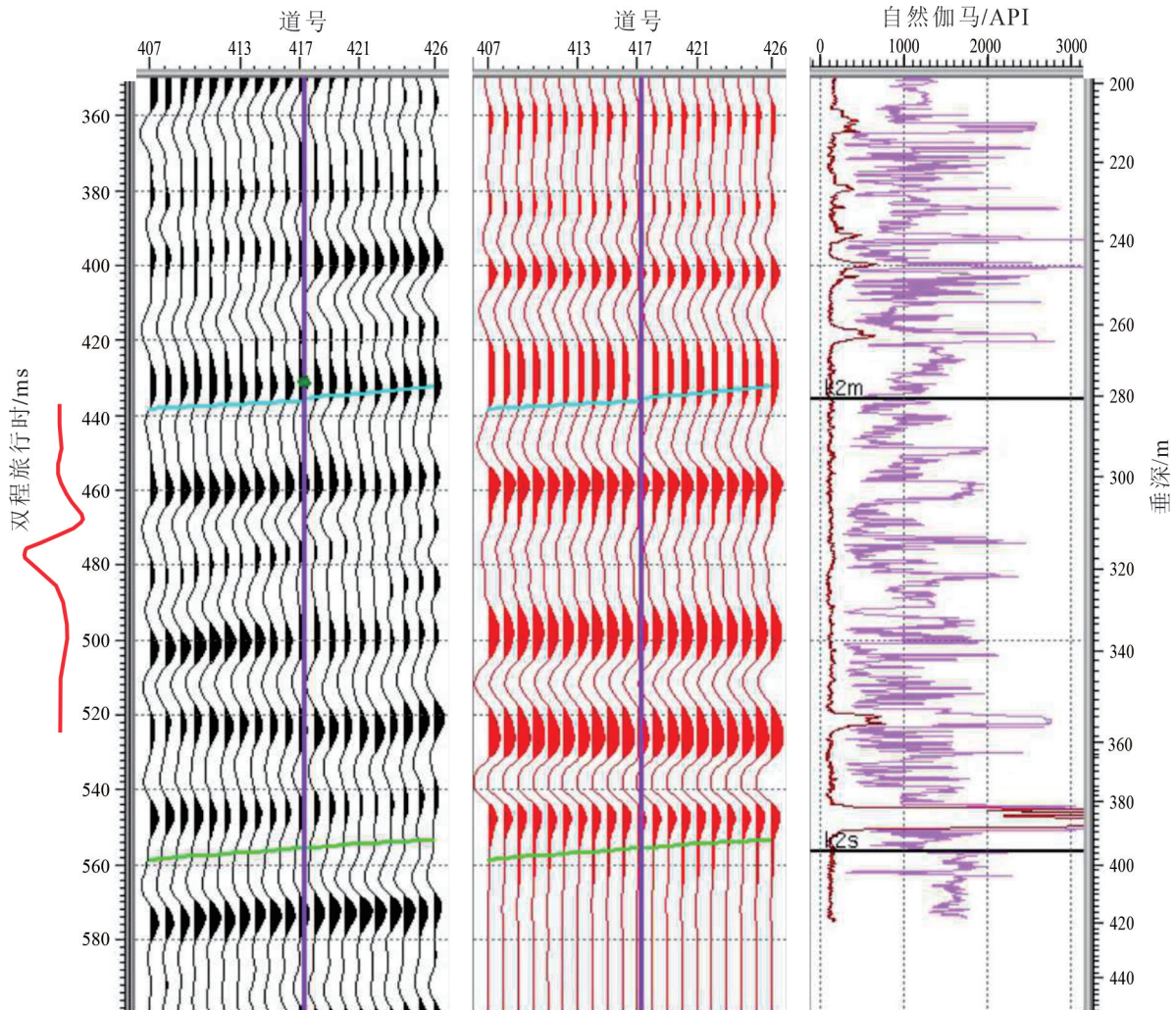


图4 单井合成地震记录

Fig.4 Synthetic seismogram of single well

反演。

人工合成地震记录的波形特征与井旁地震时间剖面特征符合程度较高,时间-深度相互关系明确(图4)。

3.4.2 波阻抗模型建立

为了达到良好的测井约束反演效果,必须在波阻抗模型的建立过程中,每一个环节都精益求精。最重要的两点是地层模式框架和速度内插方式,其中地层模式框架包括层位与层位、断层与层位、断层与断层的组合接触关系,这主要依靠测井资料和钻孔编录,尤其要认定工作区对地层划分最可靠的测井曲线,如本区是电阻率曲线;而速度内插方式则主要依赖于测井数据空间与地震时间剖面两个

域之间的对应关系,力争建立一个平滑、闭合精细的地质层位及目的层波阻抗模型(陈祖银,2014)。

3.4.3 井约束反演

在地质模型的指导下,利用宽带约束的全局寻优快速反演算法进行反演,对初始地质模型进行反复的迭代修正,得到高分辨率、过渡自然、与井吻合度高的波阻抗反演结果。利用反演钻井波阻抗分析获得泥岩、砂岩、储层砂岩的识别门槛,在高分辨率反演剖面中,对目的层进行储层识别。

3.4.4 钻探验证效果

按照传统波阻抗反演得到剖面波阻抗数据体(图5):从图中可以看到,根据 $5.2 \times 10^6 \text{ kg/m}^3 \cdot \text{m/s}$ 的门槛值划分砂、泥岩,剖面图上存在多组砂泥岩交

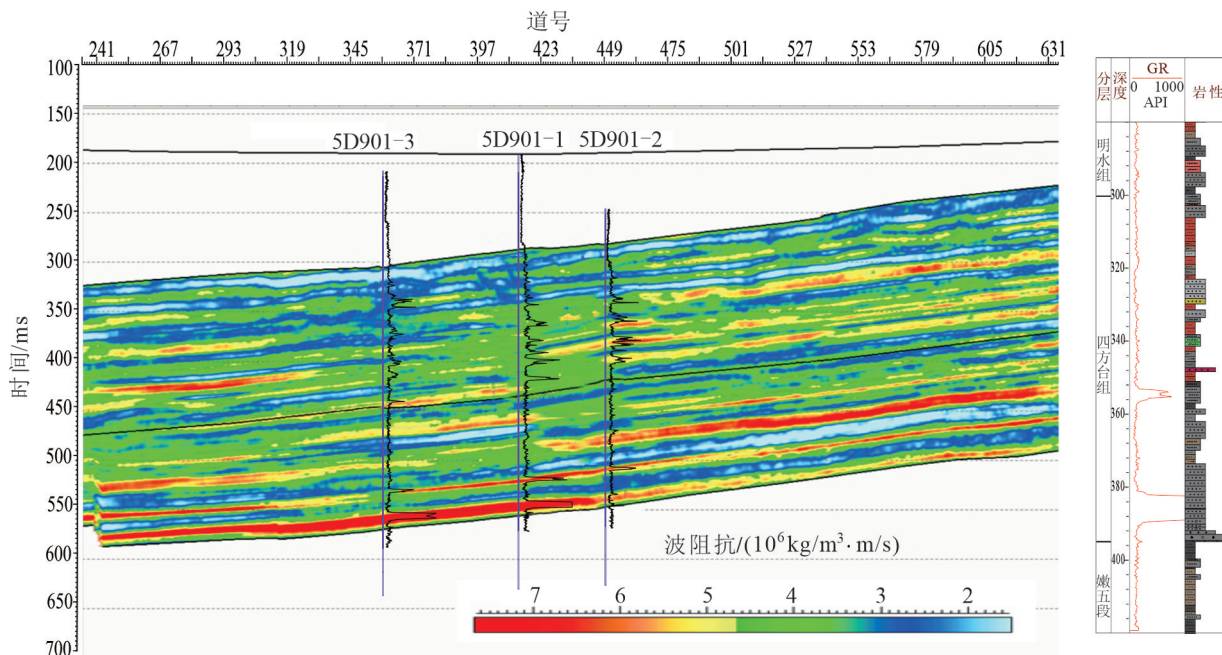


图5 传统波阻抗反演结果与5D901-1钻孔对比

Fig.5 Comparison between traditional wave impedance inversion results and borehole 5D901-1

替,与钻孔柱状图完全吻合,反映了正常的沉积旋回,证实了地震数据采集及处理、解释参数选择得当,完成了地震勘探第一项任务,即区分砂泥岩。

但是仅290~420 m就有4段砂体,且对于本区主要目的层上白垩统四方台组下段砂体的波阻抗反映而言,两个工业孔5D901-1、5D901-3与矿化5D901-2没有明显的区分,主要原因是按照传统波阻抗的定义,在同一段砂体中,密度、速度相差无几,不足引起在现有采集精度下可被区分的波阻抗差异。

为了进一步从地震数据体找到区分砂岩是否含矿的信息,尝试利用对含铀敏感性最高的自然伽马曲线重构波阻抗(图6)。

对比图5与图6可以看到,与含矿无关的泥岩、砂岩信息被有效压制。这是因为重组后的波阻抗中含有了自然伽马信息,不但可以有效区分砂岩、泥岩,在砂岩中还可以区分是否含矿。为进一步验证方法的有效性,重新布置ZKDX00-01、ZKDX00-03两个钻孔,分别验证含矿和不含矿的反演波阻抗特征,钻孔布置及验证结果见图7。

钻孔ZKDX00-01布置在重构波阻抗反演成果显示的含矿部分,实际钻探验证在407.5~412 m钻获含矿砂体,自然伽马均在1000 API以上,最高达

4676 API,根据定量伽玛换算最后确定为工业孔。钻孔ZKDX00-03布置在传统波阻抗反演显示为砂体,波阻抗特征与钻孔ZKDX00-01位置相近,但重构波阻抗反演成果显示的不含矿部分,实际钻探验证在412~418 m钻获砂体,但自然伽马均在1000 API以下,仅为异常孔。

5 结论

(1)在岩层属性反演过程中,依靠单一的声波测井曲线无法有效的区分砂层中是否含铀,将石油测井曲线重构技术引入到砂岩型铀矿勘查,可突出储层与围岩之间的物性差异,提高地震反演的分辨率,从而显著提高波阻抗反演对岩层属性描述的能力。

(2)本文中选取对含矿敏感性最强的自然伽马曲线进行波阻抗重构,在常规曲线区分砂泥岩的基础上,进一步通过提高门槛值的方法缩小找矿范围,为砂岩型铀矿勘查提供了一项新的技术手段。

(3)从钻探验证结果看,利用自然伽马曲线重构波阻抗反演效果和传统波阻抗反演效果相比,有效的提高了反演结果对储层含铀信息的甄别能力。在反演过程中,通过加强地质、测井信息的参与度,达到了精细刻画目标地质体的目的,避免了地震波阻抗对含铀砂岩与非含铀砂岩无差异地球

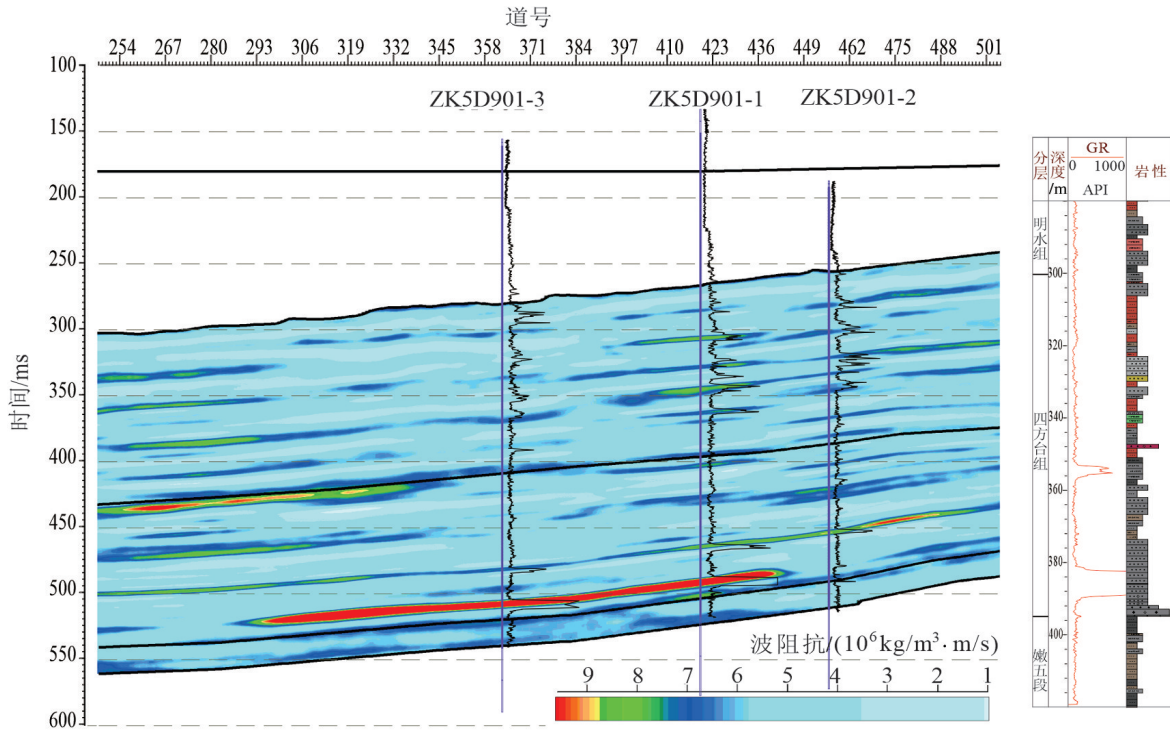


图6 重构波阻抗后反演结果与5D901-1钻孔对比

Fig.6 Comparison between reconstruction wave impedance inversion results and borehole 5D901-1

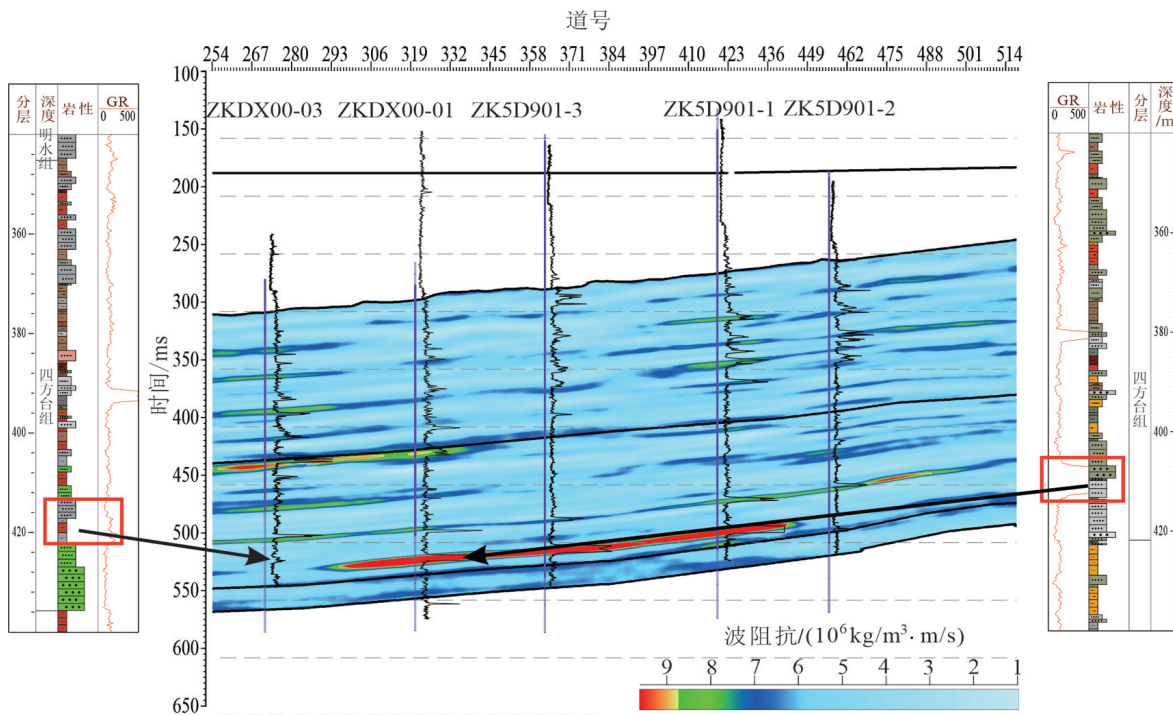


图7 重构波阻抗后反演成果的验证孔ZKDX00-01和ZKDX00-03

Fig.7 Verification holes zkd00-01 and zkd00-03 of inversion results after reconstruction of wave impedance

物理响应的弱点。

(4)波阻抗重构技术在石油行业已经相当成熟,但是将其应用到砂岩型铀矿勘查中,还需要大量的生产实践进行验证,补充、修正,任重而道远。毕竟铀矿与油气物性参数和成矿机理大相径庭。同时,砂岩型铀矿跟其他矿种一样,工业品位等的划分本身就是一种经济考量,会随着工业技术的提高和社会需求的紧迫性而变化,文中涉及的门限值会做相应变化。

(5)地震勘探作为支撑地质工作的方法手段,与地质工作相辅相成,尤其是地震勘探的目标体会随着对成矿模型的不不断认识而细化甚至改变。地震勘探以数据量大著称,将大量的数据量转换加工成大量的铀成矿信息还需要地球物理工作者不懈的努力。

Reference

- Boekhout F, Gerard M, Michel A, Déjeant A, Galois L, Calas G. 2015. Uranium migration and retention during weathering of a granitic waste rock pile[J]. *Applied Geochemistry*, 58: 123–135.
- Cai Weixiang, Gong Fuhua, Wang Yong, Hu Zhipeng, Ji Xuan. 2016. Comprehensive research and application of reservoir in combination with geostatistical inversion[J]. *Science Technology and Engineering*, 16(16): 128–135 (in Chinese with English abstract).
- Chen Ganghua, Wang Yonggang. 2005. Application of Faust equation in rebuilding of acoustic curve[J]. *Progress in Exploration Geophysics*, 28(2): 125–128 (in Chinese with English abstract).
- Chen Lulu, Li Ming, Tang Chao, He Jing, Chen Yin, Zhao Hualei, Tang Li. 2022. Petrology and mineralogy characteristics of the uranium-bearing sandstone from Sifantai Formation in Sanzhao depression of Northern Songliao Basin and their geological implications[J]. *North China Geology*, 45(4): 10–20 (in Chinese with English abstract).
- Chen Zhide, Long Jiangnan, Zu Xusheng, Zhao Zhonghua, Lu Xulinghong. 2015. Reconstruction and application of the density logging curves in Placanticline Oilfield[J]. *Petroleum Geology and Oilfield Development in Daqing*, 34(5): 123–126 (in Chinese with English abstract).
- Chen Zuyin, Ying mingxiong, He Yi, Deng Cong, Zhao Di. 2014. The study method of low-frequency compensation inversion based on multiple integral[J]. *Science Technology and Engineering*, 14(36): 1–5, 16 (in Chinese with English abstract).
- Feng Xiaoxi, Jin Ruoshi, Sima Xianzhang, Li Jianguo, Zhao Hualei, Chen Yin, Chen Lulu, Tang Chao, Ao Cong, Wang Xinhua. 2017. Uranium source analysis and its geological significance to uranium metallogenic evolution in Dongsheng Uranium Ore Field[J]. *Geology in China*, 44(5): 993–1005 (in Chinese with English abstract).
- Gu Weili, Li Wei, Geng Dan, Ma Dong. 2017. Identification and prediction of thin reservoir/thin Sand—A case study from the 4th member of Triassic Akekule formation in the two well area, Tahe oil field[J]. *Science Technology and Engineering*, 17(3): 203–212 (in Chinese with English abstract).
- Hao Yaju, Wen Xiaotao, Li Zhong, Li Shikai, Li Tian. 2015. Impedance inversion of thin-bed based on basis pursuit[J]. *Science Technology and Engineering*, 15(33): 10–17 (in Chinese with English abstract).
- Jiang Zhenhui, Qi Ying. 2016. Application of curve reconstruction inversion to lateral prediction of unconventional reservoir[J]. *Marine Geology Frontiers*, 32(7): 64–70 (in Chinese with English abstract).
- Jin R S, Miao P S, Sima X Z, Li J G, Zhao H L, Zhao F Q, Fen X X, Chen Y, Chen L L, Zhao L J, Zhu Q. 2016. Structure styles of Mesozoic—Cenozoic U-bearing rock series in northern China[J]. *Acta Geologica Sinica (English Edition)*, 90(6): 2104–2116.
- Jin R S, Feng X X, Teng X M, Nie F J, Cao H Y, Hou H Q, Liu H X, Miao P S, Zhao H L, Chen L L, Zhu Q, Zhou X X. 2020. Genesis of green sandstone/mudstone from Middle Jurassic Zhiluo Formation in the Dongsheng Uranium Orefield, Ordos Basin and its enlightenment for uranium mineralization[J]. *China Geology*, 3: 52–66.
- Jin R S, Liu H J, Li X G. 2022. Theoretical system of sandstone-type uranium deposits in Northern China[J]. *Journal of Earth Science*, 33(2): 257–277.
- Jin Ruoshi, Cheng Yinhang, Li Jianguo, Sima Xianzhang, Miao Peisen, Wang Shaoyi, Ao Cong, Li Hongliang, Li Yangfeng, Zhang Tianfu. 2017. Late Mesozoic continental basin “Red and Black beds” coupling formation constraints on the sandstone uranium mineralization in northern China[J]. *Geology in China*, 44(2): 205–223 (in Chinese with English abstract).
- Li Jinlei, Yin Zhengwu. 2015. Seismic quantitative prediction method of shale gas reservoir in Jiaoshiba area, Sichuan Basin[J]. *Geophysical Prospecting for Petroleum*, 54(3): 324–330 (in Chinese with English abstract).
- Liu Huajian, Jin Ruoshi, Li Jianguo, Xu Zenglian, Wang Tiejun, Ao Zong, Tang Chao, Wei Jialin. 2017. Advance in research for sedimentary and uranium source analysis of the uranium-bearing series in northern Songliao basin[J]. *Geological Survey and Research*, 40(4): 281–289 (in Chinese with English abstract).
- Liu Huajian, Jin Ruoshi, Xiao Peng, Tang Chao, Xu Zenglian, Li Jianguo, Wang Tiejun, Chen Lulu, Wei Jialin. 2018. Grain-size characteristics of the Sifantai Formation of uranium-bearing series in Guqia area, northern Songliao basin and its sedimentary environmental implications[J]. *Geological Survey and Research*, 41

- (1): 40–50 (in Chinese with English abstract).
- Ma Guangke, Li Da, Sui Bo, Tao Qianqian, Liu Wei, Zhang Guodong, Dong Zhihua. 2013. The application of seismic multi-attributes based on the integration reconstruction technique to reservoir prediction[J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 37(6): 993–997 (in Chinese with English abstract).
- Ma H L, Yang C, Guo J C, Lu C, Zhou X G. 2016. Jurassic sporopollen of Yanan formation and Zhiluo formation in the north-eastern Ordos Basin, Inner Mongolia, and its paleoclimatic significance[J]. *Earth Science Frontiers*, 24(1): 32–51.
- Song Meiyuan. 2014. Comprehensive application of well logging curve rebuilding in the recognition of oil and gas layer in the Hassan Block[J]. *Science Technology and Engineering*, 14(19): 211–216 (in Chinese with English abstract).
- Song Weiqi, Chen Wei. 2009. The research and application of inversion and reconstruction of well-log acoustic travel times[J]. *Seismology and Geology*, 31(1): 133–140 (in Chinese with English abstract).
- Tang Chao, Jin Ruoshi, Gu Shefeng, Li Jianguo, Zhong Yanqiu, Miao Peisen, Sima Xianzhang, Wei Jialin. 2018. Discovery and significance of industrial uranium ore in Sifangtai Formation, north Songliao basin[J]. *Geological Survey and Research*, 41(1): 1–8, 32 (in Chinese with English abstract).
- Wang Junrui, Liang Liwen, Deng Qiang, Tian Panpan, Tan Weixiong. 2016. Research and application of log reconstruction based on multiple regression model[J]. *Lithologic Reservoir*, 28(3): 113–120 (in Chinese with English abstract).
- Wang Wei, LV Yanfang, Fu Guang, Sun Tongwen, Wang Chao, Liu Zhe, Cao Lanzhu, Hu Xinlei, Zhang Huan. 2017. New method of using quasi-acoustic inversion for calculating the shale content and its application in evaluating of lateral sealing ability of fault[J]. *Progress in Geophysics*, 32(2): 737–744 (in Chinese with English abstract).
- Yang Zhenfeng, Tian Renfei, Xiao Xue, Hu Yu, Zhao Qianchen. 2014. The application of pseudo-resistivity reconstruction to identify oil layers in lithologic reservoir[J]. *Science Technology and Engineering*, 14(7): 117–120 (in Chinese with English abstract).
- Yu Weiwei, Feng Lei, Du Yanyan. 2019. Application of the wave impedance inversion based on the characteristic curve reconstruction in the complex reservoir prediction[J]. *Science Technology and Engineering*, 19(4): 58–65 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Xiangtao, Wang Xudong, Shu Yu, Zhang Sufang, Que Xiaoming, She Qinghua, Wang Yanfei. 2017. Geological characteristics and formation conditions of large and medium-sized oil fields in Lufeng sag, Pearl River Mouth Basin[J]. *Journal of Central South University (Natural Science Edition)*, 48(11): 2979–2989 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Yueqiao, Liao Changzhen. 2006. Transition of the Late Mesozoic–Cenozoic tectonic regimes and modification of the Ordos basin[J]. *Geology in China*, 33(1): 28–40 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Jilong, Xiong ran, Chen Ge, Chang Shaoying, Cao Peng. 2013. Gr Quasi-acoustic frequency divisions reconstruct seismic inversion and application in reservoir prediction[J]. *Progress in Geophysics*, 28(4): 1954–1961 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Yue, Xu Qiang, Liang Yeping, Zhao Hongsong, Tang Chaomiao, Zheng Cui. 2018. Uranium mineralization characteristics of Cretaceous period and prospecting direction of the Hurenbuqi depression in Erlan basin, Inner Mongolia[J]. *Geology in China*, 45(1): 168–177 (in Chinese with English abstract).
- Zhu Guojun. 2017. Application of acoustic curve reconstruction in reservoir prediction[J]. *Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration*, 39(3): 383–387 (in Chinese with English abstract).
- Zhu Lingxiao, Wu Zhiqiang, Qi Jianghao. 2018. Application of seismic-log joint inversion to prediction of Mesozoic sandstone reservoir in north depression of South Yellow Sea Basin[J]. *Marine Geology Frontiers*, 34(6): 66–72 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 蔡伟祥, 龚福华, 汪勇, 胡志鹏, 纪璇. 2016. 结合地质统计学反演的综合储层研究与应用[J]. *科学技术与工程*, 16(16): 128–135.
- 陈钢花, 王永刚. 2005. Faust公式在声波曲线重构中的应用[J]. *勘探地球物理进展*, 28(2): 125–128.
- 陈路路, 李明, 汤超, 贺静, 陈印, 赵华雷, 唐力. 2022. 松辽盆地北部三肇凹陷四方台组含铀砂岩岩石学、矿物学特征及其地质意义[J]. *华北地质*, 45(4): 10–20.
- 陈志德, 龙江南, 祖旭升, 赵忠华, 陆旭凌弘. 2015. 长垣油田密度曲线的重构与应用[J]. *大庆石油地质与开发*, 34(5): 123–126.
- 陈祖银, 应明雄, 贺懿, 邓聪, 赵地. 2014. 基于多重积分的低频补偿反演方法研究[J]. *科学技术与工程*, 14(36): 1–5, 16.
- 冯晓曦, 金若时, 司马献章, 李建国, 赵华雷, 陈印, 陈路路, 汤超, 奥琮, 王心华. 2017. 鄂尔多斯盆地东胜铀矿田铀源示踪及其地质意义[J]. *中国地质*, 44(5): 993–1005.
- 顾维力, 李伟, 耿丹, 马东. 2017. 薄油层(砂体)的识别与预测——以塔河油田二区三叠系阿四段为例[J]. *科学技术与工程*, 17(3): 203–212.
- 郝亚炬, 文晓涛, 李忠, 李世凯, 李天. 2015. 基于基追踪分解算法的薄层波阻抗反演[J]. *科学技术与工程*, 15(33): 10–17.
- 蒋振会, 齐颖. 2016. 曲线重构反演在非常规油藏储层横向预测中的应用[J]. *海洋地质前沿*, 32(7): 64–70.
- 金若时, 程银行, 李建国, 司马献章, 苗培森, 王少轶, 奥琮, 里宏亮, 李艳锋, 张天福. 2017. 中国北方晚中生代陆相盆地红-黑岩系耦合产出对砂岩型铀矿成矿环境的制约[J]. *中国地质*, 44(2): 205–223.
- 李金磊, 尹正武. 2015. 四川盆地焦石坝地区页岩气储层地震定量预测[J]. *石油物探*, 54(3): 324–330.

- 刘华健, 金若时, 李建国, 徐增连, 王铁军, 奥琮, 汤超, 魏佳林. 2017. 松辽盆地北部含铀岩系沉积物源及铀源分析研究进展[J]. 地质调查与研究, 40(4): 281-289.
- 刘华健, 金若时, 肖鹏, 汤超, 徐增连, 李建国, 王铁军, 陈路路, 魏佳林. 2018. 松辽盆地北部古恰地区含铀岩系四方台组粒度特征及其沉积环境指示意义[J]. 地质调查与研究, 41(1): 40-50.
- 马光克, 李达, 隋波, 陶倩倩, 刘巍, 张国栋, 董志华. 2013. 地震多属性融合曲线重构技术在储层预测中的应用[J]. 物探与化探, 37(6): 993-997.
- 宋梅远. 2014. 测井曲线重构在哈山地区油气水层判识中的综合应用[J]. 科学技术与工程, 14(19): 211-216.
- 宋维琪, 陈伟. 2009. 测井声波时差反演重构技术研究及应用[J]. 地震地质, 31(1): 133-140.
- 汤超, 金若时, 谷社峰, 李建国, 钟延秋, 苗培森, 司马献章, 魏佳林. 2018. 松辽盆地北部四方台组工业铀矿体的发现及其意义[J]. 地质调查与研究, 41(1): 1-8, 32.
- 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[J]. 岩性油气藏, 28(3): 113-120.
- 王伟, 吕延防, 付广, 孙同文, 王超, 刘哲, 曹兰柱, 胡欣蕾, 张桓. 2017. 利用拟声波约束反演求取泥质含量的新方法及其在断层侧向封闭性评价中的应用[J]. 地球物理学进展, 32(2): 737-744.
- 杨振峰, 田仁飞, 肖学, 胡宇, 赵乾辰. 2014. 拟电阻率重构在岩性油藏油层识别中的应用[J]. 科学技术与工程, 14(7): 117-120.
- 余为维, 冯磊, 杜艳艳. 2019. 基于特征曲线重构的波阻抗反演在复杂储层预测中的应用[J]. 科学技术与工程, 19(4): 58-65.
- 张向涛, 汪旭东, 舒誉, 张素芳, 阙晓铭, 余清华, 王艳飞. 2017. 珠江口盆地陆丰凹陷大中型油田地质特征及形成条件[J]. 中南大学学报(自然科学版), 48(11): 2979-2989.
- 张岳桥, 廖昌珍. 2006. 晚中生代—新生代构造体制转换与鄂尔多斯盆地改造[J]. 中国地质, 33(1): 28-40.
- 赵继龙, 熊冉, 陈戈, 常少英, 曹鹏. 2013. 伽马拟声波变频重构反演在储层预测中的应用[J]. 地球物理学进展, 28(4): 1954-1961.
- 赵岳, 徐强, 梁叶萍, 赵红松, 唐朝苗, 郑翠. 2018. 内蒙古二连盆地呼仁布其凹陷白垩系铀矿化特征与找矿远景[J]. 中国地质, 45(1): 168-177.
- 朱国军. 2017. 声波曲线重构技术在储层预测中的应用[J]. 物探化探计算技术, 39(3): 383-387.
- 朱凌霄, 吴志强, 祁江豪. 2018. 地震测井联合反演技术在南黄海盆地北部坳陷中生代储层预测中的应用[J]. 海洋地质前沿, 34(6): 66-72.