

引用格式:陈学国,相鹏,张建华,等.重力反演技术在超深层储层预测中的应用——以准噶尔盆地腹部为例[J].油气地质与采收率,2024,31(4):174-183.

CHEN Xueguo, XIANG Peng, ZHANG Jianhua, et al. Application of gravity inversion technology in prediction of ultra-deep reservoirs: a case study of central Junggar Basin[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2024, 31(4): 174-183.

## 重力反演技术在超深层储层预测中的应用

——以准噶尔盆地腹部为例

陈学国,相鹏,张建华,班丽,吴微,郭涛,冯国志

(中国石化胜利油田分公司 勘探开发研究院,山东 东营 257015)

**摘要:**准噶尔盆地超深层勘探潜力巨大,应用地震资料进行储层预测是目前油气勘探的主要技术手段,但由于超深层地震资料信噪比低,储-震对应关系不明确,且实钻井少,难以建立有效的地震反演初始模型,这些问题均制约了地震反演技术在超深层储层预测中的应用。重力反演作为一种重要的定量解释手段,可以得到地下的密度分布特征,为地质解释提供支持,根据密度模型可以为地震反演建立相对可靠的低频模型,在一定程度上克服了地震资料在超深层应用的困难,同时重力资料的取得相较于地震资料经济便捷,更易于在实际中应用。因此,提出一种将重力反演应用于地震储层预测的新技术。首先针对重力反演不适定问题,提出基于高斯径向基函数的拟神经网络重力反演技术,提高了重力反演的分辨率和可靠性;其次将重力反演获得的密度模型作为训练数据,与地震和测井数据共同训练神经网络,建立了地震反演的初始模型;最后在初始模型约束下开展地震反演。该技术突破了单一地震资料在超深层储层预测中的应用瓶颈,克服了测井约束的限制,为地震反演提供了可靠的初始模型。应用该技术对准噶尔盆地超深层碎屑岩储层进行预测,结果符合现有地质认识,说明该技术对超深层储层预测具有较高的实用价值和应用潜力,可以为超深层勘探提供技术支持。

**关键词:**重力反演;联合反演;神经网络;超深层;储层预测;准噶尔盆地

文章编号:1009-9603(2024)04-0174-10

DOI:10.13673/j.pgre.202405040

中图分类号:TE357

文献标识码:A

## Application of gravity inversion technology in prediction of ultra-deep reservoirs: A case study of central Junggar Basin

CHEN Xueguo, XIANG Peng, ZHANG Jianhua, BAN Li, WU Wei, GUO Tao, FENG Guozhi

(Exploration and Development Research Institute, Shengli Oilfield Company, SINOPEC,  
Dongying City, Shandong Province, 257015, China)

**Abstract:** There is great exploration potential for ultra-deep reservoirs in Junggar Basin, and reservoir prediction with seismic data is the main technical means of oil and gas exploration at present. However, due to the low signal-to-noise ratio of seismic data of ultra-deep reservoirs, unclear reservoir-seismic data correspondence, and few actual drilling wells, it is difficult to establish an effective initial model for seismic inversion, which restricts the accuracy and reliability of ultra-deep reservoir prediction. Gravity inversion, as an important quantitative interpretation method, can obtain the characteristics of underground density distribution and provide support for geological interpretation. According to the density model, a relatively reliable low-frequency model can be established for seismic inversion, which can overcome the difficulty of applying seismic data in ultra-deep reservoirs to a certain extent. Meanwhile, the acquisition of gravity data is economical and convenient compared with that of seismic data, and it is easier to

收稿日期:2024-05-30。

作者简介:陈学国(1972—),男,河南潢川人,研究员,博士,从事综合地球物理勘探技术方向研究。E-mail:chenxueguo580.slyt@sinopec.com。

通信作者:相鹏(1978—),男,山东青岛人,高级工程师,博士。E-mail:xiangpeng.slyt@sinopec.com。

基金项目:中国石化科技攻关项目“准中地区中生界隐蔽圈闭发育模式与精细描述”(P24029)。

be applied in practice. Therefore, a new technique applying gravity inversion to seismic data-based reservoir prediction was developed in this article. Firstly, a quasi-neural network gravity inversion technique based on Gaussian radial basis functions was proposed to solve the gravity inversion problem and improve the resolution and reliability of gravity inversion. Then, the density body obtained by gravity inversion was used as training data, and a neural network was trained together with seismic and logging data to establish the initial model of seismic inversion. Finally, seismic inversion was carried out with the initial model constraints. This technique broke through the application bottleneck of single seismic data in ultra-deep reservoir prediction and overcame the limitations of logging constraints, providing a reliable initial model for seismic inversion. The application of this technique to the prediction of ultra-deep clastic rock reservoirs in Junggar Basin was consistent with the existing geological knowledge, indicating that this method had high practical value and application potential for ultra-deep reservoir prediction and could provide technical support for ultra-deep reservoir exploration.

**Key words:** gravity inversion; joint inversion; neural network; ultra-deep; reservoir prediction; Junggar Basin

近年来准噶尔盆地腹部下组合的勘探取得了一系列勘探突破和规模发现,累积上报三级储量接近 $20 \times 10^8 \text{t}$ 。中国石化工区内下组合紧邻二叠系下乌尔禾组和风城组2套优质规模烃源岩的生烃中心,且储盖配置好、圈闭类型多样,前期通过征10、成6、庄深1等井的钻探,在二叠系—三叠系碎屑岩和石炭系火成岩等不同层系、不同领域已获重要突破,证实了该区巨大的勘探潜力<sup>[1-3]</sup>。

应用地震资料进行储层预测是当前油气勘探的主要技术手段。常见的地震反演方法主要有稀疏脉冲反演、地质统计学反演及协模拟反演等。准噶尔盆地腹部下组合埋深大,基本大于6 000 m,地震资料分辨率低,地震反射同向轴连续性差,甚至出现杂乱反射,碎屑岩储层的储-震对应关系不明确,同时实钻井少,难以建立有效的地震反演初始模型,这些问题制约了地震反演技术在超深层储层预测中的应用。

重力异常是由于地质体密度分布差异引起的重力变化,利用重力异常进行反演,可以得到地质体的密度分布。根据密度界面可以为地震反演建立相对可靠的低频模型,在一定程度上克服了地震资料在超深层应用的困难。同时重力资料的取得相较于地震资料经济便捷,易于在实际中应用。

为此,笔者在梳理了大量已有的重力反演方法和地震反演方法基础上,提出了一种基于用重力反演技术为地震反演建立低频模型的方法,以提高超深层少井或无井区域储层预测的精度和可靠性。具体步骤如下:首先,针对重力反演不适定问题,提出了基于高斯径向基函数的重力反演技术,该技术提高了重力反演的分辨率和可靠性;其次,建立了一种基于神经网络的地震反演初始模型建模方法,该方法用密度模型作为训练数据,与地震和测井数据共同训练神经网络,为地震反演建立初始模型;

最后,在初始模型约束下开展地震反演,反演结果相较于单一应用地震资料有了很大改善。将该项技术在准噶尔盆地超深层碎屑岩储层预测中进行了应用,结果与实钻井吻合度高,符合现有地质认识,证明该技术对超深层储层预测具有较高的实用价值和潜力。

## 1 基于高斯径向基函数的重力反演技术

针对重力反演不适定问题,利用径向基函数压缩模型空间,在保证复杂模型表征能力的前提下,减少了反演参数数量,解决了传统的基于网格模型的重力反演技术普遍存在欠定性和分辨率的矛盾,充分提取重力数据中蕴含的信息,获得分辨率尽可能高的可靠反演结果。

采用高斯函数做为径向基函数,其公式如下:

$$Gauss = \exp \left[ -\frac{(x - \mu_x)^2}{2\delta_x^2} - \frac{(y - \mu_y)^2}{2\delta_y^2} - \frac{(z - \mu_z)^2}{2\delta_z^2} \right] \quad (1)$$

式中: $Gauss$ 为高斯函数; $x, y, z$ 为网格中心坐标; $\mu_x, \mu_y, \mu_z$ 为径向基函数中心坐标; $\delta_x, \delta_y, \delta_z$ 为径向基函数分布半径。

若二维反演则其高斯函数表达式为:

$$Gauss_{2D} = \exp \left[ -\frac{(x - \mu_x)^2}{2\delta_x^2} - \frac{(z - \mu_z)^2}{2\delta_z^2} \right] \quad (2)$$

式中: $Gauss_{2D}$ 为二维反演高斯函数。

模型可以表示为多个不同振幅的高斯函数的叠加求和,则有:

$$m = \sum_{i=1}^{N_G} w_i Gauss_i \quad (3)$$

式中: $m$ 为多个不同振幅的高斯函数的叠加求和; $i$ 为高斯函数索引; $N_G$ 为高斯径向基函数个数; $G$ 为

高斯径向基函数;  $w_i$  为第  $i$  个高斯径向基函数的振幅;  $Gauss_i$  为第  $i$  个高斯函数。

基于立方体网格模型的重力正演公式为:

$$d = \mathbf{K}m \tag{4}$$

式中:  $d$  为基于立方体网格模型的重力正演;  $\mathbf{K}$  是核函数矩阵。

将式(3)带入式(4)得:

$$d = \mathbf{K} \sum_{i=1}^{N_g} w_i Gauss_i \tag{5}$$

由于高斯径向基函数是径向基函数中心和分布半径的非线性函数,则重力正演公式由线性公式变成了非线性公式,反演参数由网格密度变成了径向基函数的振幅、中心和半径。高斯径向基函数具有很强的模型表征能力,对于复杂模型可以使用远少于剖分网格个数的高斯径向基函数进行较高精度的拟合,分别使用不同数量的高斯径向基函数拟

合的效果如图1所示。

在定义了基于高斯径向基函数的重力正演公式之后,提出了一种基于高斯径向基函数的拟神经网络结构(图2),该神经网络由输入层、径向基函数层、权重连接层和正演输出层组成,其中径向基函数层的节点为前述高斯径向基函数,权重连接层的节点为高斯径向基函数振幅,正演输出层的节点为重力正演核函数。

与传统神经网络重力反演方法<sup>[4-10]</sup>相比,提出的拟神经网络主要有以下不同:①输入层的输入数据是模型网格中心的坐标,而传统神经网络重力反演方法中,输入层的输入数据通常为重力样本数据集。②输出层输出的数据是正演重力值,而传统神经网络重力反演方法中,输出层的输出数据通常为密度模型数据集。③在训练结束后,径向基函数权重连接层的输出即为最终反演结果,即密度模型,

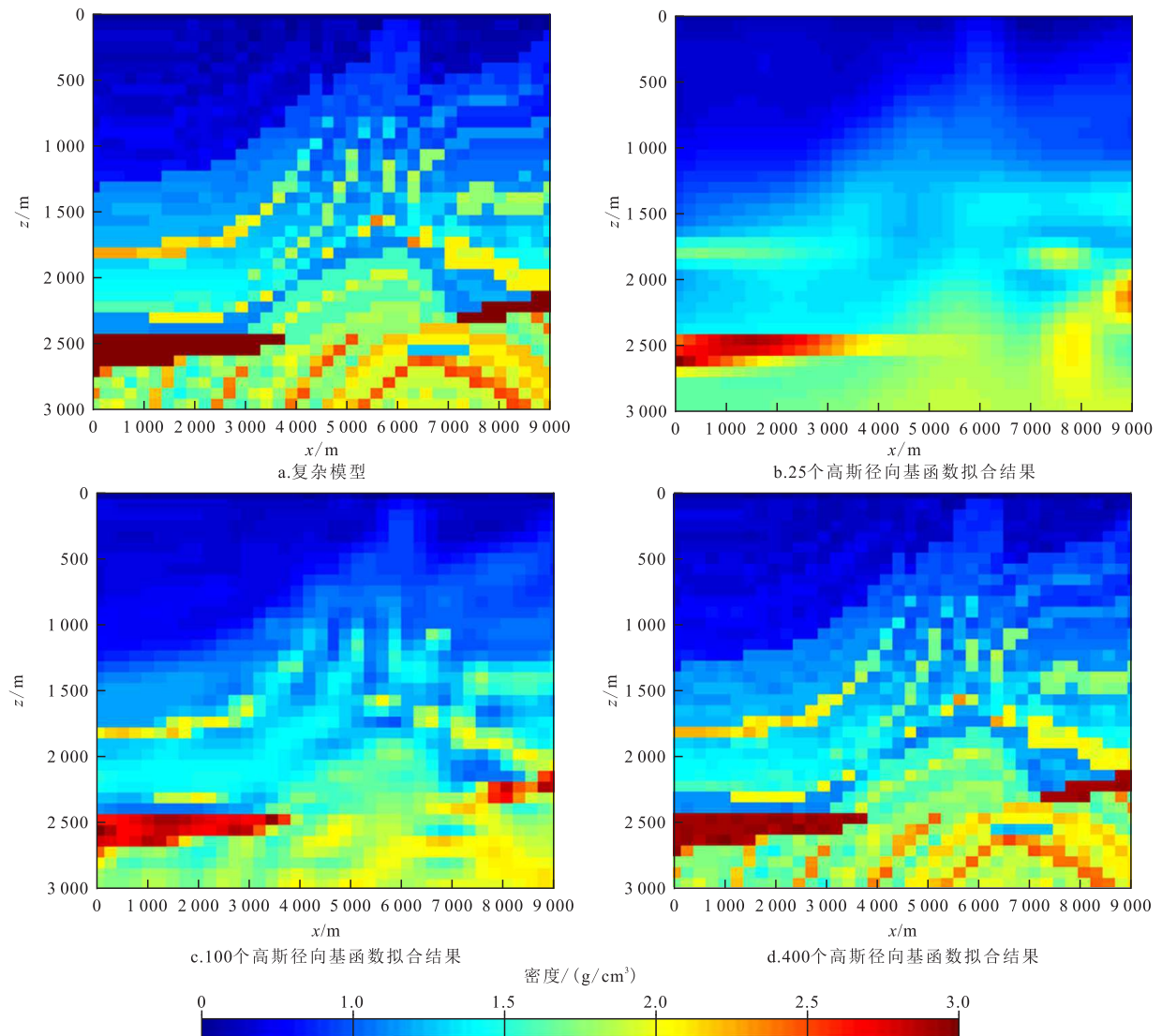


图1 复杂模型与高斯径向基函数拟合结果

Fig.1 Fitting results of complex model and Gaussian radial basis functions

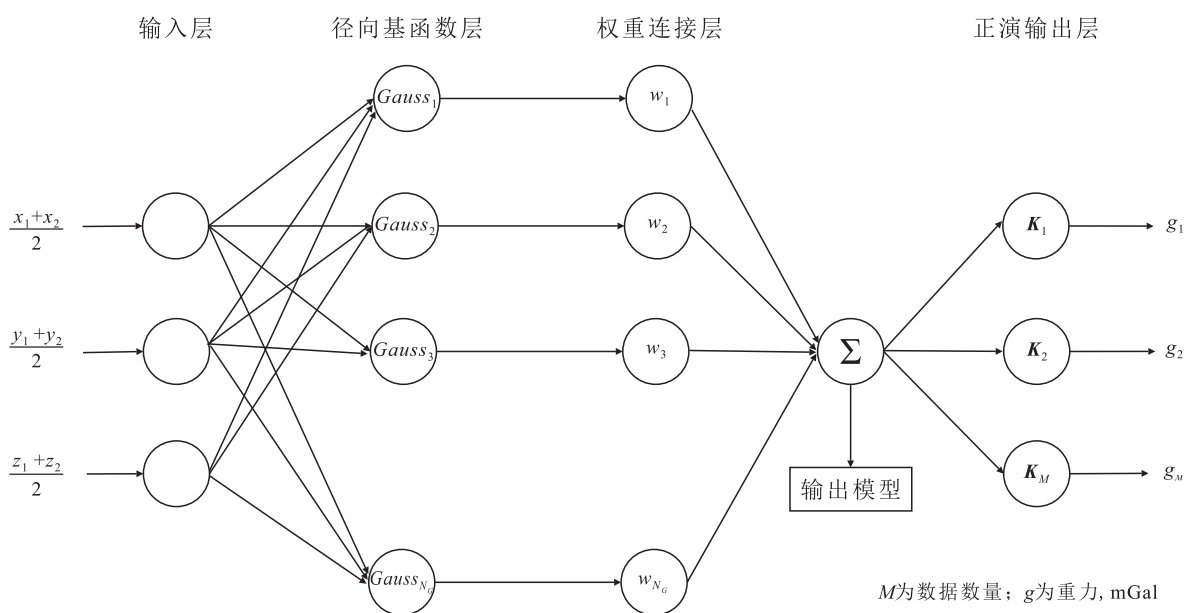


图2 拟神经网络结构

Fig.2 Structure of quasi-neural network based on radial basis function

而传统神经网络重力反演方法中,先使用样本数据集训练神经网络,再利用训练后的神经网络执行预测步骤,在网络输出层获得最终反演结果<sup>[11-13]</sup>。

为了验证该技术的有效性,在文献[9]中的实验模型基础上设计了三维组合模型。如图3a所示,模型有3个地质体,其中地质体1和地质体2为垂向叠置。正演重力场如图3b所示。

由无约束反演结果(图4)可以看出,无井约束反演可以恢复地质体的形态,地质体1的边界较为尖锐,与地质体2垂向叠加部分得到准确分离,地质体3的边界非常清晰,但下界面偏浅。实验结果证明,由于反演参数的减少,在不施加任何约束的情

况下,重力反演亦能获得较高的横向和垂向分辨率,垂向叠加的地质体能够准确恢复。

为检验该方法的实用性,对准噶尔盆地腹部某区域开展了重力反演,获得了该区域的三维密度模型(图5)。从三维密度模型中可以提取石炭系密度界面。在密度界面上可以看出凸起和凹陷的格局界限清楚,凹陷内各次级注陷分布清晰,反演效果较同类方法<sup>[14-17]</sup>有了本质性提升,该方法获得的高质量密度模型具有以下实用价值:①与井震结合开展构造解释;②用于重力剥层处理,精确提取深层目标重力异常;③为地震反演建立可靠的初始模型。

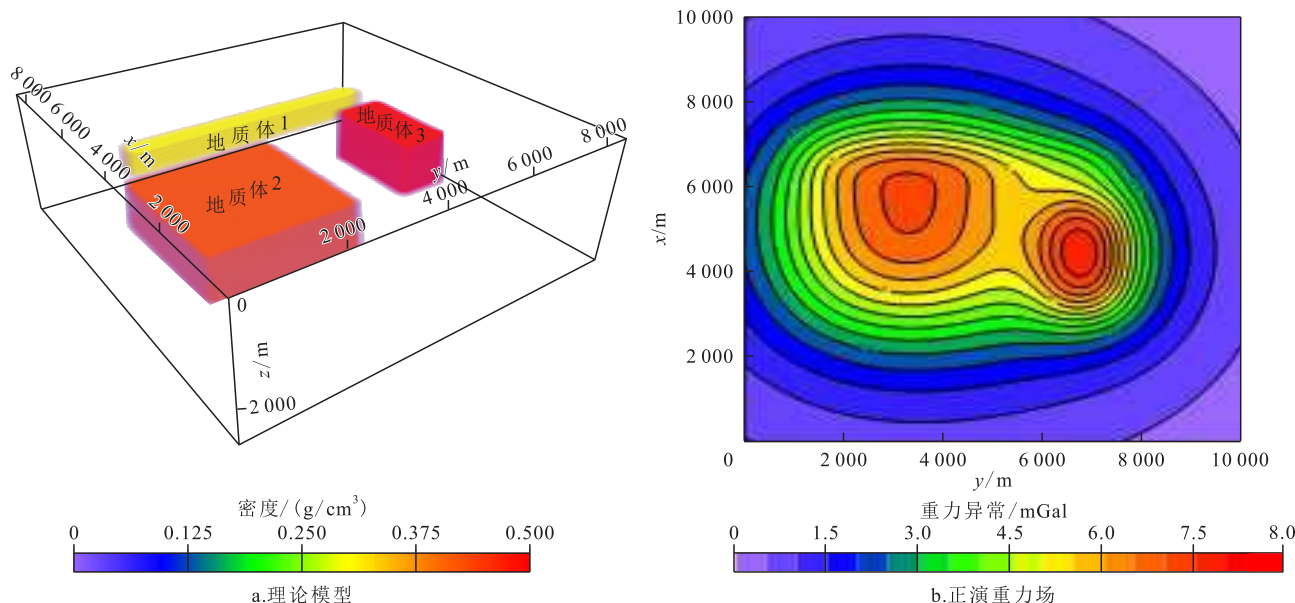


图3 理论模型及正演重力场

Fig.3 Theoretical model and forward gravity field

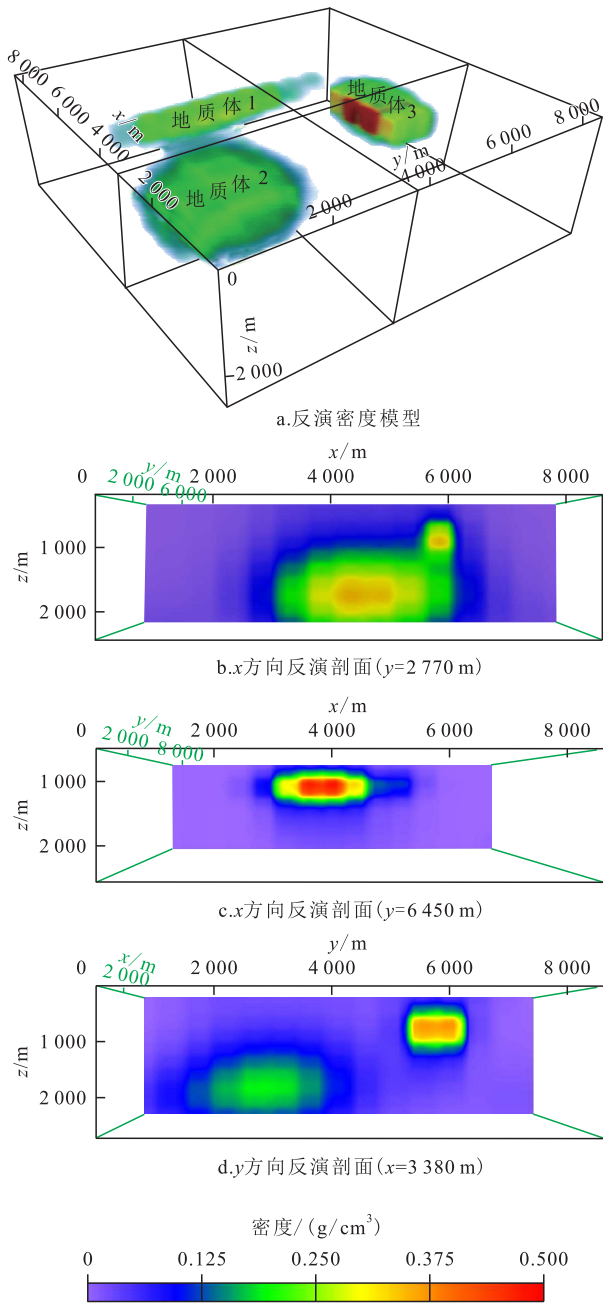


图4 无约束反演结果  
Fig.4 Unconstrained inversion results

## 2 基于神经网络的地震反演初始模型建模方法

地震反演是储层预测的主要手段之一,然而地震反演严重依赖测井约束和初始模型约束,在测井约束严重不足的少井区域,根据测井数据构建的初始模型精度和可靠性较低,在无井区域,常规方法甚至无法构建初始模型,从而极大降低了反演的精度和可靠性。在重力反演结果的基础上,提出了一种基于神经网络的地震反演初始模型建模方法,该

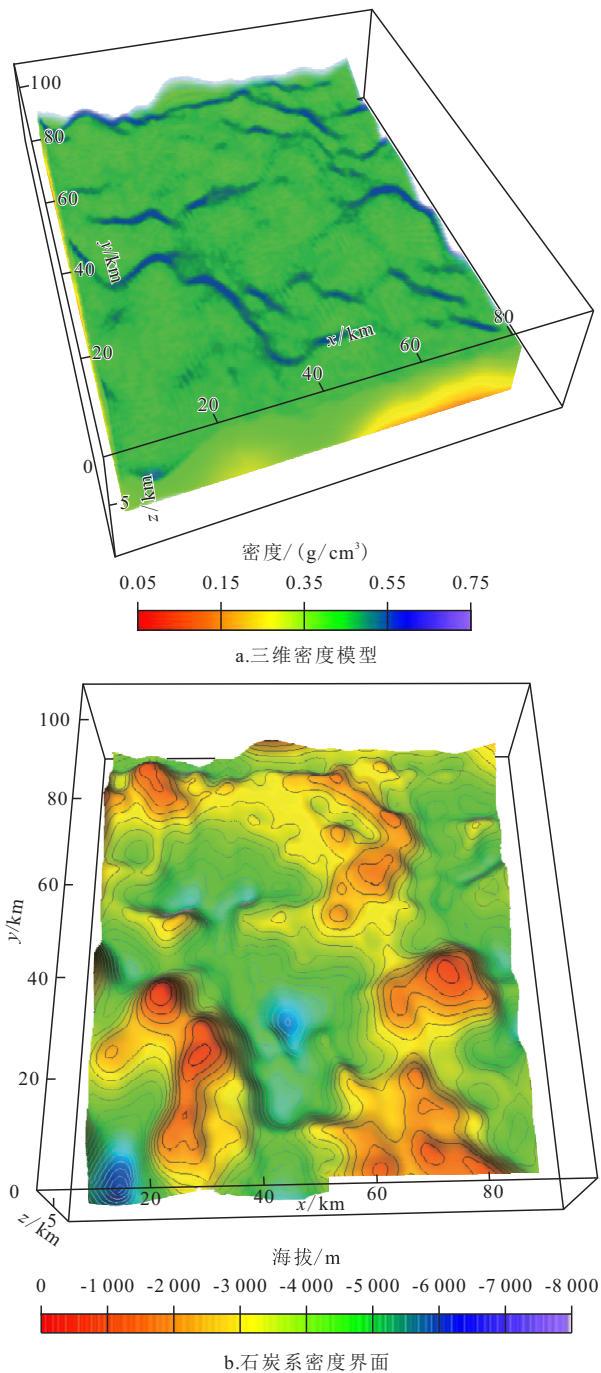


图5 准噶尔盆地腹部某区域三维密度模型  
Fig.5 Three-dimensional density model of a region in central Junggar Basin

方法利用重力反演建立的密度模型提供低频趋势<sup>[18-20]</sup>,可以克服测井数据不足带来的问题(如牛眼效应);通过迁移学习将相似区域的井-震特征迁移至无井区域,从而解决无井区域的建模难题。

首先,用重力反演获得的密度模型作为训练数据,与地震和测井数据共同训练神经网络。神经网络训练过程如图6所示。该神经网络以地震数据体作为训练样本,测井数据和外部属性体(如密度、地震属性等)作为标签。损失函数为:

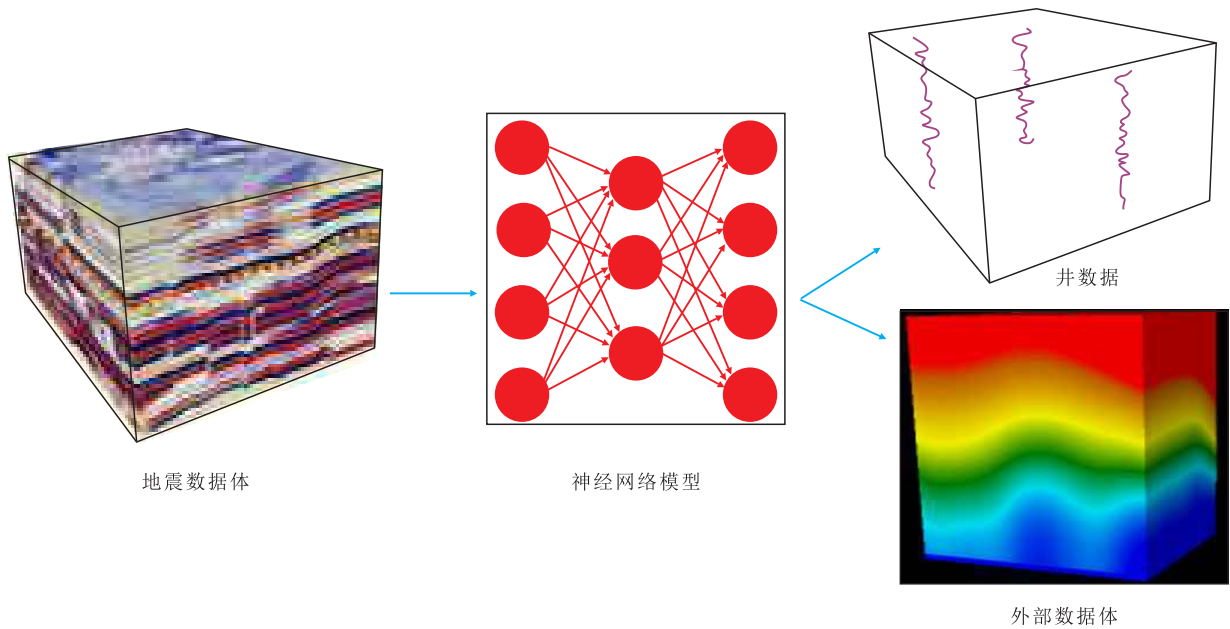


图6 神经网络训练过程示意  
Fig.6 Neural network training process

$$Loss = Loss\_mse + Loss\_ssim \quad (6)$$

式中:  $Loss$ 为损失函数;  $Loss\_mse$ 为井数据和预测井数据的均方误差;  $Loss\_ssim$ 是外部属性体和预测属性体的结构相似性误差。

$Loss\_mse$ 使神经网络学习获得到井-震特征,  $Loss\_ssim$ 使神经网络从外部属性体中学习获得趋势信息。

其次,当训练过程结束后,将地震数据体输入神经网络开展预测,神经网络预测过程如图7所示。预测结果为波阻抗模型。根据上述训练过程可知,该模型不仅利用测井资料的高频信息,而且融合了外部属性体(如密度、地震属性等)的低频趋势,因此预测结果合理性和可靠性更高。

最后,为了验证该方法的有效性,对比加入重力反演的密度模型前后的效果,分别采用3种不同的训练方法<sup>[21-25]</sup>对神经网络进行训练,3种方法都是

以地震做为训练样本,训练标签分别为测井数据、测井数据+地震瞬时相位属性体、测井数据+重力反演密度模型。其训练结果如图8所示。

从图8可以看出,只使用测井数据作为训练标签时,预测波阻抗曲线和真实波阻抗曲线的相关性仅为0.656,当使用测井数据+地震瞬时相位属性体作为训练标签时,预测和真实波阻抗曲线相关性为0.746;当使用测井数据+重力反演密度模型作为训练标签时,两者相关性提高至0.839。分析测井曲线和训练结果认为,该区超深层由于欠压实导致井-震对应关系较差,故仅靠测井和地震资料训练的效果不理想,而密度模型较好的反映了该区垂向变化趋势,因此预测与真实波阻抗曲线相关性最高。

训练完成后用该神经网络的预测过程建立工区的地震反演初始模型,由沿目标层位的水平切片(图9)可以看出,ZS1井位于图9a相对高波阻抗条

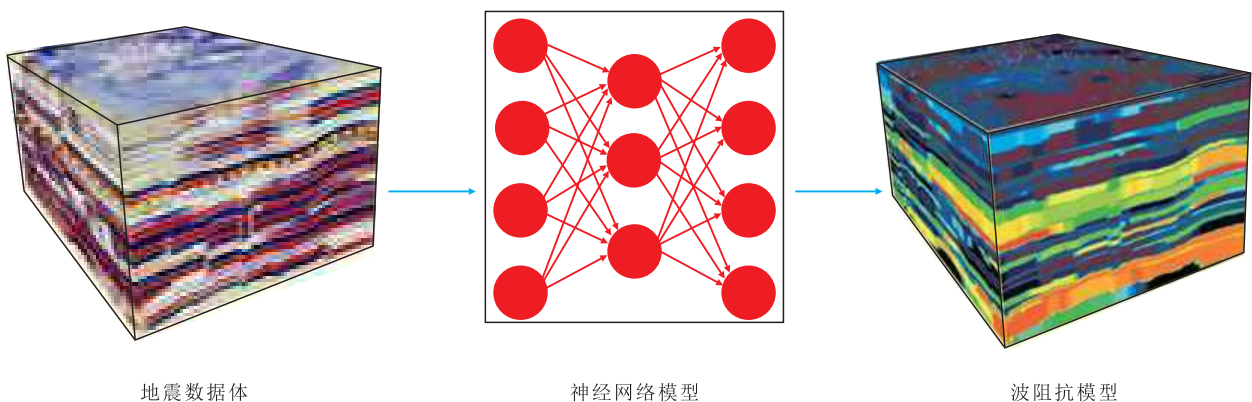


图7 神经网络预测过程示意  
Fig.7 Neural network prediction process

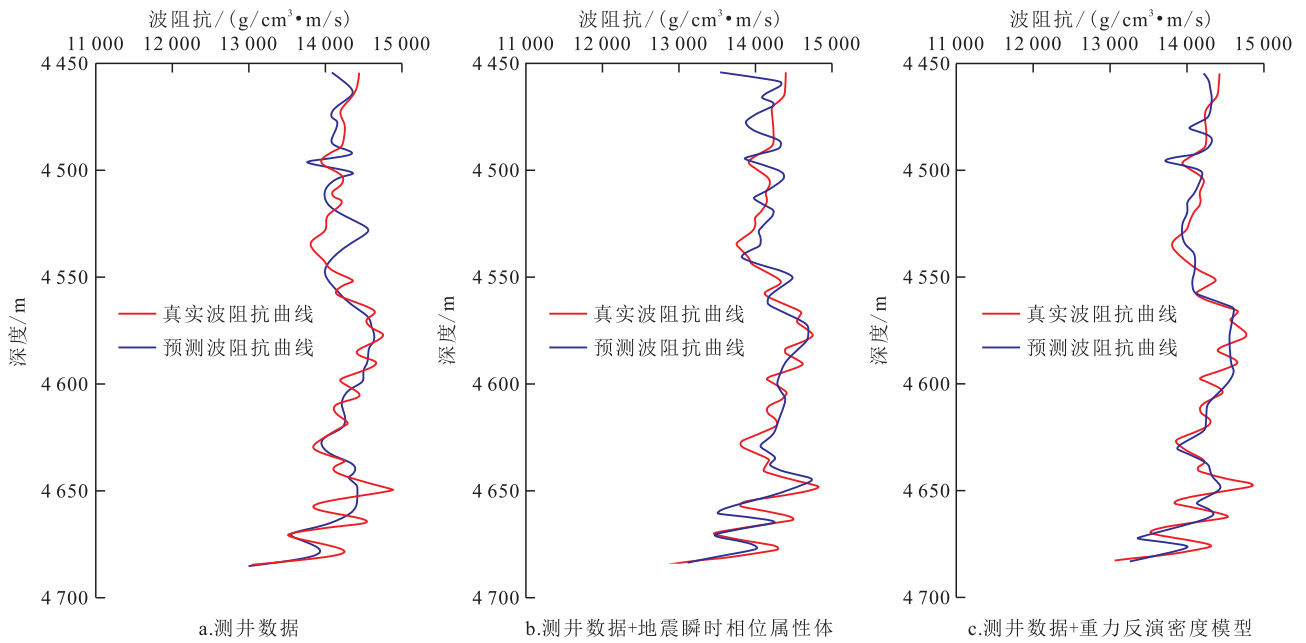


图8 ZS1井不同标签训练结果对比

Fig.8 Comparison of training results with different labels for well ZS1

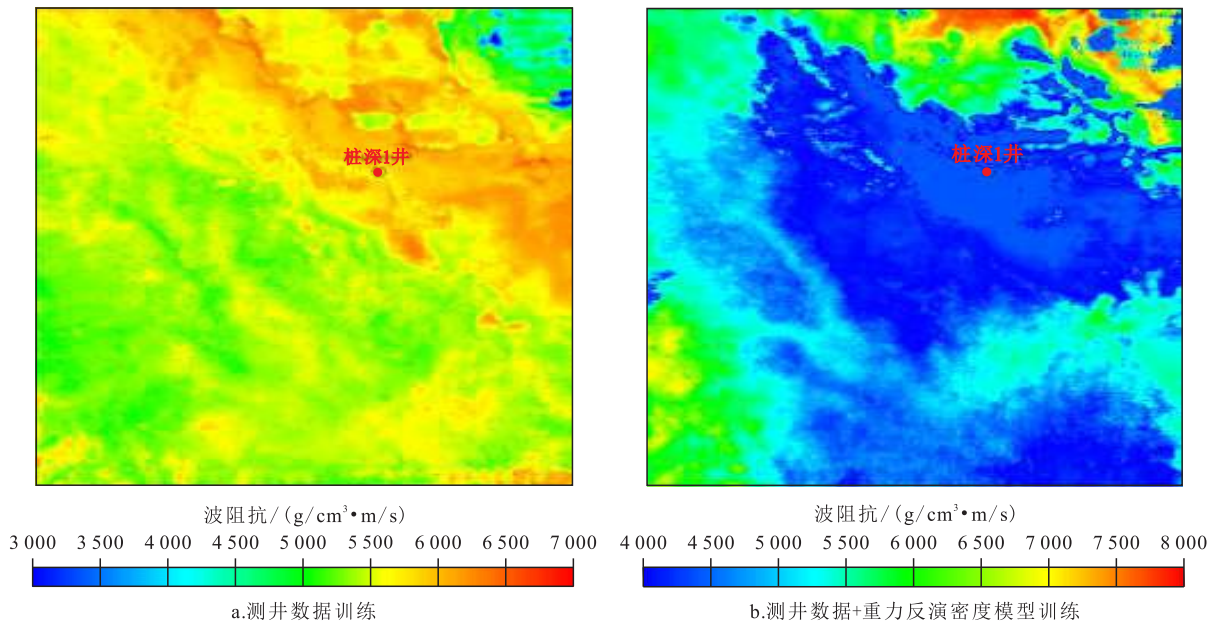


图9 初始模型沿目标层位的水平切片对比

Fig.9 Comparison of results of horizontal slices along target horizon

带上,而在图9b则位于相对低阻抗条带上,该目标层为气层,且在真实波阻抗曲线上为相对低波阻抗,因此测井数据+重力反演密度模型训练的神经网络预测建立的初始模型更加合理可靠,从而证明了该方法引入密度模型为建立初始模型提供了可靠有效的横向变化趋势。

### 3 实例应用

为了验证该技术的有效性,选择准噶尔盆地腹

部某地震工区,建立地震反演初始模型,该区目标层系埋深超过6 000 m,只有一口井钻至目标层系。采用常规的稀疏脉冲反演方法,分别用测井数据训练和加入重力反演密度模型训练2种方法建立初始模型,开展约束反演,并对反演结果进行对比分析,反演结果如图10所示。

为便于地质分析将图10b反转色标并三维显示,如图11所示。该区陡坡带山高源足、坡陡水深,发育进积型短轴扇三角洲;缓坡带源少坡缓,发育退积型局限扇三角洲;洼陷带陆源输入较少,云质

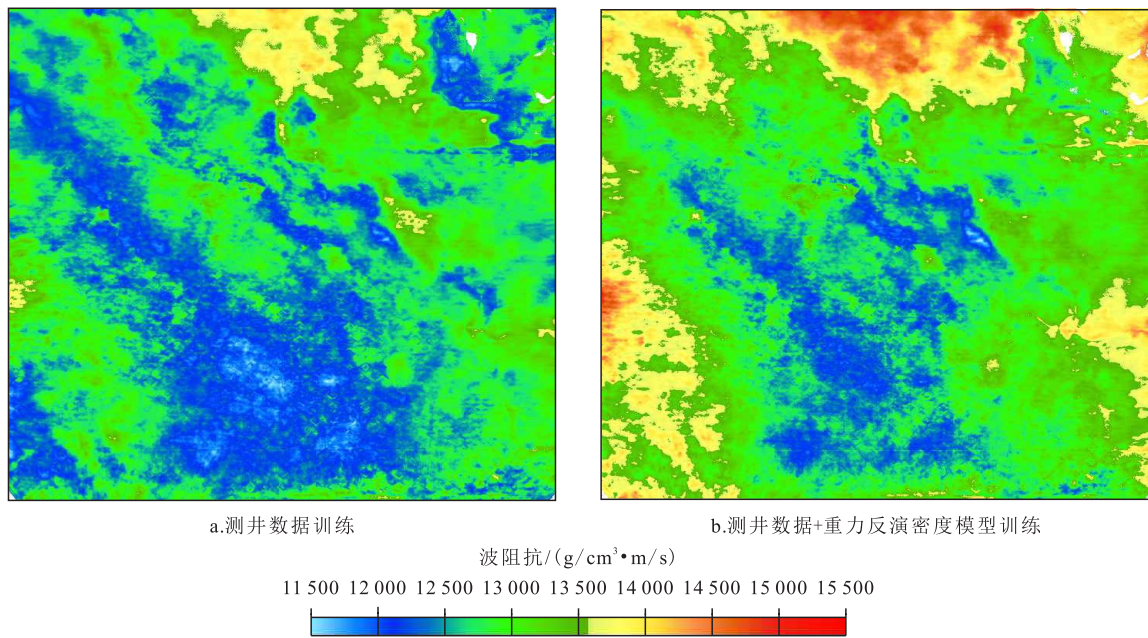


图10 初始模型约束反演结果对比  
 Fig.10 Comparison of inversion results

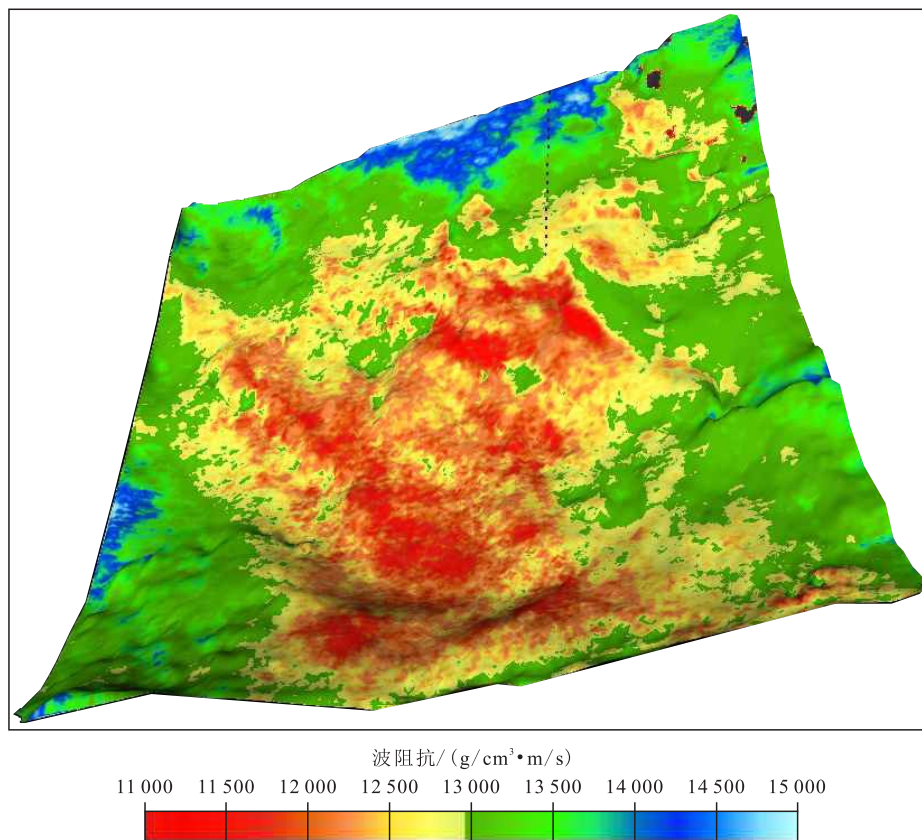


图11 测井数据+重力反演密度模型预测的储层分布空间显示  
 Fig.11 Reservoir space distribution predicted by logging data and gravity inversion

粉细砂岩-云质泥页岩广覆式沉积,面积广、厚度大。由图11可知,该套储层向斜坡层层超覆,发育扇三角洲砂体,洼陷带广泛分布,且厚度大,与现有地质认识和钻井结果较吻合,因此认为测井数据+重力反演技术的反演结果描述的砂体较为准确。

#### 4 结论

超深层储层预测是目前勘探的热点和难点。地震资料分辨率低,难以建立有效的用于地震反演



的初始模型是制约应用地震资料进行储层预测的瓶颈。突破了单一地震资料应用于储层预测的局限,基于重力反演得到的密度模型建立起地震反演的初始模型。基于高斯径向基函数进行重力反演,提高了重力反演分辨率;基于神经网络训练,将重力反演结果作为训练标签,提高了初始模型的可靠性,同时克服了测井约束的限制,为地震反演提供了可靠的基础。通过实际资料对该技术进行测试,并在准噶尔盆地腹部开展了初步尝试,预测结果符合当前地质认识,证明该技术具有较大的应用价值和潜力,可以为超深层勘探提供有效的技术支持。

### 参考文献

- [1] 王大兴,曾治平,胡海燕,等.准噶尔盆地中部下乌尔禾组深层陆相页岩孔隙结构分形特征及其地质意义[J].油气地质与采收率,2024,31(1):23-35.  
WANG Daxing, ZENG Zhiping, HU Haiyan, et al. Fractal characteristics of pore structure of deep continental shale of Lower Wuerhe Formation in central Junggar Basin and its geological significance [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2024, 31(1): 23-35.
- [2] 李宗浩,侯磊,李卉,等.准噶尔盆地石西凸起晚石炭世火山岩储层发育影响因素[J].油气地质与采收率,2023,30(4):33-45.  
LI Zonghao, HOU Lei, LI Hui, et al. Influencing factors of late Carboniferous volcanic reservoir development in Shixi uplift, Junggar Basin [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2023, 30(4): 33-45.
- [3] 张关龙,王继远,王斌,等.准噶尔盆地腹部深层—超深层碎屑岩储层发育特征与孔隙演化定量表征[J].石油实验地质,2023,45(4):620-631.  
ZHANG Guanlong, WANG Jiyuan, WANG Bin, et al. Development characteristics and quantitative characterization of pore evolution of deep and ultra-deep clastic reservoirs in the hinterland of the Junggar Basin [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2023, 45(4): 620-631.
- [4] 李建忠,王小军,杨帆,等.准噶尔盆地中央坳陷西部下组合油气成藏模式及勘探前景[J].石油与天然气地质,2022,43(5):1 059-1 072.  
LI Jianzhong, WANG Xiaojun, YANG Fan, et al. Hydrocarbon accumulation pattern and exploration prospect of the structural traps in lower play of the western Central Depression in the Junggar Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2022, 43(5): 1 059-1 072.
- [5] 匡立春,支东明,王小军,等.新疆地区含油气盆地深层——超深层成藏组合与勘探方向[J].中国石油勘探,2021,26(4):1-16.  
KUANG Lichun, ZHI Dongming, WANG Xiaojun, et al. Oil and gas accumulation assemblages in deep to ultra-deep formations and exploration targets of petroliferous basins in Xinjiang region [J]. China Petroleum Exploration, 2021, 26(4): 1-16.
- [6] 王逸宸.重力等维聚焦反演研究[M].北京:中国地质大学(北京),2014.  
WANG Yichen. Study of equidimension focusing inversion of gravity data [M]. Beijing: China University Of Geosciences (Beijing), 2014.
- [7] 秦朋波,黄大年.重力和重力梯度数据联合聚焦反演方法研究[J].地球物理学报,2016,59(6):2 203-2 224.  
QIN Pengbo, HUANG Danian. Integrated gravity and gravity gradient data focusing inversion [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2016, 59(6): 2 203-2 224.
- [8] 彭国民,刘展,于会臻,等.基于柯西分布约束和快速近端目标函数优化的三维重力反演方法[J].地球物理学报,2018,61(12):4 934-4 941.  
PENG Guomin, LIU Zhan, YU Huizhen, et al. 3D gravity inversion based on Cauchy distribution constraint and fast proximal objective function optimization [J]. Chinese Journal of Geophysics (in Chinese), 2018, 61(12): 4 934-4 941.
- [9] 刘洁,张建中,江丽,等.基于高阶多项式密度函数的重力反演[J].石油地球物理勘探,2019,54(3):700-708.  
LIU Jie, ZHANG Jianzhong, JIANG Li, et al. Gravity data inversion using high-order polynomial function of density contrast varying with depth [J]. Oil Geophysical Prospecting, 2019, 54(3): 700-708.
- [10] FERNANDO J S, SILVA DIAS. 3D gravity inversion through an adaptive-learning procedure [J]. Geophysics, 2009, 74(3): 1M1-J54.
- [11] SUN J J, LI Y G. Inversion of surface and borehole gravity with thresholding and density constraints [J]. SEG Technical Program Expanded Abstracts, 2010, 74(3): 4 453.
- [12] 耿美霞,杨庆节.应用RBF神经网络反演二维重力密度分布[J].石油地球物理勘探,2013,48(4):651-657.  
GENG Meixia, YANG Qingjie. 2-D density inversion with the RBF neural network method [J]. Oil Geophysical Prospecting, 2013, 48(4): 651-657.
- [13] REN Z Y, ZHONG Y Y, CHEN C J, et al. Gravity anomalies of arbitrary 3D polyhedral bodies with horizontal and vertical mass contrasts up to cubic order [J]. Geophysics, 2018, 83(1): G1-G13.
- [14] WU L. Fourier-domain modeling of gravity effects caused by polyhedral bodies [J]. Journal of Geodesy, 2018, 93: 635-653.
- [15] 周印明,戴世坤,李昆,等.复杂形体重磁位场三维高效高精度数值模拟[J].石油地球物理勘探,2020,55(5):1 149-1 159, 1 168.  
ZHOU Yinming, DAI Shikun, LI Kun, et al. Three-dimensional high-efficiency and high-precision numerical simulation of gravity and magnetic potential fields of complex body [J]. Oil Geophysical Prospecting, 2020, 55(5): 1 149-1 159, 1 168.
- [16] 谷文彬,陈清礼,王余泉,等.饶阳凹陷虎8北潜山重力三维松约束反演[J].石油地球物理勘探,2016,51(6):1 219-1 226.  
GU Wenbin, CHEN Qingli, WANG Yuquan, et al. Part-constrained 3D gravity inversion for the Hubabei buried hill in

- Raoyang Sag [J]. *Oil Geophysical Prospecting*, 2016, 51(6): 1 219-1 226.
- [17] 李海龙,吴招才,纪飞,等.南海北部地壳密度结构:基于约束三维重力反演[J].*地球物理学报*,2020,63(5):1 894-1 912.  
LI Hailong, WU Zhaocai, JI Fei, et al. Crustal density structure of the northern South China Sea from constrained 3-D gravity inversion [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2020, 63(5): 1 894-1 912.
- [18] 王泰涵,马国庆,熊盛青,等.空-地-井重力异常正则化协同密度反演方法[J].*地球物理学报*,2020,63(7):2 737-2 750.  
WANG Taihan, MA Guoqing, XIONG Shengqing, et al. Joint regularized density inversion method of airborne, surface and borehole gravity anomaly data [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2020, 63(7): 2 737-2 750.
- [19] FAINSTEIN R F, ROY L, BANIK, et al. Seismic constrained gravity inversion for sub-basalt exploration in West Coast, India [C]. Amsterdam: Society of Petroleum Engineers-71st European Association of Geoscientists and Engineers Conference and Exhibition, 2009.
- [20] MARTIN R, GIRAUD J, OGARKO V, et al. Three-dimensional gravity anomaly data inversion in the Pyrenees using compressional seismic velocity model as structural similarity constraints [J]. *Geophysical Journal International*, 2021, 225(1): 1 063-1 085.
- [21] 索孝东,张生,陈德炙.用重磁电异常信息模式识别石炭系火山岩岩性——以准噶尔盆地陆东地区为例[J].*新疆石油地质*, 2011,32(3):318-320.  
SUO Xiaodong, ZHANG Sheng, CHEN Dezhi. Identification of the carboniferous volcanic lithology with gravitational-magnetic-electric abnormal information pattern-an example from eastern Luliang uplift area in Junggar Basin [J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 2011, 32(3): 318-320.
- [22] 杨辉,文百红,戴晓峰,等.火山岩油气藏重磁电震综合预测方法及应用[J].*地球物理学报*,2011,54(2):286-293.  
YANG Hui, WEN Baihong, DAI Xiaofeng, et al. Comprehensive prediction of hydrocarbon deposits in volcanic rock by gravity, magnetic, electrical and seismic data and its application [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2011, 54(2): 286-293.
- [23] 张交东,杨晓勇,刘成斋,等.大别山北缘深部结构的高精度重磁电震解析[J].*地球物理学报*,2012,55(7):2 292-2 306.  
ZHANG Jiaodong, YANG Xiaoyong, LIU Chengzhai, et al. The fine deep structure of the northern margin of the Dabie Orogenic Belt from gravity-magnetic-electrical-seismic combination survey [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2012, 55(7): 2 292-2 306.
- [24] 陈学国,相鹏.山前带重磁电震综合构造建模方法在准噶尔盆地哈山地区的应用[J].*中国石油大学学报:自然科学版*,2017,41(3):65-74.  
CHEN Xueguo, XIANG Peng. Application of gravity, magnetic, electric and seismic comprehensive geologic modeling method for piedmont zone of Hala' alate mountain in Junggar Basin [J]. *Journal of China University of Petroleum: Edition of Natural Science*, 2017, 41(3): 65-74.
- [25] 林珍,张莉,钟广见.重磁震联合反演在南海东北部地球物理解释中的应用[J].*物探与化探*,2013,37(6):968-975.  
LIN Zhen, ZHANG Li, ZHONG Guangjian. The application of gravity magnetic seismic joint inversion to the comprehensive interpretation of geophysics in the Northern South China Sea [J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2013, 37(6): 968-975.

编辑 单体珍