基于振幅属性的五维地震预测方法在顺北 X 井区的应用

李弘艳*，龚伟，韩俊，张永升

中国石油化工股份有限公司西北油田分公司，乌鲁木齐 830011

* 通信作者，E-mail：lihongyan.xbsj@sinopec.com

2024-06-14 收稿；2024-11-27 修回；2024-12-17 接受

基金项目：新疆维吾尔自治区“天山英才-优秀工程师”培养项目“顺北超深碳酸盐岩油气藏高效勘探开发”；中国石化科技攻关项目“超深-特深层碳酸盐岩圈闭识别描述与评价技术研究”（P24009）

中图分类号：P631.8；P618.13　　文章编号：2096-8523(2025)03-0363-10　　doi: 10.19509/j.cnki.dzkq.tb20240328

摘　要：针对顺北超深层碳酸盐岩断控缝洞型储集体储层非均质性强、地震资料信噪比低、叠后储层预测精度不足及裂缝识别困难等问题，基于五维地震数据，探索了提高裂缝型储层预测精度的新方法。在研究顺北断控缝洞型油气藏储层发育特征的基础上，开展了五维地震各向异性正演模拟，建立了地震振幅与裂缝参数的关系，并优选了裂缝预测敏感参数；在此基础上推导出傅里叶级数形式的方位弹性阻抗方程，开展了裂缝型储层预测，并在顺北 X 井区进行了应用。研究结果明确了超深层碳酸盐岩断控储集体的 AVAZ(amplitude variation with azimuth and offset)地震响应特征，指出裂缝密度是指示裂缝型储层的敏感参数；同时，利用二阶傅里叶系数表征了裂缝发育密度，在顺北 X 井区实现了裂缝型储层的精细表征，预测吻合率较高。基于振幅属性的五维地震预测技术通过挖掘宽方位地震数据的振幅、方位信息，丰富了裂缝发育密度和方向等相关信息的预测。建立的傅里叶系数-裂缝密度映射关系为断控缝洞型油藏预测提供了定量化工具，为断控缝洞型油藏裂缝预测及目标评价提供了新的思路。

关键词：顺北地区；断控缝洞型储集体；地震振幅属性；五维地震预测；裂缝密度；方位角；入射角；弹性阻抗

塔里木盆地海相碳酸盐岩发育缝洞型油气藏，以顺北油田为代表的勘探实践表明，走滑断裂对奥陶系碳酸盐岩缝洞型储层分布、发育和油气聚集起控制作用[1-12]。因此，对断裂、裂缝的识别和描述是油气勘探开发的重要工作之一。近年来，针对断裂及碳酸盐岩裂缝型储层的地震识别和描述方法不断完善，逐步形成了以倾角、相干、曲率、蚂蚁体等地震几何学属性为主的裂缝预测技术体系[13-21]。

随着地震勘探技术的不断发展，宽方位高密度地震勘探已成为现阶段的主要发展方向，地球物理储层预测技术也逐步由叠后走向叠前，由三维走向五维。五维地震数据具有丰富的方位信息，实现了地下异常体的全方位观测，基于偏移距矢量片(offset vector tile，简称 OVT)域的五维地震资料可有效地实现方位各向异性分析与研究，在有效识别裂缝型储层方面具有潜在的应用价值[22-26]，但目前在碳酸盐岩断控缝洞型储层预测中的应用还不充分，如何充分利用五维地震数据有效提高碳酸盐岩断控缝洞型储层预测精度仍是一项具有挑战的任务。

本研究聚焦断控缝洞型油气藏裂缝预测关键难题，以五维地震预测技术为核心，通过正演模拟，建立地震振幅与裂缝参数的关系，在此基础上优选敏感属性，开展缝洞型储层预测，并在顺北地区进行应用，支撑储层精细描述。

著录信息：李弘艳，龚伟，韩俊，等. 基于振幅属性的五维地震预测方法在顺北 X 井区的应用 [J]. 地质科技通报，2025，44(3)：363-372.
LI Hongyan，GONG Wei，HAN Jun，et al. Application of five-dimensional seismic prediction method based on amplitude attribute in Shunbei Well X area[J]. Bulletin of Geological Science and Technology，2025，44(3)：363-372.

© Editorial Office of Bulletin of Geological Science and Technology. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license.　https://dzkjtb.cug.edu.cn

1　研究区概况

顺北油气田位于塔里木盆地沙漠腹地，构造上南北分别与沙雅隆起和卡塔克隆起相接，东西分别与满加尔坳陷和阿瓦提坳陷相邻(图 1)。该区经历了早古生代海相、晚古生代早期海–陆过渡相、晚古生代晚期和中新生代陆相沉积演化过程，除整体缺失侏罗系外，自上而下地层发育齐全，奥陶系一间房组–鹰山组为主要目的层。在多期构造演化过程中，发育了受走滑断裂控制的断控缝洞型油气藏[7-11]。

实钻揭示，顺北奥陶系断控储集体主要储集空间为构造缝、成岩缝、基质孔与孔洞组合形成的缝洞系统，具有储层厚度大、物性好、产能高的特征。与传统的裂缝–孔隙型碳酸盐岩油藏以及典型的国内外喀斯特油藏相比，断控缝洞型油气藏储层埋深大(>7 300 m)，内部结构复杂，缝洞体分隔性明显，非均质性极强，储层所表现的岩石地球物理特性也多变。同时，受沙漠地表及地下复杂地质结构的影响，目的层地震反射信号弱，信噪比低，裂缝预测难度大[13-16]。

2　基于振幅属性的五维地震预测技术

裂缝是引起断控缝洞型储层各项异性的重要因素，针对裂缝型储层地质特点，在岩石物理参数的指导下，建立适用于目标储层的地质地球物理模型，明确顺北地区缝洞型储层的 AVAZ(amplitude variation with azimuth and offset)地震响应特征。在此基础上，针对缝洞型储层敏感参数，优选傅里叶级数方位弹性阻抗方程的裂缝参数预测方法[27-38]，基于研究区 OVT 数据，开展裂缝密度和方位预测，实现缝洞型储层描述，为目标优选奠定基础。具体技术流程见图 2。

2.1　顺北断控缝洞体裂缝型储层 AVAZ 正演及各向异性分析

实钻表明，顺北碳酸盐岩断控缝洞型储集体在断裂带内部分段发育，多套储集体之间为大套碳酸盐岩隔层，多表现为隔层夹裂缝层的特征，结合这一特点，构建地震地质模型，通过正演模拟确定缝洞型储层 AVAZ 地震响应特征。

2.1.1　理论模型 AVAZ 地震响应分析

结合 Hudson 模型、各向异性流体替换公式及 Bond 坐标变换理论，计算裂缝含气充填时不同参数条件下(裂缝长度、裂缝密度及裂缝纵横比，其中裂缝长度、裂缝密度进行了粗化处理，为相同尺度范围内的相对值，无单位)裂缝岩石的弹性参数和裂缝参数，利用倾斜横向各向同性(tilted transversely isotropic，简称 TTI)介质反射系数近似公式模拟其界面反射特征，分别分析裂缝倾角、裂缝密度及裂缝纵横比对 AVAZ 特征的影响。

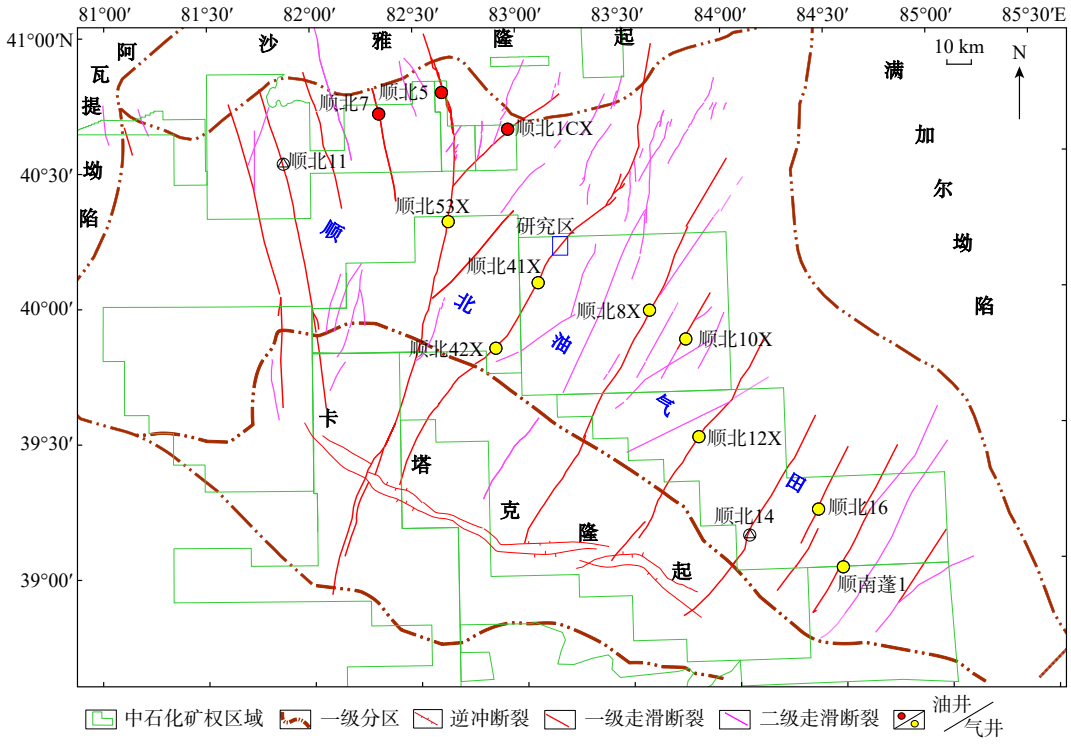


图 1　顺北油气田构造单元与奥陶系一间房组顶面断裂体系图

Fig. 1　Structural unit of Shunbei oil and gas field and top fault system of Ordovician Yijianfang Formation

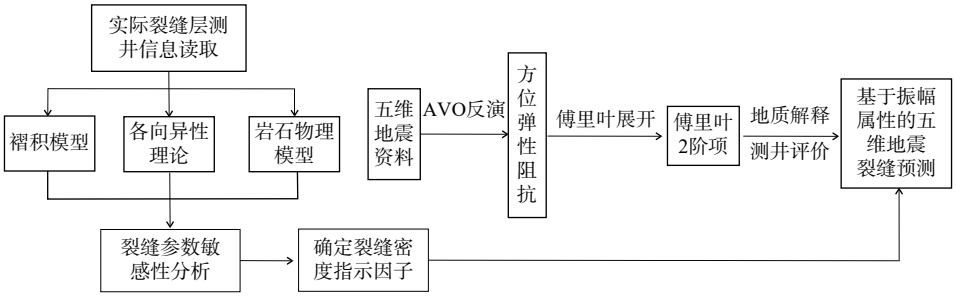


图 2　基于振幅属性的五维地震预测技术思路

Fig. 2　Technical approach for five-dimensional seismic prediction on the basis of amplitude attributes

当裂缝带的裂缝密度由 0.02 变化至 0.10、入射角固定(30°)时，随裂缝密度增加，方位反射系数数值减小；当裂缝倾角为 0°时，此时可等效为垂向各向同性(vertical transversely isotropic，简称 VTI)介质，反射系数不随方位角变化而改变，随着裂缝倾角增加，反射系数具有方位响应特征；裂缝密度越大，反射系数方位变化幅度越明显；同时可以看出裂缝倾角越大，方位反射系数随裂缝密度的变化关系越明显。固定裂缝密度，当裂缝倾角为 60°时，方位反射系数近似为正弦曲线，但是当裂缝倾角为 90°时，方位反射系数近似为余弦曲线(图 3)。

当裂缝带的裂缝密度固定(均为 0.07)，裂缝纵横比由 0.001 变化至 0.013 时，入射角固定(30°)，随裂缝纵横比增加，方位反射系数数值减小；当裂缝倾角为 0°，此时可等效为 VTI 介质，反射系数不随方位角变化而改变，随裂缝倾角增加，反射系数具有方位响应特征；同时可以看出裂缝纵横比变化对反射系数的方位变化幅度改变影响较小(图 4)。

当裂缝带裂缝密度固定(均为 0.07)，裂缝长度 10 变化至 50。当入射角固定(30°)时，随裂缝长度增加，方位反射系数数值增大；当裂缝带裂缝倾角为 0°，此时可等效为 VTI 介质，反射系数不随方位角变化而改变，随裂缝带裂缝倾角增加，反射系数具有方位响应特征；同时可以看出裂缝带裂缝长度变化对反射系数的方位变化幅度改变影响较小(图 5)。

2.1.2　顺北实钻储层 AVAZ 地震响应分析

为分析不同入射角、不同方位角时碳酸盐岩断控储集体缝洞型储层中裂缝密度、裂缝纵横比、裂缝层厚度等因素对 AVAZ 地震响应的影响，设计了厚隔层夹裂缝层单道模型进行 AVAZ 正演分析，正演模拟结果表明，缝洞型储层振幅随致密层厚度增大而增大。当存在方位振幅差异(方位地震记录与方位角为 0°时地震记录的差值)时，随着致密层厚度增加，方位差异越大，振幅增加越明显，层厚不

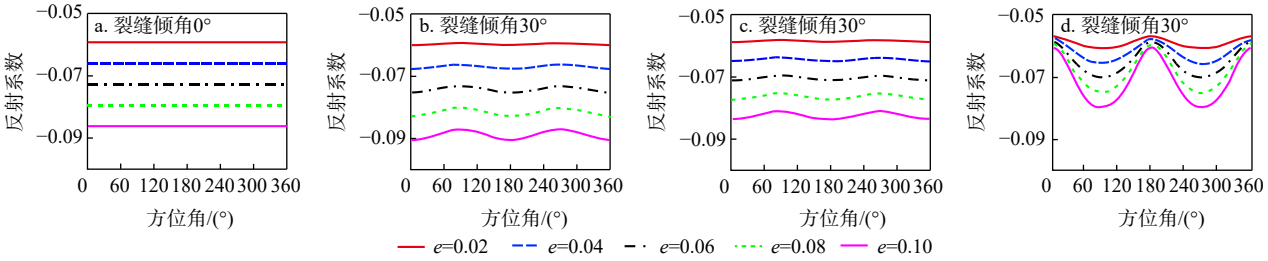


图 3　裂缝密度 (*e*) 变化时“隔层–裂缝层”界面的 AVAZ 变化特征

Fig. 3　AVAZ variation characteristics of the "interlayer-fracture layer" interface when the fracture density changes

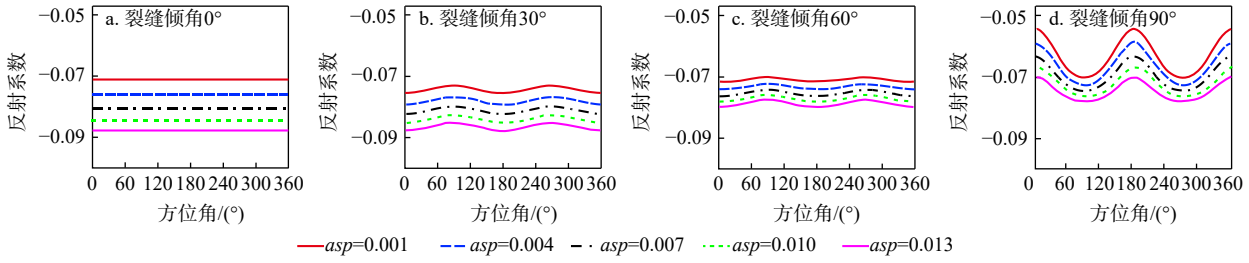


图 4　裂缝纵横比 (*asp*) 变化时“隔层–裂缝层”界面的 AVAZ 变化特征

Fig. 4　AVAZ variation characteristics of the "interlayer-fracture layer" interface when the fracture aspect ratio changes

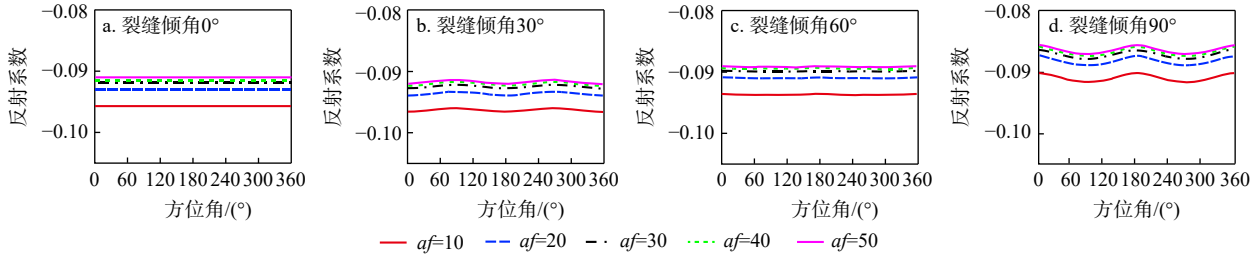


图 5　裂缝长度 (*af*) 变化时“隔层−裂缝层”界面的 AVAZ 变化特征

Fig. 5　AVAZ variation characteristics of the "interlayer-fracture layer" interface when the fracture length changes

会改变振幅方位差异的大小，但对于薄层，方位差异可有效解耦子波混叠，为地震识别薄层指明了新的方向。

基于方位差异对薄层的敏感性，以厚隔层夹裂缝层模型为例，进一步研究裂缝参数与入射角、方位角变化时的 AVAZ 响应。

当方位角(45°)、裂缝纵横比相同时，裂缝密度为 0.01，入射角从 0°变化至 30°的最大振幅相对变化为−20%；裂缝密度为 0.04，入射角从 0°变化至 30°的最大振幅相对变化为−31.4%(图 6)。当方位角(45°)、裂缝密度相同时，裂缝纵横比为 0.001，入射角从 0°变化至 30°的最大振幅相对变化为 −27.8%；裂缝纵横比为 0.013，入射角从 0°变化至 30°的最大振幅相对变化为−23.5%(图 6)。因此，当方位角相同时，随着裂缝密度增加，不同偏移距(入射角)地震振幅变化明显；裂缝纵横比增加对不同偏移距(入射角)地震振幅变化的影响不大；同时，裂缝密度或裂缝纵横比固定时，地震振幅随入射角增加而变大。

当入射角(45°)、裂缝纵横比相同时，裂缝密度为 0.01，方位角从 0°变化至 90°的最大振幅相对变化为−12.1%；裂缝密度为 0.04，方位角从 0°变化至 90°的最大振幅相对变化为−46.3%(图 7)。当裂缝纵横比为 0.001 时，方位角从 0°变化至 90°的最大振幅相对变化为−32.9%；当裂缝纵横比为 0.013 时，方位角从 0°变化至 90°的最大振幅相对变化为−36.2%(图 7)。因此，当入射角相同时，随着裂缝密度的增加，地震振幅方位变化明显；裂缝纵横比增加对地震振幅方位变化的影响不大；同时，裂缝密度或裂缝纵横比固定时，地震振幅随方位角增加而减小。

当裂缝密度(0.03)、裂缝纵横比(0.004)固定时，方位角从 0°变化至 90°的最大振幅相对变化为−19.2%，入射角从 0°变化至 30°的最大振幅相对变

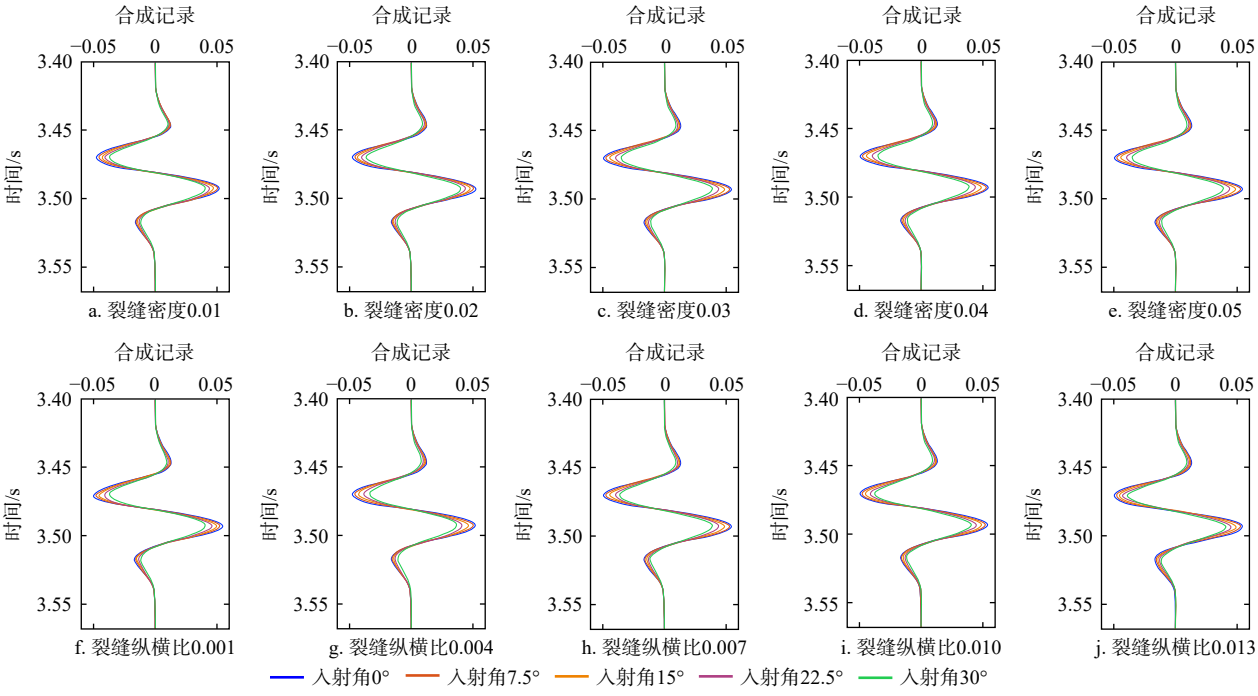


图 6　裂缝密度、纵横比不同时地震响应随入射角变化

Fig. 6　Seismic response varies with incident angle when the fracture density and aspect ratio are different

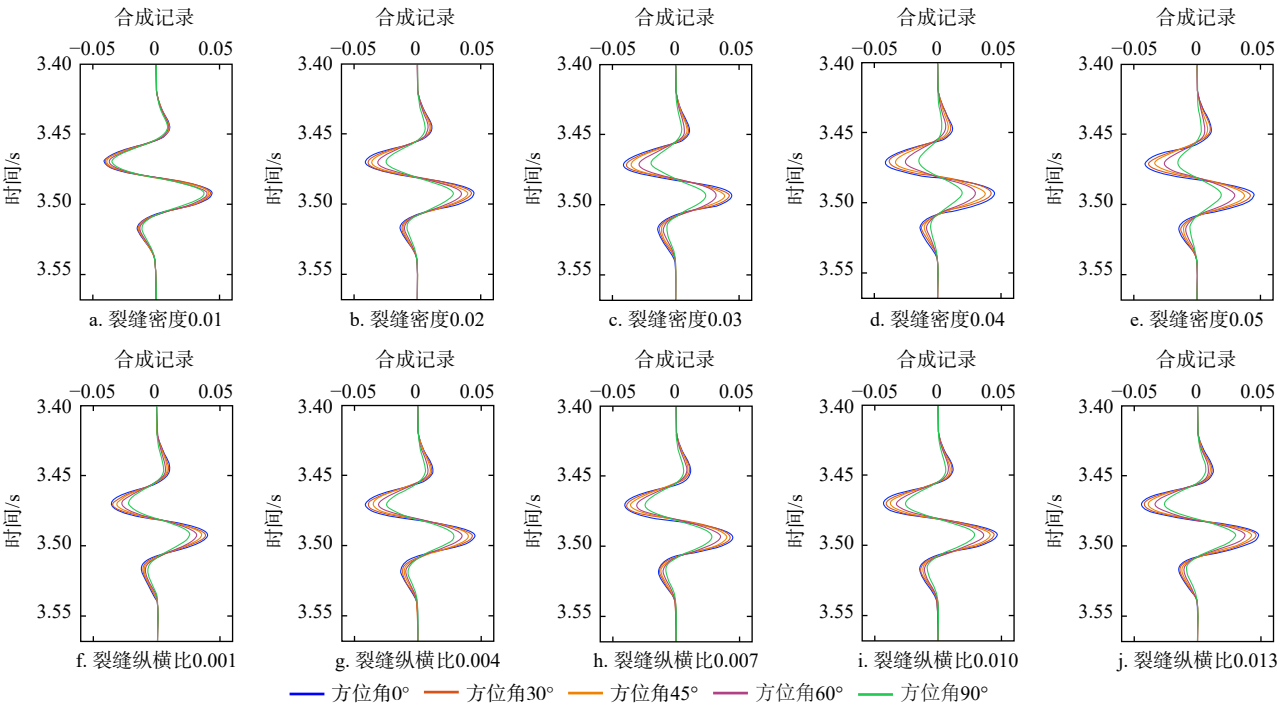


图 7　裂缝密度、纵横比不同时地震响应随方位角变化

Fig. 7　Seismic response changes with azimuth angle when the fracture density and aspect ratio are different

化为−27.5%(图 8)。裂缝长度为 50, 方位角从 0°变化至 90°的最大振幅相对变化为−21.1%; 入射角从 0°变化至 30°的最大振幅相对变化为−29.2%(图 8)。因此, 入射角相同时(30°), 裂缝长度增加, 地震振幅方位变化不大; 同时, 方位角相同时(45°), 裂缝长度增加, 地震振幅方位变化也不明显。

基于正演模拟结果, 得出以下结论: ①储层参数变化, 裂缝方位与振幅极值对应发生反转, 产生裂缝方位预测的 90°模糊性; ②方位角差异越大, 地震响应差异越明显; ③入射角相同, 裂缝密度增加, 地震

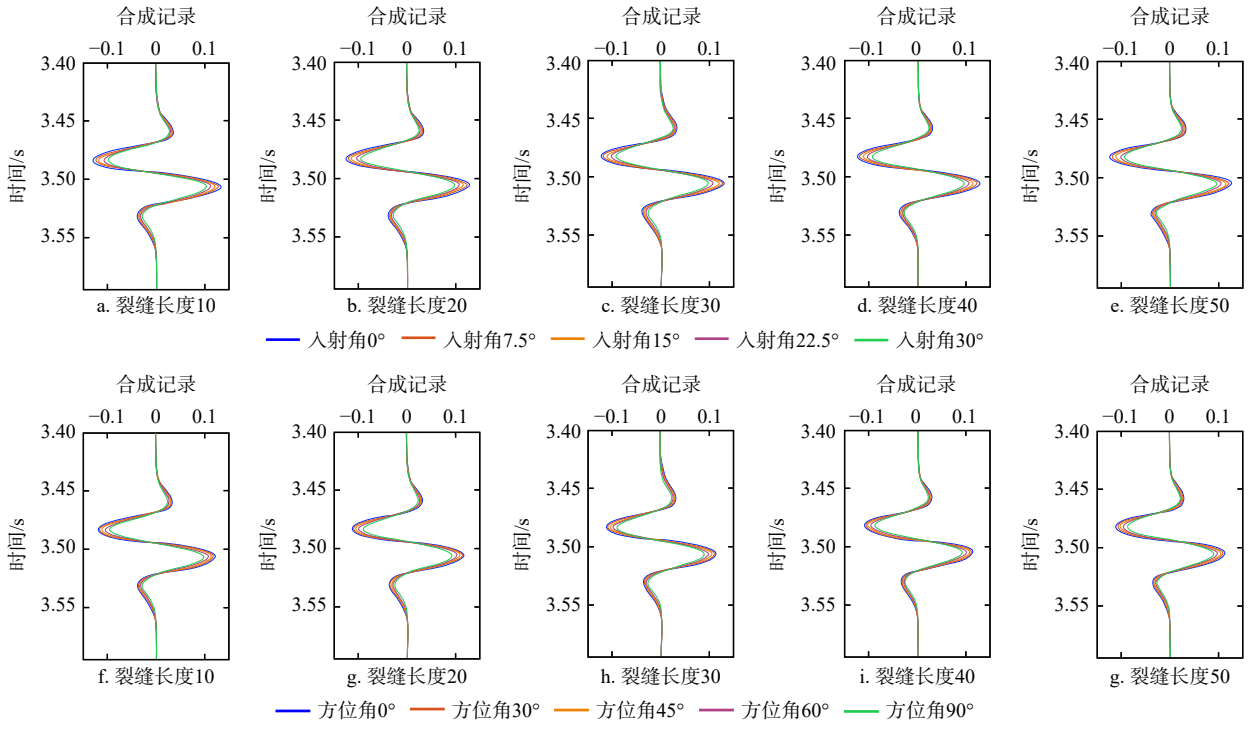


图 8　裂缝长度不同时地震响应随入射角、方位角的变化

Fig. 8　Seismic response changes with incident angle and azimuth angle when the fracture length is different

振幅方位变化明显；入射角相同，裂缝纵横比增加，地震振幅方位变化影响不大；缝洞型储层方位反射系数主控因素：裂缝密度>裂缝纵横比>裂缝长度。裂缝密度不受其他影响因素干扰，是指示缝洞型储层的理想敏感参数。

2.2　基于傅里叶级数方位弹性阻抗方程的裂缝参数预测

针对深层碳酸盐岩断控缝洞型油气藏裂缝型储层发育的主要特征，结合裂缝型储层方位各向异性分析结果，研究宽方位地震资料振幅属性随方位变化规律与裂缝发育特征的映射关系，推导裂缝型储层傅里叶级数形式的方位弹性阻抗方程，并将椭圆拟合裂缝方位预测结果及裂缝几何参数测井、地质解释结果作为先验信息，构建裂缝参数地震预测目标泛函，缓解裂缝方位预测的 90°模糊性，提高预测精度。

2.2.1　方法原理

叠前弹性阻抗（*EI*）是物理不可测量属性，它的获取只能通过计算得到。CONNOLLY[39] 在 Aki-Richards 近似方程的基础上对 *EI* 做了定量推导，其利用弹性阻抗计算反射系数的公式为：

$$\ln\frac{EI(\phi,\theta)}{EI_0}=r_{EI_0}(\theta)+r_{EI_2}(\theta)\cos(2(\phi-\phi_{\mathrm{sym}}))+r_{EI_4}(\theta)\cos(4(\phi-\phi_{\mathrm{sym}})),\quad(1)$$

其中，

$$\begin{aligned}r_{EI_0}(\theta)&=A_{EI_0}+B_{EI_0}\sin^2\theta+C_{EI_0}\sin^2\theta\tan^2\theta\\ r_{EI_2}&=\overline{g}(\delta_{\mathrm{V}}-\overline{\chi}\delta_{\mathrm{N}})\sin^2\theta+\overline{g}(\overline{g}-1)\delta_{\mathrm{N}}\sin^2\theta\tan^2\theta\\ r_{EI_4}&=\frac{\overline{g}}{4}(\delta_{\mathrm{H}}-\overline{g}\delta_{\mathrm{N}})\sin^2\theta\tan^2\theta\end{aligned},\quad(2)$$

式中：EI_0 为入射角为 0°时的弹性波阻抗；r_{EI_0}，r_{EI_2}，r_{EI_4} 分别为 0，2，4 阶傅里叶系数，0 阶傅里叶系数 $r_{EI_0}(\theta)$ 描述了储层 AVO 特征；ϕ 为观测方位角；θ 为地震波入射角；ϕ_{sym} 为裂缝倾向方位角；A_{EI_0}，B_{EI_0}，C_{EI_0} 分别代表各项同性背景弹性阻抗的截距、梯度和曲率；δ_{H}，δ_{N}，δ_{V} 分别为裂缝水平向、法向和垂向弱度参数；$\overline{\chi}=1-2\times\overline{g}$，其中 $\overline{g}$ 代表横波速度与纵波速度比的平方。

但由于反演得到的符号未知，所以基于傅里叶级数的反射系数公式反演的裂缝方位存在 90°不确定性。

为解耦五维地震数据中的裂缝信息和洞穴信息，减少反演参数个数，提高反演结果稳定性，推导傅里叶级数形式的方位弹性阻抗方程，利用二阶傅里叶系数指示裂缝发育密度。

$$\ln\frac{EI(\phi,\theta)}{EI_0}=r_{EI_0}(\theta)+r_{EI_2}(\theta)\cos(2(\phi-\phi_{\mathrm{sym}})),\quad(3)$$

其中，

$$r_{EI_2}(\theta)\approx B_{EI_{\mathrm{ani}}}\sin^2\theta,\quad(4)$$

式中：$B_{EI_{\mathrm{ani}}}$ 为不同角度下的梯度。

在获得方位弹性阻抗数据体后，结合傅里叶级数形式的方位弹性阻抗方程，联合多元资料的裂缝方位解释结果，便可构建裂缝参数反演目标泛函，弱化裂缝方位预测可能存在的 90°模糊性，实现五维地震数据裂缝参数的稳定反演[17-21]。

$$\begin{cases}\mathrm{sign}[r_{EI_1}(\theta)\cos(2(\phi_{\mathrm{well}}-\phi_{\mathrm{sym}}))]\times\\ |r_{EI_1}(\theta)|\cos(2(\phi_1-\phi_{\mathrm{sym}}))=\ln\dfrac{EI(\phi_1,\theta)}{EI_0}-r_{EI_0}(\theta)\\ \mathrm{sign}[r_{EI_2}(\theta)\cos(2(\phi_{\mathrm{well}}-\phi_{\mathrm{sym}}))]\times\\ |r_{EI_2}(\theta)|\cos(2(\phi_1-\phi_{\mathrm{sym}}))=\ln\dfrac{EI(\phi_1,\theta)}{EI_0}-r_{EI_0}(\theta)\\ \phi_{\mathrm{sym}}\in(-90°,90°]\end{cases},\quad(5)$$

式中：r_{EI_1} 为 1 阶傅里叶系数；ϕ_{well} 为由测井数据或地质数据解释得到的裂缝方位角；ϕ_1 为当前观测方位角。

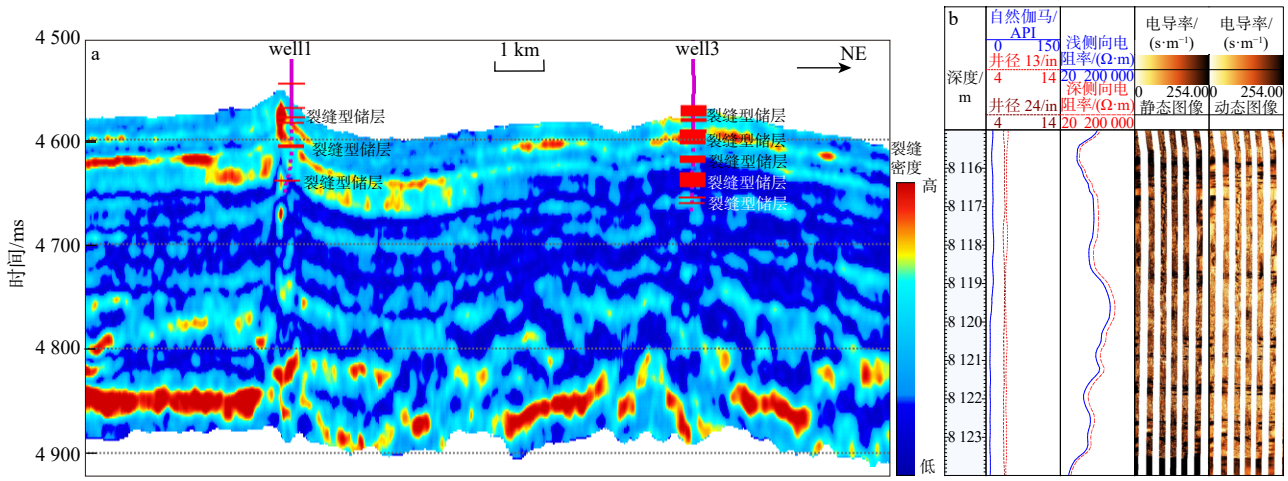
上述方程的系数矩阵里包含待反演参数，所以我们采用重加权最小二乘算法求解上述方程，其终止条件为 $\mathrm{sign}[{}^{n}r_{EI_2}(\theta)\cos(2(\phi_{\mathrm{well}}-\phi_{\mathrm{sym}}))]=\mathrm{sign}({}^{n-1}r_{EI_2})$，$n$ 和 n-1 为迭代次数，如果条件不满足，则需要继续迭代。

2.2.2　应用实例

基于宽方位地震数据，结合井曲线、地质信息对不同方位的数据分别开展方位弹性阻抗反演，获取方位弹性阻抗数据体，再根据基于傅里叶级数的弹性阻抗方程计算裂缝参数，得到裂缝密度、方位等预测结果。

为解决裂缝方位 90°模糊带来的难题，以井上裂缝方位为先验，通过迭代求取准确解，对该方法进行实际应用，图 9a 展示了工区裂缝密度预测结果的连井线剖面，图中钻井轨迹上标注的短横线为测井解释的裂缝型储层，可以看到，预测的高裂缝密度发育部位与钻井结果较吻合，同时，从 well3 井的成像测井结果（图 9b）也可以看出，目的层段近井壁电成像图像上为暗色正弦线或者近似水平暗色线条，裂缝相对集中发育，与反演结果吻合。同时，从裂缝密度沿目的层（奥陶系一间房组）顶面的裂缝密度切片图显示（图 10），裂缝在主干断裂带及其两侧发育，展布方向与断裂发育方向及形成机制吻合，在一定程度上表明了预测结果的可靠性。

为进一步验证裂缝预测的可靠性，将成像测井



13, 24 均为仪器代码, 1 in=0.025 4 m

图 9　过 well1-well3 井连井叠前裂缝密度预测图 (a) 和 well3 井成像测井解释图 (b)

Fig. 9　Prediction of prestack fracture density through well1-well3 (a) and interpretation of well3 imaging logging (b)

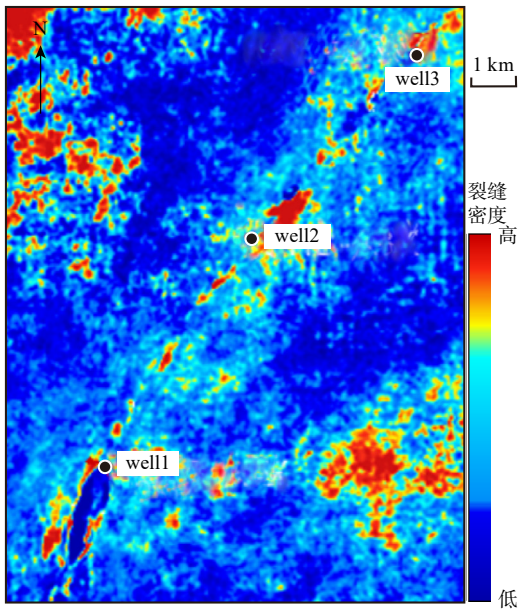


图 10　顺北 X 井区一间房组顶面裂缝密度切片

Fig. 10　Slicing of fracture density on the top surface of the Yijianfang Formation in Shunbei Well X area

统计结果与预测结果进行了对比, 从实钻井成像测井得到的裂缝方位与预测裂缝方位玫瑰图进行对比, 可以发现, 在 well1 和 well3 井中, 预测的倾向与井上统计裂缝倾向基本一致, 说明了方位预测的准确性(图 11)。

3　结　论

(1)缝洞型储层方位反射系数主控因素为: 裂缝密度>裂缝纵横比>裂缝长度。裂缝密度不受其他影响因素干扰, 是指示缝洞型储层的理想敏感参数。

(2)联合多元资料裂缝方位解释结果构建裂缝参数反演目标泛函的傅里叶级数方位弹性阻抗方程裂缝参数预测方法, 能够弱化裂缝方位预测可能存在的 90°模糊性, 实现五维地震数据裂缝参数稳定反演, 在断控缝洞型储集体的裂缝预测中起到了较好的效果。

(3)与常规基于地震几何属性(相干、曲率等)的断裂检测方法相比, 基于振幅属性的五维地震预测方法充分挖掘了宽方位地震资料的振幅、方位信息, 在刻画断裂带展布规律的基础上, 丰富了裂缝发育密度和方向等相关信息的预测, 尤其在有钻井先验

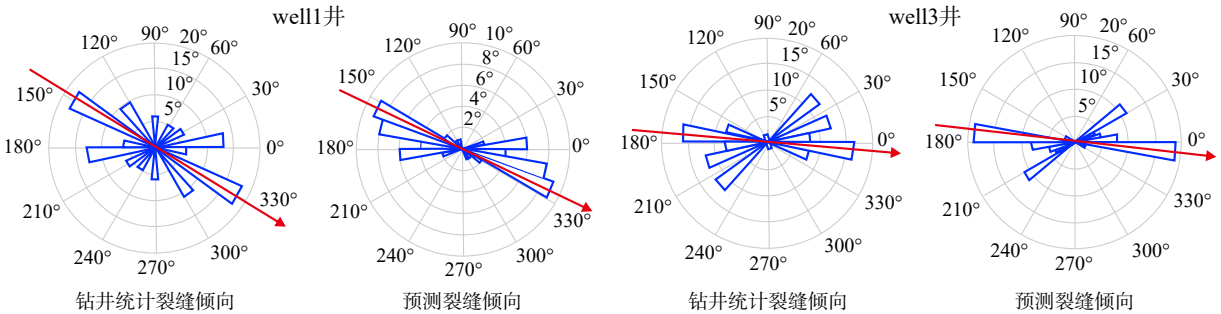


图 11　裂缝倾向反演结果与钻井实测结果对比

Fig. 11　Comparison between the inversion results of fracture tendency and the drilling measurement results

信息约束的情况下，能够较准确地预测井区之外局部区域裂缝发育密度和方向，为目标的进一步评价奠定了基础。

所有作者声明不存在利益冲突。
The authors declare that no competing interests exist.

参考文献：

[1] 云露. 顺北东部北东向走滑断裂体系控储控藏作用与突破意义 [J]. 中国石油勘探, 2021, 26(3): 41-52.
YUN L. Controlling effect of NE strike-slip fault system on reservoir development and hydrocarbon accumulation in the eastern Shunbei area and its geological significance, Tarim Basin[J]. China Petroleum Exploration, 2021, 26(3): 41-52. (in Chinese with English abstract)

[2] 刘雨晴, 邓尚, 张继标, 等. 塔里木盆地顺北及邻区走滑断裂体系差异发育特征及成因机制探讨 [J]. 地学前缘, 2023, 30(6): 95-109.
LIU Y Q, DENG S, ZHANG J B, et al. Characteristics and formation mechainism of the strike-slip fault networks in the Shunbei area and the surroundings, Tarim Basin[J]. Earth Science Frontiers, 2023, 30(6): 95-109. (in Chinese with English abstract)

[3] 姜忠正, 唐大卿, 沙旭光, 等. 塔里木盆地塔中隆起中北部地区断裂构造特征及演化 [J]. 地质科技通报, 2024, 43(3): 120-132.
JIANG Z Z, TANG D Q, SHA X G, et al. Structure and evolution of faults in central and northern parts of Tazhong Uplift, Tarim Basin[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2024, 43(3): 120-132. (in Chinese with English abstract)

[4] 漆立新, 云露. 塔里木台盆区碳酸盐岩成藏模式与勘探实践 [J]. 石油实验地质, 2020, 42(5): 867-876.
QI L X, YUN L. Carbonate reservoir forming model and exploration in Tarim Basin[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2020, 42(5): 867-876. (in Chinese with English abstract)

[5] 焦方正. 塔里木盆地顺托果勒地区北东向走滑断裂带的油气勘探意义 [J]. 石油与天然气地质, 2017, 38(5): 831-839.
JIAO F Z. Significance of oil and gas exploration in NE strike-slip fault belts in Shuntuoguole area of Tarim Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2017, 38(5): 831-839. (in Chinese with English abstract)

[6] 杨海军, 陈永权, 田军, 等. 塔里木盆地轮探1井超深层油气勘探重大发现与意义 [J]. 中国石油勘探, 2020, 25(2): 62-72.
YANG H J, CHEN Y Q, TIAN J, et al. Great discovery and its significance of ultra-deep oil and gas exploration in well Luntan-1 of the Tarim Basin[J]. China Petroleum Exploration, 2020, 25(2): 62-72. (in Chinese with English abstract)

[7] 邓尚, 李慧莉, 张仲培, 等. 塔里木盆地顺北及邻区主干走滑断裂带差异活动特征及其与油气富集的关系 [J]. 石油与天然气地质, 2018, 39(5): 878-888.
DENG S, LI H L, ZHANG Z P, et al. Characteristics of differential activities in major strike-slip fault zones and their control on hydrocarbon enrichment in Shunbei area and its surroundings, Tarim Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2018, 39(5): 878-888. (in Chinese with English abstract)

[8] 卜旭强, 王来源, 朱莲花, 等. 塔里木盆地顺北油气田奥陶系断控缝洞型储层特征及成藏模式 [J]. 岩性油气藏, 2023, 35(3): 152-160.
BU X Q, WANG L Y, ZHU L H, et al. Characteristics and reservoir accumulation model of Ordovician fault-controlled fractured-vuggy reservoirs in Shunbei oil and gas field, Tarim Basin[J]. Lithologic Reservoirs, 2023, 35(3): 152-160. (in Chinese with English abstract)

[9] 马永生, 蔡勋育, 云露, 等. 塔里木盆地顺北超深层碳酸盐岩油气田勘探开发实践与理论技术进展 [J]. 石油勘探与开发, 2022, 49(1): 1-17.
MA Y S, CAI X Y, YUN L, et al. Practice and theoretical and technical progress in exploration and development of Shunbei ultra-deep carbonate oil and gas field, Tarim Basin, NW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2022, 49(1): 1-17. (in Chinese with English abstract)

[10] 马永生, 黎茂稳, 蔡勋育, 等. 中国海相深层油气富集机理与勘探开发: 研究现状、关键技术瓶颈与基础科学问题 [J]. 石油与天然气地质, 2020, 41(4): 655-672.
MA Y S, LI M W, CAI X Y, et al. Mechanisms and exploitation of deep marine petroleum accumulations in China: Advances, technological bottlenecks and basic scientific problems[J]. Oil & Gas Geology, 2020, 41(4): 655-672. (in Chinese with English abstract)

[11] 吕海涛, 韩俊, 张继标, 等. 塔里木盆地顺北地区超深碳酸盐岩断溶体发育特征与形成机制 [J]. 石油实验地质, 2021, 43(1): 14-22.
LÜ H T, HAN J, ZHANG J B, et al. Development characteristics and formation mechanism of ultra-deep carbonate fault-dissolution body in Shunbei area, Tarim Basin[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2021, 43(1): 14-22. (in Chinese with English abstract)

[12] 李梁, 孙庭斌, 陈迎楠, 等. 塔里木盆地肖塘南地区走滑断裂特征与断溶体勘探研究 [J]. 地质科技通报, 2023, 42(1): 239-245.
LI L, SUN T B, CHEN Y N, et al. Characteristics of strike-slip faults and exploration of fault-dissolution body in Xiaotangnan area of Tarim Basin[J]. Bulletin of Geological Scienceand Technology, 2023, 42(1): 239-245. (in Chinese with English abstract)

[13] 李宗杰, 杨子川, 李海英, 等. 顺北沙漠区超深断溶体油气藏三维地震勘探关键技术 [J]. 石油物探, 2020, 59(2): 283-294.
LI Z J, YANG Z C, LI H Y, et al. Three-dimensional seismic exploration method for ultra-deep fault-related dissolution reservoirs in the Shunbei desert area[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2020, 59(2): 283-294. (in Chinese with English abstract)

[14] 刘军, 龚伟, 黄超, 等. 塔里木盆地顺北5号走滑断裂带北段超深层裂缝储层的地震属性表征方法研究及应用 [J]. 地质科技通报, 2022, 41(4): 1-11.
LIU J, GONG W, HUANG C, et al. Seismic attribute characteristics of an ultradeep fractured- reservoir in the northern section of Shunbei No.5 strike-slip fault zone in Tarim Basin[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2022, 41(4): 1-11. (in Chinese with English abstract)

[15] 李海英, 刘军, 龚伟, 等. 顺北地区走滑断裂与断溶体圈闭识别描述技术 [J]. 中国石油勘探, 2020, 25(3): 107-120.
LI H Y, LIU J, GONG W, et al. Identification and characterization of strike-slip faults and traps of fault-karst reservoir in Shunbei area[J]. China Petroleum Exploration, 2020, 25(3): 107-120. (in

Chinese with English abstract）

[16] 漆立新. 塔里木盆地顺北地区海相超深碳酸盐岩油气勘探物探技术需求与创新应用 [J]. 石油物探, 2023, 62(3): 381-394.
QI L X. Technical demand and innovative application of geophysical exploration technology for marine ultra-deep carbonate rocks in Shunbei area, Tarim Basin[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2023, 62(3): 381-394. (in Chinese with English abstract)

[17] 何治亮, 朱成宏, 徐蔚亚, 等. 深层–超深层碳酸盐岩多类型储集体地震预测 [J]. 地球物理学报, 2023, 66(1): 65-82.
HE Z L, ZHU C H, XU W Y, et al. Seismic characterization of multi-type deep/ultra-deep carbonate reservoir[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2023, 66(1): 65-82. (in Chinese with English abstract)

[18] 廖茂辉, 刘军, 龚伟, 等. 顺北地区断控缝洞型储层反射特征与预测技术探讨 [J]. 工程地球物理学报, 2020, 17(6): 703-710.
LIAO M H, LIU J, GONG W, et al. Discussion on reflection characteristics and prediction technology of fault-controlling fractured-vuggy reservoir in Shunbei area[J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 2020, 17(6): 703-710. (in Chinese with English abstract)

[19] 张璐, 何峰, 陈晓智, 等. 基于倾角导向滤波控制的似然属性方法在断裂识别中的定量表征 [J]. 岩性油气藏, 2020, 32(2): 108-114.
ZHANG L, HE F, CHEN X Z, et al. Quantitative characterization of fault identification using likelihood attribute based on dip-steering filter control[J]. Lithologic Reservoirs, 2020, 32(2): 108-114. (in Chinese with English abstract)

[20] 王鹏, 刘军, 顾汉明. 不连续性属性增强技术在顺北地区断控不同尺度裂缝检测中的应用 [J]. 工程地球物理学报, 2019, 16(2): 131-137.
WANG P, LIU J, GU H M. The application of enhancement for seismic discontinuity attributes to detection of fracture with different scales in Shunbei area[J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 2019, 16(2): 131-137. (in Chinese with English abstract)

[21] 徐德奎, 王玉英, 郑江峰. 倾角导向的相干加强技术在改善复杂断块地震资料中的应用 [J]. 地球物理学进展, 2016, 31(3): 1224-1228.
XU D K, WANG Y Y, ZHENG J F. Dip steering coherent-enhancing filtering and its application on seismic data of complex fault-block[J]. Progress in Geophysics, 2016, 31(3): 1224-1228. (in Chinese with English abstract)

[22] 印兴耀, 张洪学, 宗兆云. OVT 数据域五维地震资料解释技术研究现状与进展 [J]. 石油物探, 2018, 57(2): 155-178.
YIN X Y, ZHANG H X, ZONG Z Y. Research status and progress of 5D seismic data interpretation in OVT domain[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2018, 57(2): 155-178. (in Chinese with English abstract)

[23] 印兴耀, 马正乾, 向伟, 等. 地震岩石物理驱动的裂缝预测技术研究现状与进展(Ⅰ): 裂缝储层岩石物理理论 [J]. 石油物探, 2022, 61(2): 183-204.
YIN X Y, MA Z Q, XIANG W, et al. Review of fracture prediction driven by the seismic rock physics theory(Ⅰ): Effective anisotropic seismic rock physics theory[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2022, 61(2): 183-204. (in Chinese with English abstract)

[24] 印兴耀, 马正乾, 宗兆云, 等. 地震岩石物理驱动的裂缝预测技术研究现状与进展(Ⅱ): 五维地震裂缝预测技术 [J]. 石油物探, 2022, 61(3): 373-391.
YIN X Y, MA Z Q, ZONG Z Y, et al. Review of fracture prediction driven by the seismic rock physics theory (Ⅱ): Fracture prediction from five-dimensional seismic data[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2022, 61(3): 373-391. (in Chinese with English abstract)

[25] 朱剑兵, 韩宏伟, 李红梅. 高分辨率五维地震道集优化处理技术及其应用 [J]. 石油物探, 2024, 63(3): 589-597.
ZHU J B, HAN H W, LI H M. High-resolution 5D seismic gather conditioning and its application[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2024, 63(3): 589-597. (in Chinese with English abstract)

[26] 韦欣法. 基于 OVT 域五维地震属性的裂缝预测: 以渤南洼陷沙四上亚段为例 [J]. 山东石油化工学院学报, 2023, 37(4): 1-5.
WEI X F. Fracture prediction based on five-dimensional seismic attributes in OVT domain: A case study of the Upper Submember of Es_4 in Bonan Sag[J]. Journal of Shandong Institute of Petroleum and Chemical Technology, 2023, 37(4): 1-5. (in Chinese with English abstract)

[27] 陈怀震, 印兴耀, 高成国, 等. 基于各向异性岩石物理的缝隙流体因子 AVAZ 反演 [J]. 地球物理学报, 2014, 57(3): 968-978.
CHEN H Z, YIN X Y, GAO C G, et al. AVAZ inversion for fluid factor based on fracture anisotropic rock physics theory[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2014, 57(3): 968-978. (in Chinese with English abstract)

[28] 范白涛, 何英明, 周长所, 等. 基于 Born 逆散射理论的反射系数参数化及弱度参数反演方法研究与应用 [J]. 地球物理学进展, 2022, 37(2): 570-576.
FAN B T, HE Y M, ZHOU C S, et al. Research and application of reflectance parameterization and inversion of weakness parameters based on Born inverse scattering theory[J]. Progress in Geophysics, 2022, 37(2): 570-576. (in Chinese with English abstract)

[29] 田新, 宋志华, 田治康, 等. 含气页岩储层脆性及裂缝参数方位地震反演方法研究与应用 [J]. 地球物理学进展, 2023, 38(3): 1191-1203.
TIAN X, SONG Z H, TIAN Z K, et al. Azimuthal variation of seismic amplitude for brittleness and fracture parameter of gas-bearing shale reservoir[J]. Progress in Geophysics, 2023, 38(3): 1191-1203. (in Chinese with English abstract)

[30] DOWNTON J E, ROURE B. Interpreting azimuthal Fourier coefficients for anisotropic and fracture parameters[J]. Interpretation, 2015, 3(3): ST9-ST27.

[31] PŠENČíK I, MARTINS J L. Properties of weak contrast PP reflection/transmission coefficients for weakly anisotropic elastic media[J]. Studia Geophysica et Geodaetica, 2001, 45(2): 176-199.

[32] BAKULIN A, GRECHKA V, TSVANKIN I. Estimation of fracture parameters from reflection seismic data: Part I: HTI model due to a single fracture set[J]. Geophysics, 2000, 65(6): 1788-1802.

[33] CONNOLLY P. Elastic impedance[J]. The Leading Edge, 1999,

18(4): 438-452.
[34] MA Z Q, YIN X Y, ZONG Z Y, et al. Azimuthally variation of elastic impedances for fracture estimation[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2019, 181: 106112.
[35] MA Z Q, YIN X Y, ZONG Z Y. Fracture parameters estimation from azimuthal seismic data in orthorhombic medium[J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2022, 100: 104470.
[36] MA Z Q, YIN X Y, LI K, et al. Fourier coefficients variation with angle for fracture detection and fluid discrimination in tilted transversely isotropic media[J]. Surveys in Geophysics, 2022, 43(3): 775-813.
[37] RÜGER A. P-wave reflection coefficients for transversely isotropic models with vertical and horizontal axis of symmetry[J]. Geophysics, 1997, 62(3): 713.
[38] RÜGER A. Variation of P-wave reflectivity with offset and azimuth in anisotropic media[J]. Geophysics, 1998, 63(3): 935.
[39] CONNOLLY P. Elastic impedance[J]. The Leading Edge, 1999, 18(4): 438-452.

Summary for "基于振幅属性的五维地震预测方法在顺北X井区的应用"

Application of five-dimensional seismic prediction method based on amplitude attribute in Shunbei Well X area

LI Hongyan*, GONG Wei, HAN Jun, ZHANG Yongsheng

SINOPEC Northwest Oilfield Company, Urumqi 830011, China

* Corresponding author, E-mail: lihongyan.xbsj@sinopec.com

Abstract: [**Objective**] In response to challenges such as strong reservoir heterogeneity, low signal-to-noise ratios in seismic data, insufficient prediction accuracy for poststack reservoirs, and difficulty in identifying fractures in ultradeep carbonate reservoirs in Shunbei, a new method is explored to increase the prediction accuracy for fractured reservoirs on the basis of five-dimensional seismic data. [**Methods**] To study the reservoir development characteristics of the Shunbei fault-controlled fracture-cave-type oil and gas reservoirs, a five-dimensional seismic anisotropic forward simulation was conducted, relationship between the seismic amplitude and fracture parameters were established, and the sensitive parameters for fracture prediction were optimized. On the basis, a Fourier series form of the directional elastic impedance equation was derived, fracture-type reservoir prediction was carried out, and the method was applied to the Shunbei Well X area. [**Results**] The AVAZ seismic response characteristics of ultradeep carbonate rock fault-controlled reservoirs were clarified, and the fracture density was identified as a sensitive parameter for identifying fractured reservoirs. Additionally, using second-order Fourier coefficients to characterize fracture development density, a precise characterization of fracture-type reservoirs in the Shunbei Well X area was achieved with high prediction accuracy. [**Conclusion**] The application of five-dimensional seismic prediction technology based on amplitude attributes enhances the prediction of the fracture development density and direction by utilizing amplitude and orientation information from wide-azimuth seismic data. The established Fourier coefficient fracture density mapping relationship provides a quantitative prediction tool for fracture-controlled fracture-cave reservoirs and offers new ideas for fracture prediction and target evaluation in such reservoirs.

Key words: Shunbei area; fault-controlled fracture-cavity reservoir; seismic amplitude attribute; five-dimensional seismic prediction; fracture density; azimuth angle; inciden angle; elastic impedance

Received: 2024-06-14; Revised: 2024-11-27; Accepted: 2024-12-17

doi: 10.19509/j.cnki.dzkq.tb20240328