

文章编号:1673-9469(2026)02-0084-09

DOI:10.3969/j.issn.1673-9469.2026.02.010

基于相对波阻抗约束下的地质统计学构建低频模型的研究 ——以GW区块浅层高速砾岩储层反演为例

曾亚丽¹, 刘波^{2*}, 赵玉华¹, 蒋秀英¹, 郝金鑫¹

(1. 中国石油长庆油田分公司勘探开发研究院, 陕西 西安 710016;

2. 河北工程大学 地球科学与工程学院, 河北 邯郸 056038)

摘要: 为提高低幅度构造储层圈闭识别和储层预测精度, 提出了一种运用相对波阻抗结合地质统计学方法构建低频模型的新方法。该方法利用地震数据提取地层相对波阻抗信息, 将其作为低频模型的约束条件, 采用协同克里金插值和序贯高斯模拟等地质统计学方法, 基于地质参数的空间相关性和变异特征进行插值优化, 进而构建低频模型并开展反演。通过在实际工区的应用, 证实了该方法的有效性。研究结果表明: 与传统方法相比, 该文所构建的低频模型在匹配测井资料、刻画构造形态、预测储层发育等方面具有明显优势, 与实际地质情况的吻合度高达85%以上。同时, 研究也揭示了方法的局限性, 如受地震数据分辨率影响, 对薄层预测精度有待提高。

关键词: 相对波阻抗约束; 地质统计学; 低频波阻抗模型; 克里金插值; 序贯高斯模拟; 块状砾岩反演

中图分类号: P631.4

文献标识码: A

Study on the Construction of a Low-Frequency Model Based on Geostatistics Under Constrained Relative Acoustic Impedance: Taking the Inversion for High-Velocity Conglomerate Reservoirs in Shallow Layer of GW Block as an Example

ZENG Yali¹, LIU Bo^{2*}, ZHAO Yuhua¹, JIANG Xiuying¹, HAO Jinxin¹

(1. Research Institute of Exploration and Development, Changqing Oilfield Company of China National Petroleum Corporation, Xi'an, Shaanxi 710016, China; 2. School of Earth Science and Engineering,

Hebei University of Engineering, Handan, Hebei 056038, China)

Abstract: To improve low-amplitude structural reservoir trap identification and reservoir prediction accuracy, a new method of constructing low-frequency model combining constrained relative acoustic impedance with geostatistics is put forward. In this method, relative acoustic impedance information is extracted from seismic data and used as a constraint for the low-frequency model. By employing geostatistical methods such as Kriging interpolation and sequential Gaussian simulation interpolation optimization is performed based on the spatial correlation and variation characteristics of geological parameters. A low-frequency model is subsequently constructed and used for inversion research. The effectiveness of this method is demonstrated through its application in an actual work area. The results show that, compared with traditional methods, the low-frequency model constructed in this study has significant advantages in matching well logging data, depicting structural morphology, and predicting reservoir develop-

收稿日期: 2024-10-29 修回日期: 2024-11-07

基金项目: 煤炭资源与安全开采国家重点实验室开放课题资助项目(SKLCRSM21KFA04)

第一作者: 曾亚丽(1990—), 女, 湖北荆门人, 硕士, 工程师, 从事地震资料综合解释与储层预测方面的研究。

* 通信作者: 刘波(1983—), 男, 吉林通化人, 博士, 讲师, 从事地震反演与储层预测方面的研究。

ment. Its agreement with the actual geological conditions is over 85%. Moreover, the present study also reveals the limitations of this method. For example, due to the influence of seismic data resolution, the prediction accuracy for thin layers needs to be improved.

Key words: constrained relative impedance; geostatistics; low-frequency acoustic impedance model; Kriging interpolation; sequential Gaussian simulation; inversion for block conglomerates

准确预测储层空间展布是油气勘探开发的关键。近年来,鄂尔多斯盆地天环坳陷中部的耿湾地区长 8 储层勘探取得了重大突破。该区域低幅度构造圈闭是非常重要的含油圈闭类型,但浅层大套块状砾岩的存在给该区圈闭评价带来一定风险。这些高速砾岩不仅会导致下伏构造反射,出现“假构造”现象,而且砾岩横向厚度的变化会导致下伏构造高点偏移,增加圈闭预测的不确定性。因此,准确刻画砾岩的空间展布特征对该地区油气预测至关重要。

常规地震解释方法很难精确刻画砾岩空间展布特征。由于浅层砾岩区地震资料信噪比低,品质较差,且高速砾岩对地震波能量具有强烈的吸收和散射作用,因此,很难从地震剖面上直接识别砾岩厚度的纵向变化。地震波阻抗反演通过分析地下介质的物性差异,为砾岩预测提供了更可靠的方法。反演的可靠性取决于地震资料的主频、频带宽度以及低频模型精度。其中,低频地质模型作为描述大尺度地质体的背景模型,其构建方法一直是地球物理研究的热点和难点。国内外学者探索了诸多方法,如常数低频模型^[1]、迭代法低频模型^[2-4]、分级相控反演方法^[5-8]、层速度约束方法^[9-10]、层序地层框架约束井插值方法^[11-12]、基于立体层析反演速度约束方法^[13]以及应用速度趋势约束构建低频模型的方法^[14]等。上述理论驱动方法,在一定条件下取得了良好效果,但存在适用范围窄、精度有限等问题。针对研究区块状砾岩发育的特殊地质情况,常规测井插值方法构建的低频模型精度不足,在井点处极易产生“牛眼”异常,导致低频模型与实际地质特征不符。为了建立更符合实际地质特点的低频模型,本文提出一种综合利用相对波阻抗约束与地质统计学原理的新方法。该方法既考虑了地震反演的横向变化信息,又融入了地质统计插值的平滑性和相关性,以期为该区块状砾岩预测提供新的思路和更高精度的低频基础模型。研究成果对指导该区油气勘探部署、提高勘探成功率具有重要意义。

1 相对波阻抗约束和地质统计学方法

1.1 相对波阻抗约束原理

地震波阻抗是地球物理学中的重要参数,反映了地下介质的弹性差异,常用来描述地层岩性、物性等属性。相对波阻抗约束的基本思想是:利用地震反射数据评估地下介质的物理属性。当地震波在不同波阻抗的地层界面反射时,会产生特征反射系数。通过分析地震道集的振幅和相位信息,并利用地震反演技术,可以估算地下介质的纵波阻抗分布,进而揭示储层的空间展布规律。一般采用确定性反演方法求取最佳波阻抗模型,使该模型合成的地震记录与实际地震数据吻合。反演目标函数可表示为

$$[\sum (r_i)^p + \lambda^q \sum (d_i - s_i)^q + \alpha^2 \sum (t_i - z_i)^2] \rightarrow \min \quad (1)$$

式中: r_i 为地震反射系数,表达式为 $r = \frac{z_{i+1} - z_i}{z_{i+1} + z_i}$; z_i 代表地层的声波阻抗值, $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$; d_i 为地震数据; s_i 为合成记录地震数据; t_i 为输入的波阻抗趋势模型; λ 为残差权重因子; α 为趋势权重因子; p 、 q 为 L 模因子; i 为采样点编号。式(1)的值由 $\sum (r_i)^p$ 代表反射系数序列的 L_p 模和, $\lambda^q \sum (d_i - s_i)^q$ 为残差加权和, $\alpha^2 \sum (t_i - z_i)^2$ 代表低频的趋势共同组成。

式(1)表明,合理的低频背景模型是实现波阻抗精确反演的关键要素^[15]。然而,由于地震数据中低频信息匮乏,即便综合运用测井数据、层速度等信息,也难以构建可靠的背景模型。为补偿地震数据中的低频成分,本文提出利用相对波阻抗属性体作为约束信息,并运用地质统计学方法指导低频模型的空间插值。相对波阻抗体通过初始反演得到,虽然缺少低频和长波长成分,但能够反映地层的横向变化趋势,对低频模型的构建具有重要指示作用。

1.2 地质统计学方法

地质统计学是通过分析地质参数的空间相关

性,利用已知样本对未知区域进行估值的学科,是处理有限离散数据、构建连续模型的有效方法。在石油地质研究领域,地质统计学被广泛应用于储层参数建模,如孔隙度、渗透率、岩性等。地质统计学基本假设为地质参数在空间上具有一定的相似性和变异性,即“相似位置的地质特征更可能相似”。通过计算变差函数,可以量化参数的空间变异特征,进而指导插值和模拟工作。

(1) 克里金插值

克里金插值是地质统计学的代表性方法之一,通过对样本数据进行线性组合,实现对未知点进行无偏最优估值。克里金方法利用三维空间的变差函数分布特征,根据空间场内某个未知点周围的已知数据,对未知区域进行预测^[16]。克里金理论由法国教授乔治·斯马瑟伦在克里格算法的基础上总结升华而来。应用克里金法对空间场进行预测时,需将空间场视为一个随机场。具体而言,若存在一个指数集上的随机过程,且该指数集构成一个拓扑空间,则这个随机过程称为随机场^[17]。随机场所对应的指数集通常为地理坐标,场内每一个点的取值均为随机变量,且服从特定的概率分布^[17]。

目前,克里金插值方法琳琅满目,本文根据具体地质条件,采用协同克里金方法开展研究,该方法利用多种变量信息。设向量 $Z(x) [Z_1(x), \dots, Z_n(x)]$, 其中 $Z_1(x), \dots, Z_n(x)$ 表示在 x 处不同变量的属性值。当样本点为 x_1, \dots, x_n , 且对应的属性值为 $Z(x_1), \dots, Z(x_n)$ 时,协同克里金公式为

$$Z^*(x) = \sum_i^n Z(x_i) \Gamma_i \quad (2)$$

式中: Γ_i 代表权重向量。

在确定 Γ_i 时,设 x 位置处的随机变量为 $Z_j (j=1, 2, \dots, m)$, 根据无偏估计和最小方差条件,可得到线性方程组,求解待定权重向量。协克里金插值方法也是基于区域化变量的二阶平稳和内蕴假设条件运行的。协变异函数定义为

$$\gamma_{jk} = \frac{1}{2} \text{Cov} \{ Z_j(x+h) - Z_j(x) \times Z_k(x+h) - Z_k(x) \} \quad (3)$$

数据的协同克里金插值方法与普通克里金插值方法在原理上基本一致。与普通克里金插值相比,协同克里金方法考虑的信息更为丰富,在普通克里金插值的基础上引入了其他相关的协变量。在数据插值过程,本研究引入地震阻抗等属性进行约束。由于引入新的信息用于属性插值,因此该方法相较于仅采用单一属性插值的普通克里金方法具有更显著的优势。

(2) 序贯高斯模拟

序贯高斯模拟是一种生成多变量高斯场的算法,适合任意类型的协方差函数,并且简单快速^[18]。通常情况下,观测得到的实际数据若不满足正态分布,需要对其进行正态变换,令其满足高斯分布条件,插值后再进行反变换^[19]。求解时,每次对视区域变化量 $Z(x)$ 的取值,会求得函数 $F(x)$ 的一次随机结果,以保证所有解都服从已知分布。但在实际的地质条件下,得到的区域变化量分布并不是简单的数学期望模型,因此,在蒙特卡洛方法中加入了条件概率密度函数约束,即对于未知点 X_m , 其累积条件概率密度函数由已知数据 $Z(x)$ (设其个数为 n) 以及前 $m-1$ 个位置已模拟的数据共同构建。因此,在应用序贯高斯模拟方法插值时,首先要定义所有网格点处的联合分布模型,然后在逐步求解过程中更新累积概率密度函数 $F(x)$ ^[20]。

2 低频模型构建流程

为从数据源上降低波阻抗低频模型误差,必须确保测井数据的质量。因此,在低频模型建立准备阶段,需要对测井数据进行曲线校正、标准化处理、岩性解释及岩石物理分析等,然后通过常规确定性反演流程获取相对波阻抗数据,进而结合地质统计学方法建立低频模型。低频模型建立技术思路如图1所示。

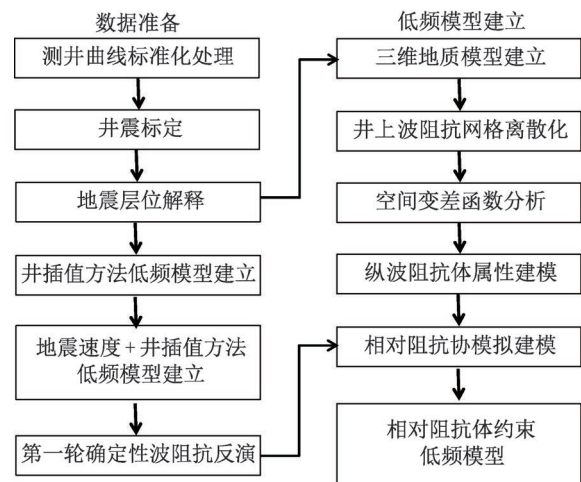


图1 低频模型建立流程图

Fig. 1 Flow chart for constructing a low-frequency model

2.1 常规低频模型构建

2.1.1 井数据分析

井数据是低频模型的基本数据之一,常规低频模型通常依赖测井曲线插值实现。首先,对工

区内井进行标定,将深度域测井数据和时域地震数据相关联,确保井震关系一致,以保证后续的测井曲线插值在合理范围内进行。部分井的标定结

果如图 2、图 3 所示。由图可以看出,测井数据与地震数据的相关性达 80% 以上,这表明测井数据与地震数据的井震标定关系良好,时深关系合理。

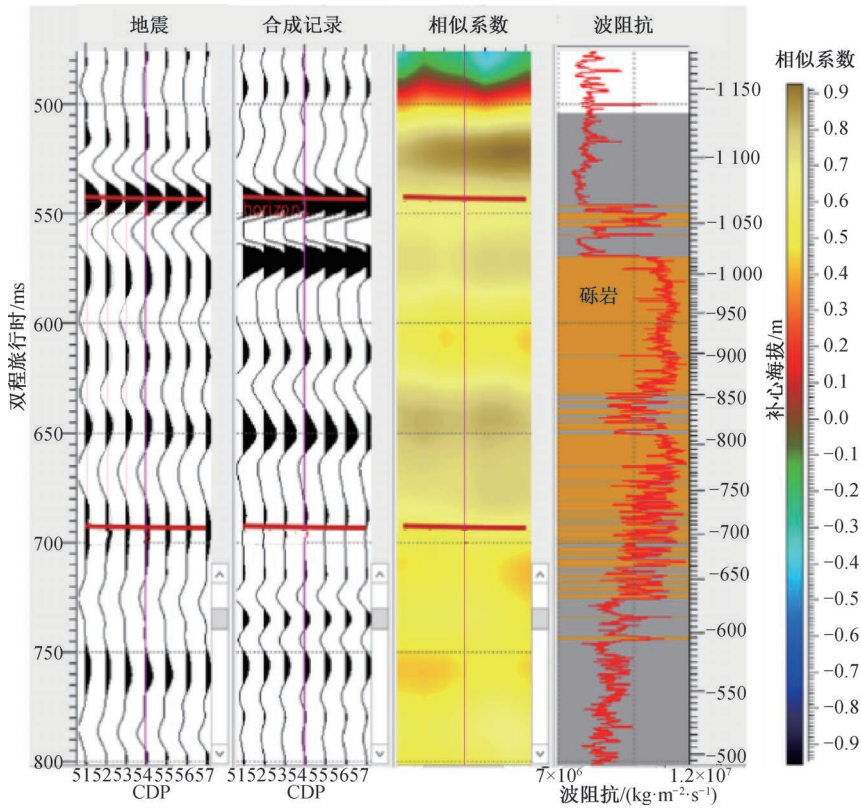


图 2 L139 井标定结果

Fig. 2 Calibration results of well L139

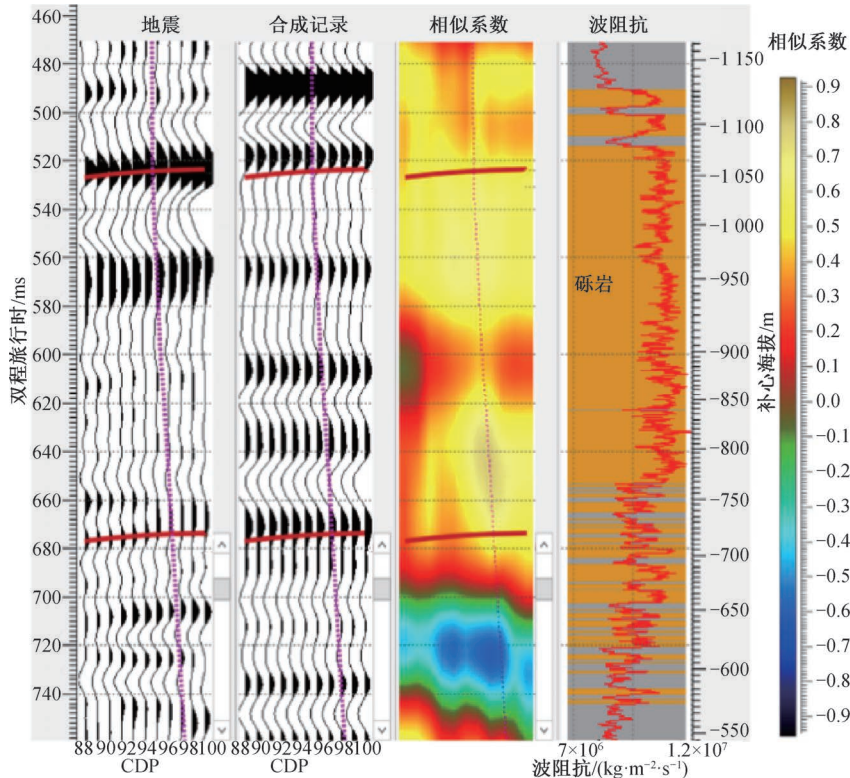


图 3 D25 井标定结果

Fig. 3 Calibration results of well D25

2.1.2 井数据联合地震速度构建低频模型

通过井震标定确定时深关系,在此基础上,以地质层序层位作为地层格架约束,运用克里金内插外推的插值方法构建低频模型。由图4可见,井插值的方法在井孔分布均匀且钻井数量合理的区域应用较广。然而,不同插值算法之间存在较大差异,在构建低频模型时,容易造成局部井点数值异常,即“牛眼”现象。在强非均质性的地质环境下,这种异常现象会使井上的地质特征被误判到其他区域。

为了避免上述井插值低频模型的误判,在低频模型优化中引入地震速度。对于地震勘探而言,地震速度是最重要的因素,可以客观反映区域地质压实趋势特征。将地震速度作为约束条件应用于常规井数据插值构建的低频模型中,可以减少局部井数据插值造成的异常,进而提高低频模型的可靠性(图5)。但需要注意的是,地震处理获得的 seismic 速度属于甚低频信息,频率仅为0~2 Hz,难以满足常规非宽频地震数据低频模型所需的频段范围。

2.2 基于相对波阻抗约束结合地质统计学建立低频模型

2.2.1 相对波阻抗的反演

在忽略低频信息的情况下,相对波阻抗反演结果可以反映地质沉积特征。因此,基于仅由井插值方法建立的低频模型开展第一轮确定性反演,可得到相对波阻抗反演体,该数据体可作为优化低频模型的初始数据。图6为相对波阻抗属性模型。图中黄红色区域代表相对负值的波阻抗,表明该地层为相对低阻抗值,主要对应泥岩层,空间分布较广;蓝绿色区域为相对波阻抗正值,表明该地层为相对高波阻抗值,分布较局限,对应砾岩层。该模型可以定性反映高速砾岩发育位置,但是受限于确定性反演的分辨率而不能准确刻画真实厚度。该相对波阻抗模型从三维空间整体上反映研究区高速砾岩空间分布的地质特征,为后续采用地质统计学方法建立低频模型提供了基础数据。

2.2.2 地质统计学的模拟

变差函数是地质统计学建模的核心,用于反映

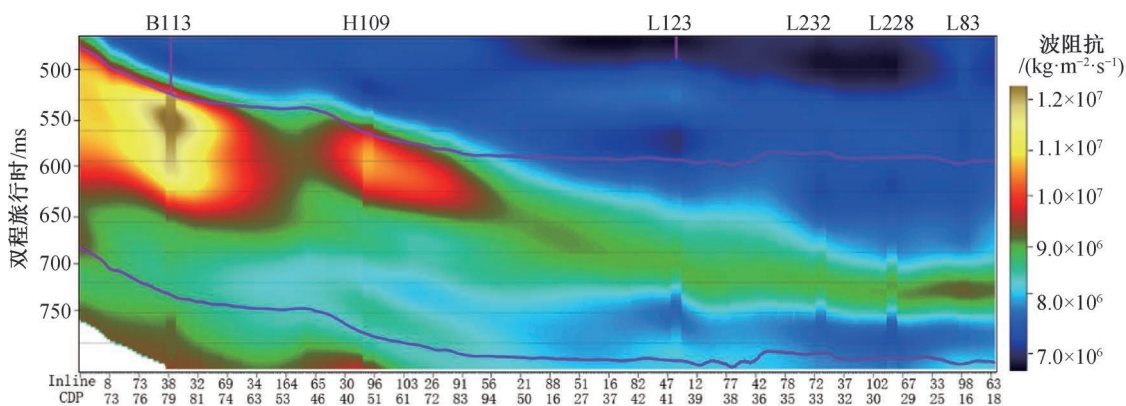


图4 井插值波阻抗低频模型

Fig. 4 Low-frequency acoustic impedance model based on well interpolation method

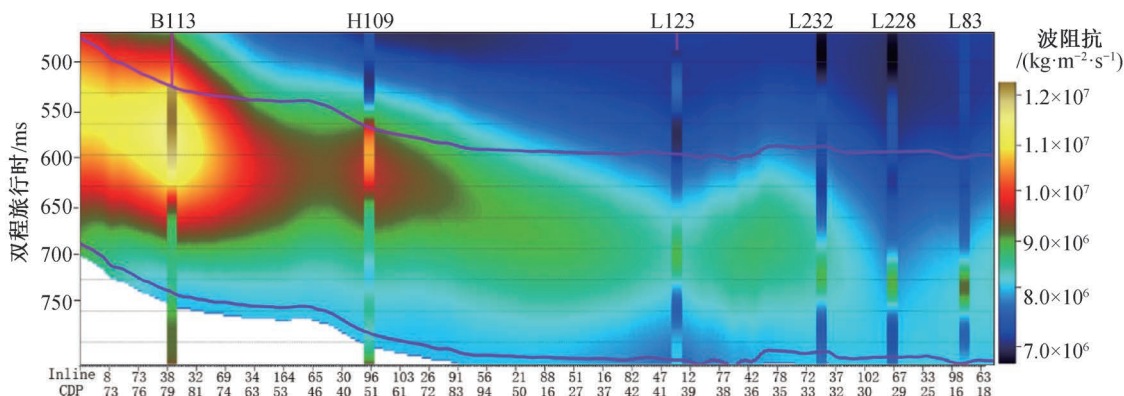


图5 地震速度约束波阻抗低频模型

Fig. 5 Low-frequency acoustic impedance model constrained by seismic velocity

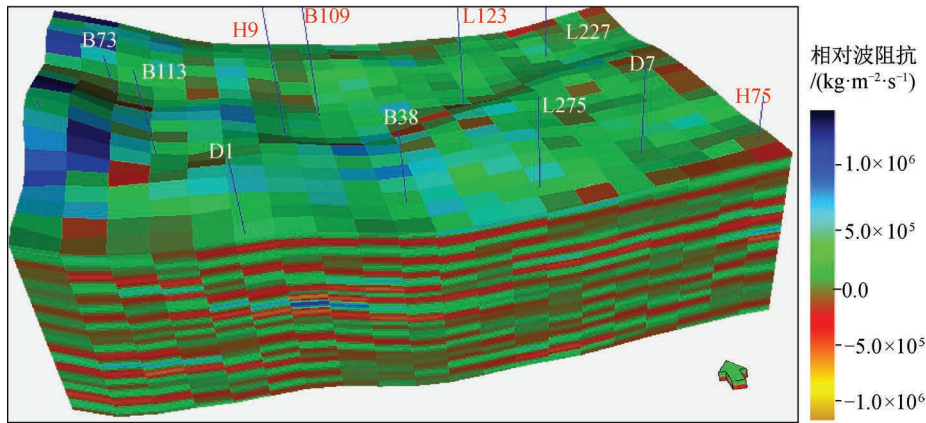


图 6 相对波阻抗属性体图

Fig. 6 Relative acoustic impedance attribute volume

目标地质体或储层的弹性、物性等属性在三维空间的相互联系及变化规律。变差函数由变程、基台值和拱高组成。垂向变程和横向变程描述了地质体的空间变化及数据之间相关性。变程的选择需基于对地质体或储层的认识,当变程较小时,意味着地质体空间变化较大,沉积相变化剧烈,呈现出非均质性强的情况。若设置的值超出变差函数变程范围,则该区域内数据之间不具备相关性。在设定变程时,平面主变程方向反映沉积物源方向。因此,合理设置变差函数是保证地质统计学随机建模成功的关键。研究区根据多井资料岩性厚度统计,获得比较准确的垂向变程。平面变差函数则通过波阻抗属性进行变差函数分析,主变程 16 300 m,次变程 10 500 m。

2.2.3 相对波阻抗约束结合地质统计学的低频模型

结合统计学变差函数的模拟参数,以相对波阻抗属性体作为协变量,插值构建低频波阻抗模型。对比建模过程中加入相对波阻抗体空间约束前后的结果,在地质统计学建模过程中引入相对

阻抗作为协变量,能够显著改善扰动属性插值效果,同时兼顾地震数据特征和井数据硬约束。图 7 是基于相对阻抗属性体协模拟,应用地质统计学方法建立的波阻抗低频模型。与图 4 和图 5 对比可知,应用地质统计学方法建立的低频模型能更好地体现三维空间的相似性与连续性。通过构建相对波阻抗协模拟,能够提供地震属性表征的岩性横向连续性信息,填补因数据稀疏而缺失的岩性特征,从而提供了一种平滑且无偏离的插值手段,减少地质模型的不确定性,建立更符合实际地质情况的低频模型,为后续全频带波阻抗反演提供可靠的模型基础。

3 低频模型结果验证分析

为了评估所构建低频模型的准确性和可靠性,本文采用两种方法对模型进行验证和对比分析。首先,对不同低频模型的反演结果进行对比分析。图 8 是基于井内插方法建立的低频模型的反演结果,图 9 是基于地震速度结合井内插方法建

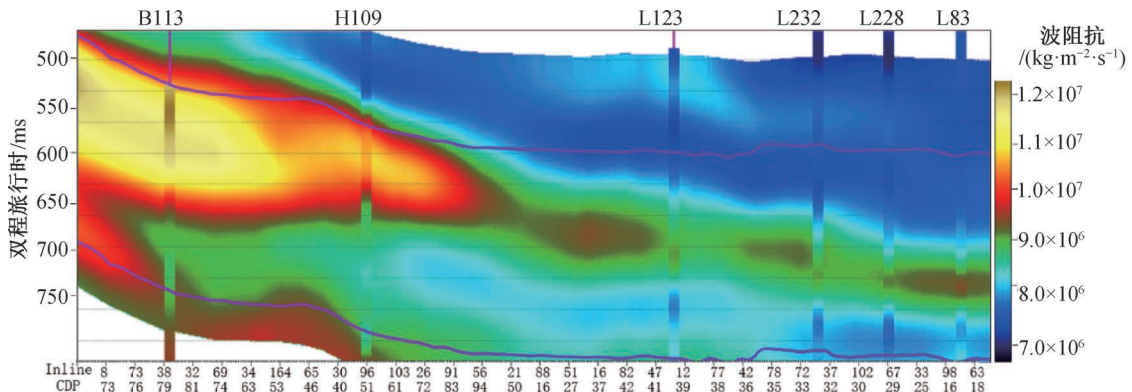


图 7 相对阻抗约束建立波阻抗低频模型

Fig. 7 Low-frequency acoustic impedance model constructed with constrained relative acoustic impedance

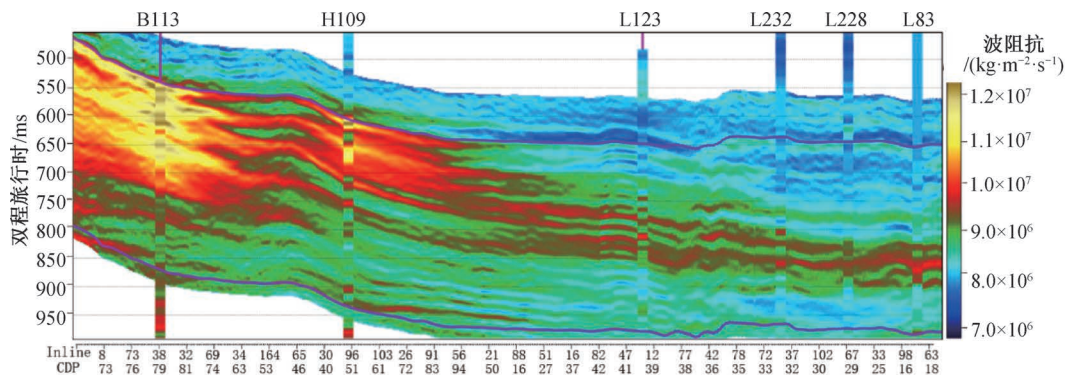


图 8 基于井内插方法低频模型的反演剖面图

Fig. 8 Inversion profile based on low-frequency model constructed using well interpolation method

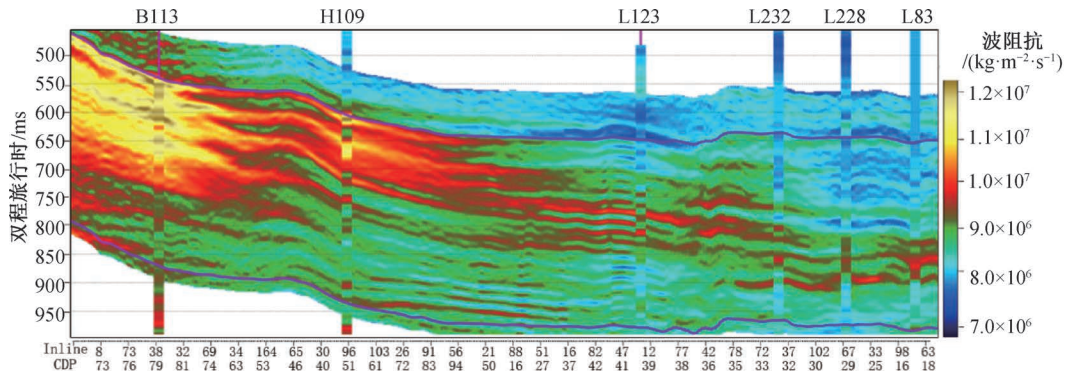


图 9 基于地震速度结合井内插方法低频模型的反演剖面图

Fig. 9 Inversion profile based on low-frequency model constructed using seismic velocity combined with well interpolation method

立的低频模型的反演结果,图 10 是基于相对波阻抗约束地质统计学方法建立的低频模型的反演结果。通过对比这些反演结果可以看出,基于相对波阻抗约束结合地质统计学方法建立低频模型的反演结果,在地层界面、连续性以及垂向分辨率方面具有明显优势,更符合该区域已知的地质认识。其次,利用油田钻井和测井资料对反演结果进行验证。通过与油田地质专家讨论和测井数据的对比,发现基于相对波阻抗约束低频模型的反演结果与实际地质情况吻合度最高,经盲井验证,吻合率在 85% 以上。由图 11 可以看出,块状砾岩的预

测结果与井上解释结果吻合很好,绝对误差在 10 m 以下,平均相对误差仅为 3%。这表明所构建低频模型具有较高的精度和可靠性。研究区高速砾岩引起的时间域反射波旅行时较短,导致构造形态变形。通过浅层高速砾岩填充,深度域成像构造形态准确。

需要指出的是,受地震数据分辨率影响,厚度小于 20 m 的砂砾岩预测误差相对较大。图 12 是预测砾岩厚度与井上实际厚度的对比图,可以看出,薄层预测仍存在一定偏差。这是目前所用方法的局限性,有待后续研究进一步改进。

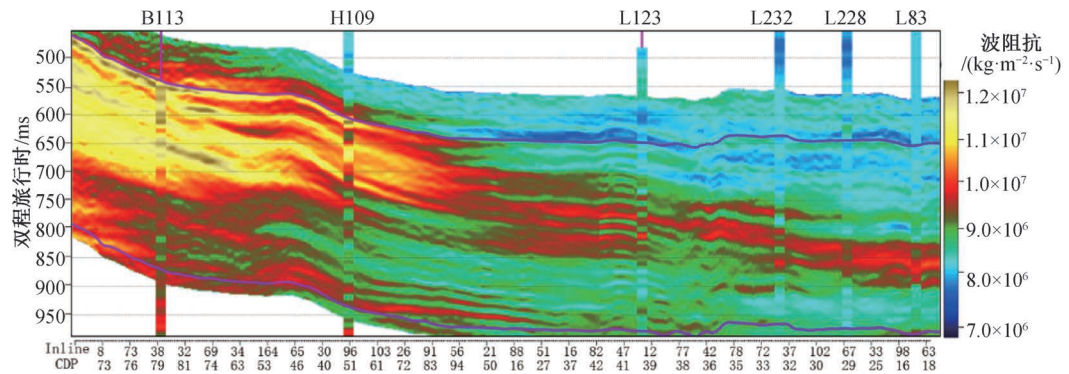


图 10 基于相对波阻抗约束低频模型的反演剖面图

Fig. 10 Inversion profile based on low-frequency model constructed with constrained relative acoustic impedance

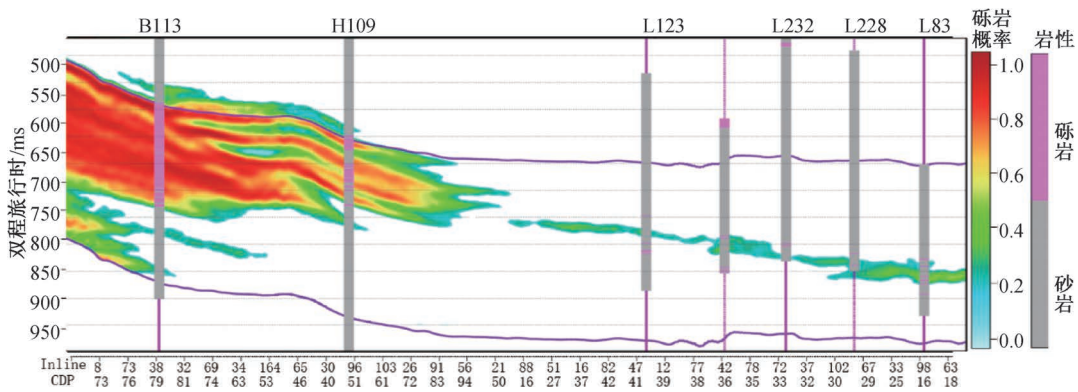


图 11 砾岩概率分布剖面图

Fig. 11 Probability distribution profile of conglomerates

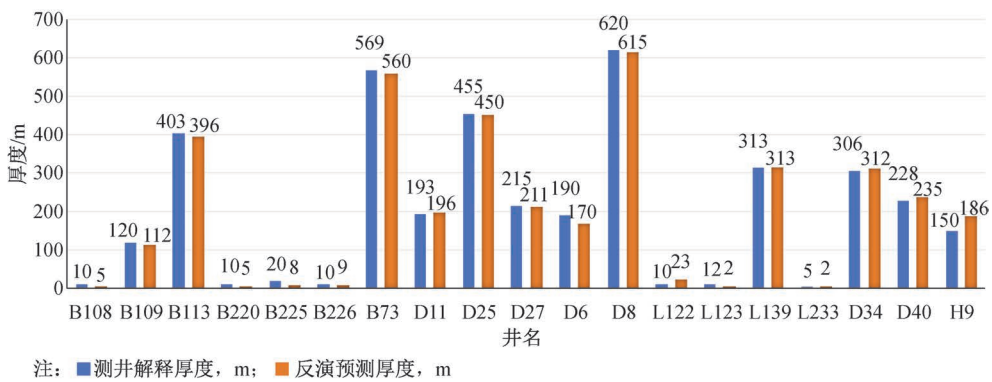


图 12 砾岩厚度统计直方图

Fig. 12 Histogram of conglomerate thickness statistics

综上所述,多方面验证对比分析表明,基于相对波阻抗约束和地质统计学方法构建的低频模型,能够有效提高长 8 储层圈闭评价的可靠性以及储层预测精度。同时,模型验证过程也揭示了该方法的不足之处,为后续研究提供了方向和思路。

4 结论

本研究提出了一种结合相对波阻抗约束和地质统计学方法构建低频模型的新思路。通过在实际工区的应用,证实了该方法的有效性和优越性。主要结论如下:

- 1) 相对波阻抗作为地震反演的中间产物,蕴含丰富的地层物性信息。将其作为约束条件引入低频模型构建过程,能够有效补偿低频信息缺失,提高低频模型的精度和可靠性。
- 2) 地质统计学方法充分考虑了地下参数的空间相关性和变异特征,克服了传统确定性插值方法的局限性,在处理数据稀疏和不确定性问题方面具有独特优势。协同克里金等方法能够融合多源数据,全面刻画低频模型的横向连续性和纵向非均质性。

3) 与传统方法的对比分析表明,所构建的低频模型在匹配钻井资料、预测储层发育、刻画构造形态等方面都具有明显优势,与实际地质情况的吻合度高达 85% 以上。

4) 研究揭示了该方法存在的局限性。受地震数据分辨率等因素影响,该方法对薄层尤其是 20 m 以下地层的刻画能力有待提高。此外,在构造复杂区域,地质统计学方法的平稳性假设可能不完全成立,导致预测结果不确定性增加。这些问题需要在后续研究中予以重点关注并加以攻克。

参考文献:

[1] 马良涛,范廷恩,王宗俊,等. 不同地质条件下反演低频模型构建方法分析[J]. 地球物理学进展, 2021, 36(2): 625-635.
 MA L T, FAN T E, WANG Z J, et al. Analysis on construction method of inversion low frequency model under different geological conditions [J]. Progress in Geophysics, 2021, 36(2): 625-635.

[2] 刘迪,王红,张中平. 基于反演迭代建立低频模型的方法[C]//2017 中国地球科学联合学术年会论文集. 北京, 2017: 113-116.
 LIU D, WANG H, ZHANG Z P, et al. A method for establishing low-frequency models based on inversion itera-

- tion [C]//Proceedings of the China Geoscience Union Annual Meeting, 2017; 1257-1260.
- [3] 王伟,李炳颖,黄鑫,等. 迭代法建立的低频模型在储层反演中的应用[J]. 中国地质调查, 2021, 8(1): 125-133.
WANG W, LI B Y, HUANG X, et al. Application of Iteration method to build low-frequency model in reservoir inversion[J]. Geological Survey of China, 2021, 8(1): 125-133.
- [4] PENDREL J, DEBEYE H, PEDERSEN-TATALOVIC R, et al. Estimation and interpretation of P and S impedance volumes from simultaneous inversion of P-wave offset seismic data [C]//SEG Technical Program Expanded Abstracts 2000, 2000: 146-149.
- [5] 董洪超,范洪军,王宗俊,等. 基于精细地层格架的古近系储层相控反演技术研究[J]. 物探化探计算技术, 2021, 43(2): 154-160.
DONG H C, FAN H J, WANG Z J, et al. Facies-constrained inversion technology of Paleogene reservoir based on fine stratigraphic framework [J]. Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration, 2021, 43(2): 154-160.
- [6] 姜勇,李键,俞伟哲,等. 复杂水动力环境下的相控迭代反演技术[J]. 海洋地质前沿, 2019, 35(10): 69-77.
JIANG Y, LI J, YU W Z, et al. Facies-controlled iterative inversion technique and its application in complex hydrodynamic environment [J]. Marine Geology Frontiers, 2019, 35(10): 69-77.
- [7] 李金磊,陈祖庆,王良军,等. 相控技术在低勘探区生屑滩相储层预测中的应用[J]. 岩性油气藏, 2017, 29(3): 110-117.
LI J L, CHEN Z Q, WANG L J, et al. Application of facies-controlled technique to bioclastic shoal reservoir prediction in less well zones [J]. Lithologic Reservoirs, 2017, 29(3): 110-117.
- [8] 肖为,但志伟,方中于,等. 相控多信息融合建模反演方法在 HZ 地区碳酸盐岩储层预测中的应用[J]. 物探化探计算技术, 2017, 39(3): 395-403.
XIAO W, DAN Z W, FANG Z Y, et al. Application of facies controlled multi information fusion modeling inversion method in carbonate reservoir prediction in HZ area [J]. Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration, 2017, 39(3): 395-403.
- [9] 沙志彬,万晓明,赵忠泉,等. 叠前同时反演技术在珠江口盆地西部海域天然气水合物储层预测中的应用[J]. 物探与化探, 2019, 43(3): 476-485.
SHA Z B, WAN X M, ZHAO Z Q, et al. The application of pre-stack simultaneous inversion to gas hydrates reservoir prediction in the western Pearl River Mouth basin [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2019, 43(3): 476-485.
- [10] 高云,朱应科,赵华,等. 叠前同时反演技术在砂砾岩体有效储层预测中的应用[J]. 石油物探, 2013, 52(2): 223-228+114.
GAO Y, ZHU Y K, ZHAO H, et al. Application of prestack simultaneous inversion technique in effective reservoir prediction of sand-gravel body [J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2013, 52(2): 223-228+114.
- [11] 蔡伟祥,夏振宇,易院平,等. 基于小层约束对比下的储层反演综合研究[J]. 科学技术与工程, 2016, 16(23): 98-103.
CAI W X, XIA Z Y, YI Y P, et al. Comprehensive research of thin-layer compared and constrained reservoir inversion [J]. Science Technology and Engineering, 2016, 16(23): 98-103.
- [12] PATHAK R K, HUSAIN R. Application of extended elastic impedance in reservoir characterization-example from Sarawak Basin, Malaysia [J]. Seismic Driven Reservoir Characterization and Production Management, 2015: 20-22.
- [13] 叶云飞,崔维,张益明,等. 低频模型对波阻抗反演结果定量解释的影响[J]. 中国海上油气, 2014, 26(6): 32-36.
YE Y F, CUI W, ZHANG Y M, et al. Impacts of low-frequency models on the quantitative interpretation of acoustic impedance inversion [J]. China Offshore Oil and Gas, 2014, 26(6): 32-36.
- [14] 黄诚,李鹏飞,陈元勇,等. 山前复杂岩性地区低频模型的构建方法[J]. 重庆大学学报, 2018, 41(12): 30-35.
HUANG C, LI P F, CHEN Y Y, et al. The establishment of the low frequency mode in piedmont complex lithology area [J]. Journal of Chongqing University, 2018, 41(12): 30-35.
- [15] KALLA S, WHITE C D, GUNNING J, et al. Downscaling multiple seismic inversion constraints to fine-scale flow models [J]. SPE Journal, 2009, 14(4): 746-758.
- [16] 唐登平. 油气地质储层建模的研究[J]. 现代电子技术, 2005, 28(20): 86-89+92.
TANG D P. Modeling study of oil gas geology reservoir [J]. Modern Electronic Technique, 2005, 28(20): 86-89+92.
- [17] VANMARCKE E. Random fields: analysis and synthesis [M]. Singapore: World Scientific, 2010.
- [18] 印兴耀,贺维胜,黄旭日. 贝叶斯-序贯高斯模拟方法[J]. 石油大学学报(自然科学版), 2005(5): 28-32.
YIN X Y, HE W S, HUANG X R. Bayesian sequential Gaussian simulation method [J]. Journal of the University of Petroleum, China (Edition of Natural Science), 2005(5): 28-32.
- [19] 唐湘蓉. 地震测井联合反演方法研究及应用 [D]. 成都: 成都理工大学, 2005.
TANG X R. Research and application of joint inversion method of seismic logging [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2005.
- [20] 刘炳杨. 低频建模技术研究及其在 AVO 反演中的应用 [D]. 东营: 中国石油大学(华东), 2013.
LIU B Y. Research on low frequency modeling technology and its application in AVO inversion [D]. Dongying: China University of Petroleum (Huadong), 2013.