Advances in Geosciences 地球科学前沿, 2026, 16(11), 1565-1574
Published Online November 2026 in Hans. https://www.hanspub.org/journal/ag
https://doi.org/10.12677/ag.2026.1611138

Hans汉斯

宽方位叠前振幅各向异性技术预测页岩储层裂缝

——以渝西地区足201井区为例

许佳鑫[1]，冯加阳[2]

[1]重庆科技大学石油与天然气工程学院，重庆
[2]四川普瑞斯安能源科技有限公司，四川 成都

收稿日期：2026年9月22日；录用日期：2026年10月27日；发布日期：2026年11月9日

摘　要

四川盆地渝西地区足201井区五峰组－龙马溪组页岩储层中天然裂缝较为发育，但裂缝尺度较小且非均质性强，传统叠后地震属性对这类微小裂缝的识别能力有限。针对这一问题，本文利用宽方位三维地震资料，开展了宽方位叠前振幅各向异性(AVAZ)方法研究。根据研究区埋深、构造特征及裂缝发育程度的空间差异性，将工区划分为三个地质子区域，分别优选“炮检距－方位角”叠加参数模板，并采用椭圆拟合方法逐点提取各向异性强度与裂缝优势方位。预测结果显示，研究区裂缝强度自西向东呈“弱－最强－较强”的阶梯状分布特征，优势走向以NE-SW向为主。与电成像测井裂缝解释结果对比表明，预测方位与测井裂缝玫瑰图吻合较好，说明AVAZ技术在研究区微小裂缝预测中是可行且有效的。

关键词

裂缝预测，叠前AVAZ，椭圆拟合，页岩储层，足201井区

Fracture Prediction in Shale Reservoirs Using Wide-Azimuth Pre-Stack Amplitude Anisotropy Technique

—A Case Study of the Zu 201 Well Block, Western Chongqing

Jiaxin Xu[1], Jiayang Feng[2]

[1]School of Petroleum and Natural Gas Engineering, Chongqing University of Science and Technology, Chongqing
[2]Sichuan Prisun Energy Technology Co., Ltd., Chengdu Sichuan

Received: September 22, 2026; accepted: October 27, 2026; published: November 9, 2026

文章引用: 许佳鑫, 冯加阳. 宽方位叠前振幅各向异性技术预测页岩储层裂缝[J]. 地球科学前沿, 2026, 16(11): 1565-1574. DOI: 10.12677/ag.2026.1611138

Abstract

Natural fractures are well developed in the Wufeng-Longmaxi Formation shale reservoirs in the Zu 201 well block, western Chongqing, Sichuan Basin. However, these fractures are characterized by small scale and strong heterogeneity, making them difficult to identify effectively using conventional post-stack seismic attributes. The wide-azimuth pre-stack amplitude variation with azimuth (AVAZ) technique utilizes fracture-induced seismic anisotropy responses to quantitatively predict the development intensity and dominant orientation of small-scale fractures. In this study, based on wide-azimuth 3D seismic data from the Zu 201 well block, the study area was divided into three geological subregions according to spatial differences in burial depth, structural characteristics, and fracture development degree. Offset-azimuth stacking templates were optimally selected for each sub-region, and the ellipse fitting method was employed to extract anisotropy intensity and fracture azimuth on a point-by-point basis. The prediction results reveal a stepped distribution pattern of fracture intensity from west to east, characterized as "weak - strongest - relatively strong," with the dominant fracture orientation trending NE-SW. Validation against electrical imaging logging fracture interpretation results shows that the predicted fracture azimuths are highly consistent with the fracture rose diagrams from well logging, confirming the reliability and effectiveness of the AVAZ technique in predicting small-scale fractures in shale reservoirs.

Keywords

Fracture Prediction, Pre-Stack AVAZ, Ellipse Fitting, Shale Reservoir, Zu 201 Well Block

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.
This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).
http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/
Open Access

1. 引言

天然裂缝是页岩储层重要的储集空间和渗流通道，直接控制着页岩气的富集与产能[1]。渝西地区足 201 井区五峰组－龙马溪组深层页岩储层中微裂缝较为发育，但这类裂缝尺度微小、地震各向异性响应微弱，如何有效刻画微小裂缝发育强度与优势走向，是制约本区页岩气勘探开发的关键技术问题[2]。

常规叠后地震方法(如相干、曲率等)主要识别宏观断裂和大尺度裂缝带，对未造成明显同相轴错断的微小裂缝刻画能力不足[3]。宽方位叠前振幅各向异性(AVAZ)技术基于裂缝诱导的 HTI 介质各向异性理论，通过提取振幅随方位角的变化特征来获取裂缝信息，对微小裂缝具有较好的敏感性[4]。但该技术的应用效果受“炮检距－方位角”叠加模板影响较大，不同地质条件下需分区参数优选[5]。

基于以上认识，本文以足 201 井区宽方位三维地震资料为依托，采用分区优选叠加模板的方法开展 AVAZ 裂缝预测，以期为该区页岩储层微小裂缝识别提供技术参考。

2. 区域地质背景

足 201 井区位于四川盆地东南部渝西地区，构造上处于川中平缓构造带与川南低陡构造带的过渡交界部位，总面积约 600 km^2 (图 1)。整体构造呈西低东高格局，自西向东依次发育弥陀场向斜、西山背斜、蒲吕场向斜等构造单元，区内断裂系统整体以 NE-SW 走向为主[6]。目的层五峰组－龙一 $_1$ 亚段为典型海相深水陆棚沉积，优质页岩厚度较大，微裂缝发育，是页岩气富集的有利层段。

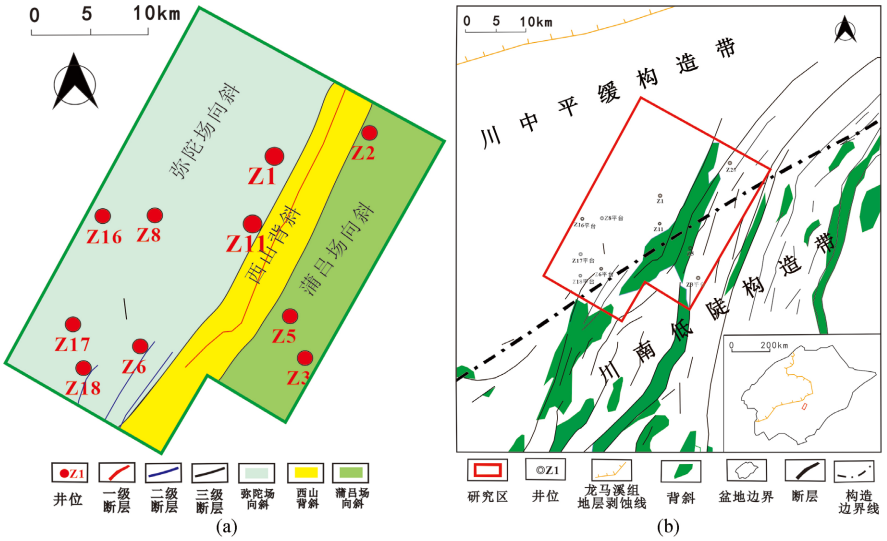
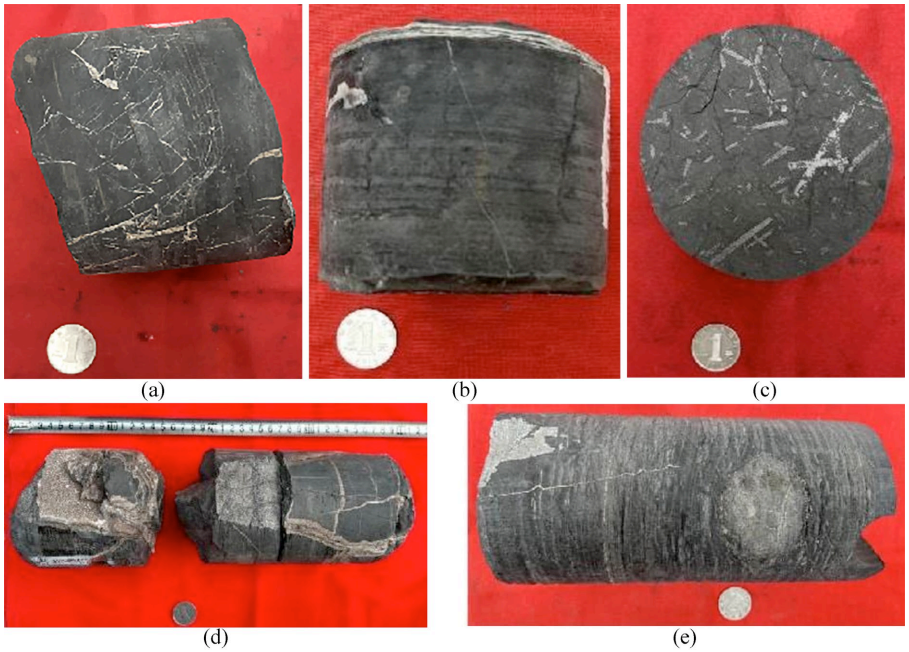


Figure 1. Structural location (a) and extent (b) of the study area. (a) Structural Position of the Zu 201 Block in the Western Chongqing Region; (b) Extent of the research area
图 1. 研究区构造位置(a)及范围图(b)。(a) 渝西地区足 201 区块构造位置；(b) 研究区范围图

岩心观察显示，研究区页岩天然裂缝主要分为构造裂缝与成岩裂缝两类，高角度构造裂缝普遍见方解石充填现象(图 2)。



注：(a) Z1 井，4371.21 m，发育多期裂缝，方解石充填；(b) Z6 井，4272.42 m，高角度缝；(c) Z1 井，4371.5 m，高角度缝；(d) Z3 井，4311.82~4312.11 m，发育多期裂缝，方解石充填；(e) Z8 井，4356.4 m，高角度缝。

Figure 2. Photo of fracture characteristics of shale core in Wufeng-Longmaxi Formation
图 2. 五峰组－龙马溪组页岩岩心裂缝特征照片

研究区叠前地震资料以宽方位、低频为特征，其核心价值在于保留了用于裂缝方位预测的方位各向

异性信息。

3. 原理与方法

3.1. 宽方位叠前振幅各向异性原理

当岩石中发育定向排列的微小裂缝时，岩石表现出横向各向同性(HTI)介质特征[7]。如图 3 所示，地震波在 HTI 介质中传播时，垂直于裂缝走向的方向为快波方向，平行于裂缝走向的方向为慢波方向。地震反射振幅随方位角呈椭圆式周期性变化；振幅椭圆长轴方向对应裂缝优势走向，椭圆扁率(长/短轴比值)表征地震各向异性强度，间接反映地下裂缝发育密度[8] [9]。需要指出的是，HTI 模型假设裂缝为单一组系、垂直或近垂直定向排列的理想情况。研究区五峰组－龙马溪组页岩岩心观察表明，高角度构造裂缝占主导(图 2)，裂缝优势走向以 NE-SW 向为主，这与 HTI 介质的假设条件基本吻合，为该技术的应用提供了合理的地质基础。然而，应当认识到实际地层中可能存在偏离 HTI 假设的复杂情况：(1)当发育多组正交或斜交裂缝时，介质表现为正交各向异性；(2)页岩本身具有的层理和各向异性黏土矿物定向排列可能导致 VTI 背景与裂缝诱导的 HTI 叠加，形成更为复杂的各向异性模式。当前 AVAZ 分析采用的椭圆拟合方法主要适用于 HTI 或近 HTI 介质，对于多组裂缝共存或 VTI + HTI 叠加情形，椭圆拟合的可靠性将有所下降。

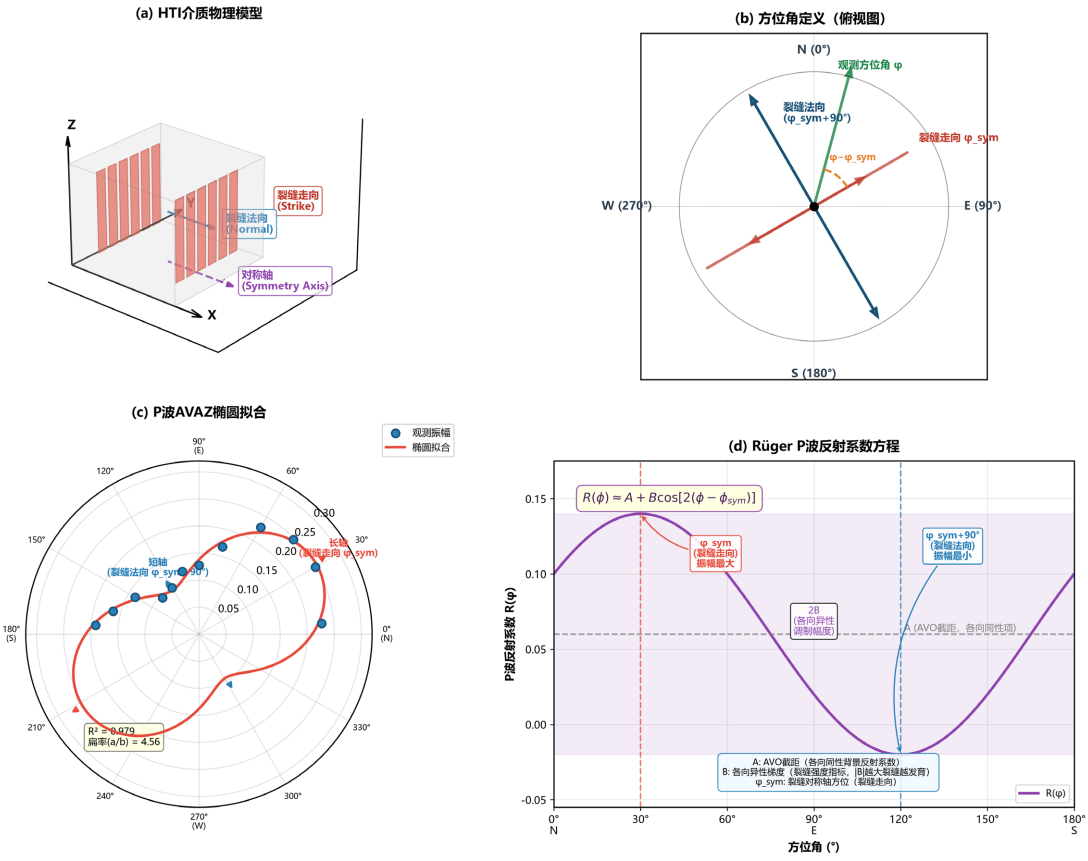


Figure 3. Schematic diagram of P-wave azimuthal anisotropy propagation in HTI media. (a) Physical model of HTI media; (b) Top view of azimuth definition; (c) AVAZ ellipse fitting of P-wave; (d) Rüger reflection coefficient equation

图 3. HTI 介质 P 波方位各向异性传播示意图。(a) HTI 介质物理模型；(b) 方位角定义俯视图；(c) P 波 AVAZ 椭圆拟合；(d) Rüger 反射系数方程

通过提取不同方位角上的地震振幅，进行椭圆拟合，即可获得裂缝强度与裂缝方位角两个关键参数：
各向异性强度：椭圆长轴与短轴之比，反映裂缝发育密度；
裂缝方位角：椭圆长轴方向，指示裂缝优势走向。

3.2. 分区炮检距－方位角叠加模板优选策略

AVAZ 技术的核心在于合理选择“炮检距－方位角”叠加模板。模板设置过小，道集覆盖次数不足，地震信噪比偏低；模板过大，不同方位的振幅信息被平滑平均，会弱化裂缝引起的各向异性响应[10]。

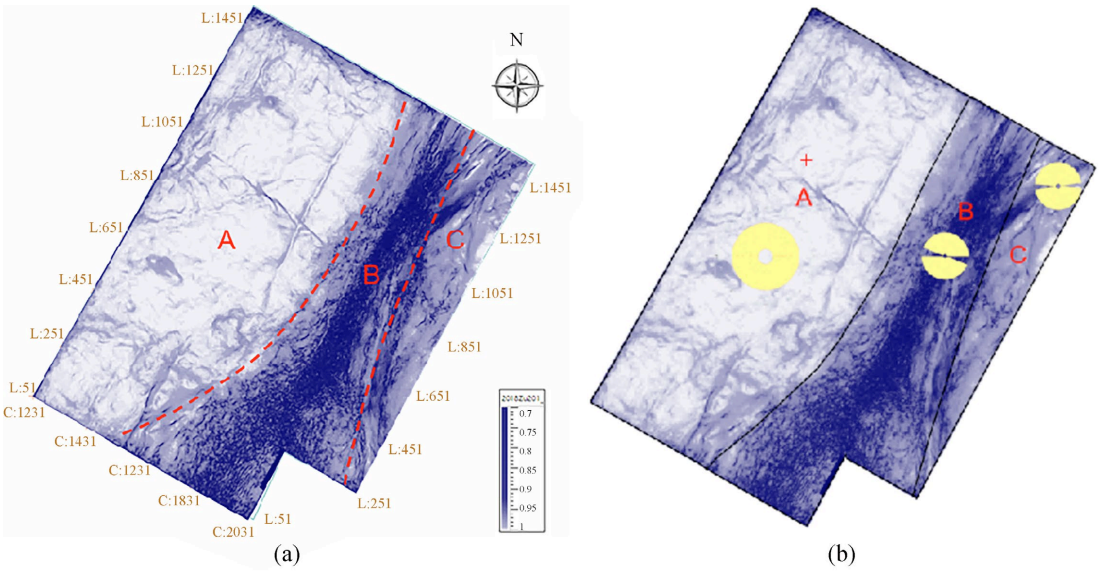


Figure 4. Pre-stack seismic fracture prediction zonation (a) and schematic of the zonal stacking template (b). (a) Pre-stack seismic fracture prediction zonation; (b) Anisotropic fracture calculation boundary with partitioned stacking templates
图 4. 叠前地震裂缝预测分区(a)及分区叠加模板示意图(b)。(a) 叠前地震裂缝预测分区；(b)各向异性裂缝计算边界与分区叠加模板示意图

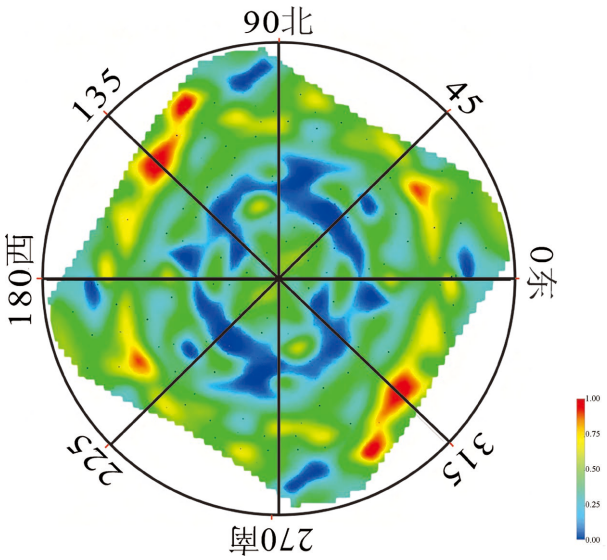


Figure 5. Amplitude slice
图 5. 振幅切片

考虑到研究区横向跨度大、地质条件非均质性强，本文依据埋深、构造特征和裂缝发育程度的空间差异，将研究区划分为三个地质子区域(图 4)，分别开展叠加模板优选。三个子区域的具体划分边界与量化依据如下：区域 A (西部弥陀场向斜区)目的层埋深 3400~3700 m，地层倾角普遍 ＜5°，构造变形微弱，叠前地震信噪比相对较高；区域 B (中部西山背斜区)目的层埋深 3700~4200 m，地层倾角 5°~20°，受 NE－SW 向区域大断裂控制，构造变形剧烈；区域 C (东部蒲吕场向斜翼部区)目的层埋深 3800~4300 m，地层倾角 3°~12°，受次级断裂影响。分区边界主要依据构造等高线(五峰组底界埋深等值线)和相干属性的突变带综合确定(图 4)，确保各子区域内地质条件相对均一、各子区域间具有明显差异。

以区域 A 为例，通过对比三组不同“炮检距－方位角”叠加模板的椭圆拟合效果(图 5，图 6)，模板 b 拟合散点分布均匀集中，与振幅切片揭示的方位变化趋势高度一致，椭圆拟合相关系数最高，故确定为最优模板，各子区域最优叠加模板参数见表 1。

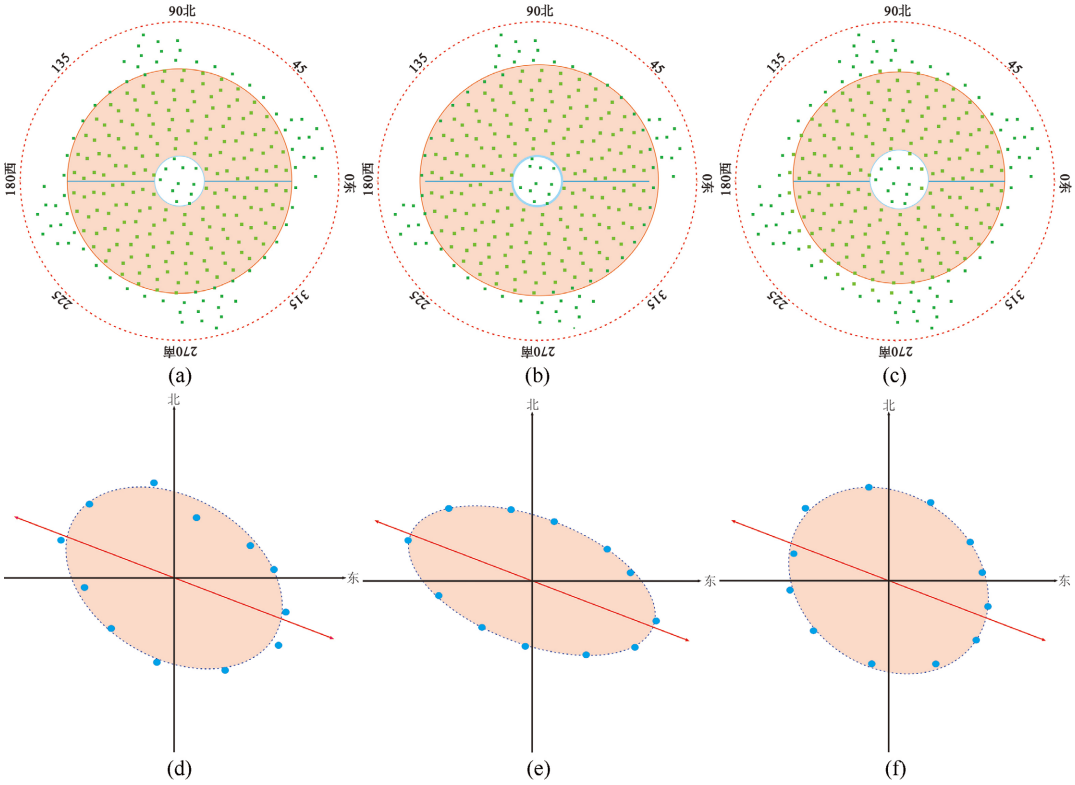


Figure 6. Preferred “offset-azimuth” Stacking template. (a) Stacking template a; (b) Stacking template b; (c) Stacking template c; (d) Ellipse fitting effect a; (e) Ellipse fitting effect b; (f) Ellipse fitting effect c
图 6. 优选“炮检距－方位角”叠加模板。(a) 叠加模板 a；(b) 叠加模板 b；(c) 叠加模板 c；(d) 椭圆拟合效果 a；(e) 椭圆拟合 b；(f) 椭圆拟合 c

Table 1. Table of stacking template parameters for the three sub-regions
表 1. 三个子区域最优叠加模板参数一览表

子区域	炮检距范围(m)	方位角扇区划分	扇区数	椭圆拟合 R^2
A	200~3200	0°~45°/45°~90°/90°~135°/135°~180°	4	0.91
B	400~3800	0°~60°/60°~120°/120°~180°	3	0.85
C	300~3500	0°~45°/45°~90°/90°~135°/135°~180°	4	0.88

区域 B 因构造变形剧烈、地层倾角较大，采用 3 扇区(较宽方位角间隔)模板以保证足够的覆盖次数；区域 A 和 C 构造相对平缓，采用 4 扇区模板以获得更高的方位分辨率。

4. 预测结果分析

基于各子区域优选模板，对目的层五峰组开展逐点各向异性计算，提取各向异性强度与裂缝方位角。

4.1. 裂缝强度分布特征

预测结果(图 7)表明，研究区裂缝强度自西向东呈“弱－最强－较强”的阶梯状分布特征：

弱裂缝区：位于西部弥陀场向斜区域，构造变形平缓，各向异性强度低；

最强裂缝区：位于中东部西山构造区域，受北东－南西向区域性大断裂影响，构造变形剧烈，各向异性强度最高；

较强裂缝区：位于最东部蒲吕场向斜翼部区域，受次级断裂影响，裂缝强度中等偏高。

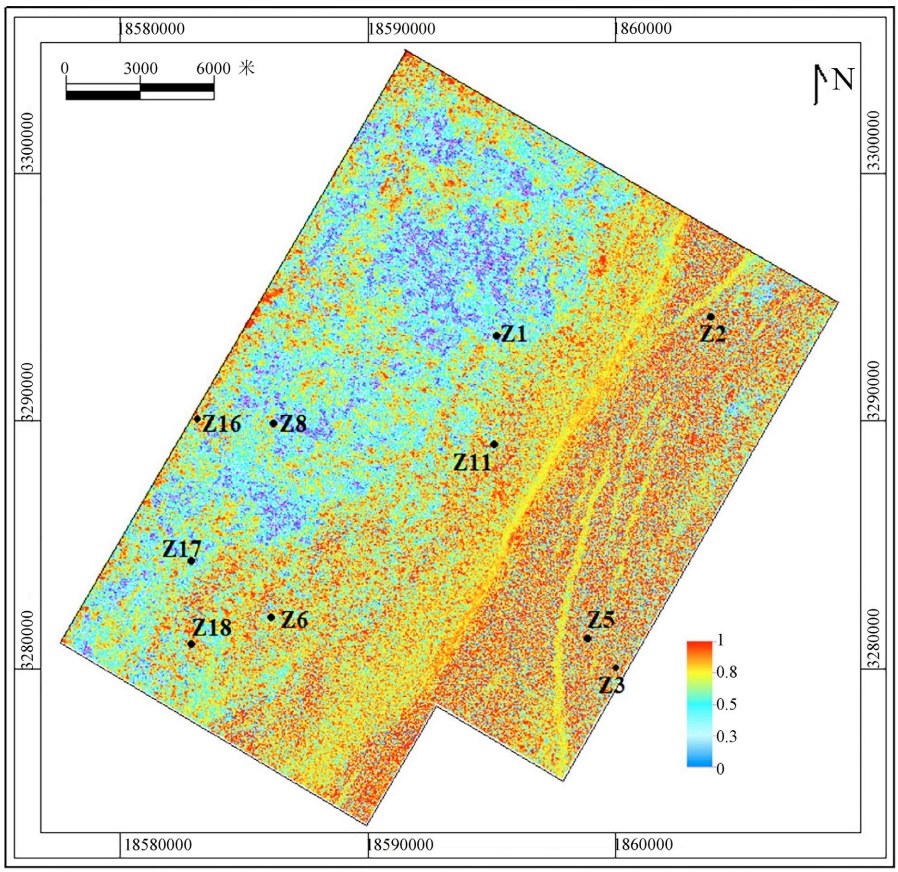


Figure 7. Pre-stack fracture intensity prediction map of Wufeng Formation
图 7. 五峰组叠前裂缝预测强度平面图

图中的色标颜色条表示各向异性强度(椭圆扁率，即拟合椭圆长轴与短轴之比)，无量纲。暖色调(红色)代表高各向异性强度(裂缝发育)，冷色调(蓝色)代表低各向异性强度(裂缝不发育)。

4.2. 裂缝发育强度与地震资料品质的关联分析

对比 I、II 类地震资料品质区的裂缝预测结果发现：I 类品质区裂缝预测的横向连续性好、异常边界

清晰；II 类品质区受低频、低信噪比影响，裂缝异常边界模糊，同一位置叠前与叠后预测的裂缝强度偏差较大，需在后续应用中予以重视。

4.3. 叠前与叠后裂缝预测结果的差异性分析

叠前 AVAZ 与蚂蚁体预测结果虽整体趋势一致，但在以下区域存在显著差异[11]：

(1) 构造平缓区(弥陀场向斜西部)，蚂蚁体裂缝强度极低(<30)，而叠前 AVAZ 强度仍可达 35~45，推测蚂蚁体对非构造成因的层理缝识别能力不足；

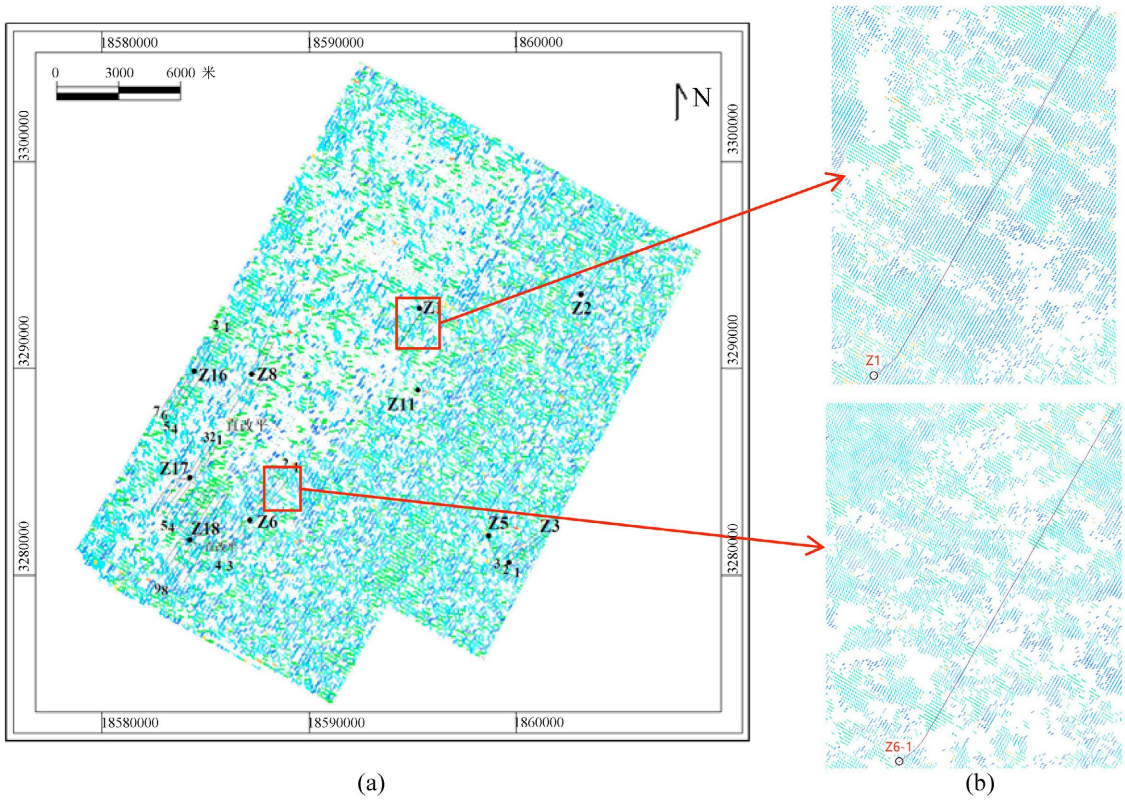
(2) 断裂破碎带附近，蚂蚁体表现为连续高强度条带，叠前 AVAZ 由于方位角信息被破坏而表现为离散的斑点状异常。二者差异的区域正是裂缝成因机制转换的反映。

4.4. 不同方位角道集对各向异性强度的贡献分析

各子区域中不同方位角扇区(0˚~60˚、60˚~120˚、120˚~180˚)对椭圆拟合的贡献比例，发现区域 B (西山构造区)中 120˚~180˚扇区的振幅各向异性贡献最大，与该区 NE-SW 向主裂缝方向密切相关，表明该扇区的数据质量对最终预测结果有决定性影响。

4.5. 裂缝优势走向分析

裂缝方位预测结果(图 8)显示，整体裂缝优势走向为北东－南西向，其次为北西－南东向，与研究区宏观断裂展布方向一致。



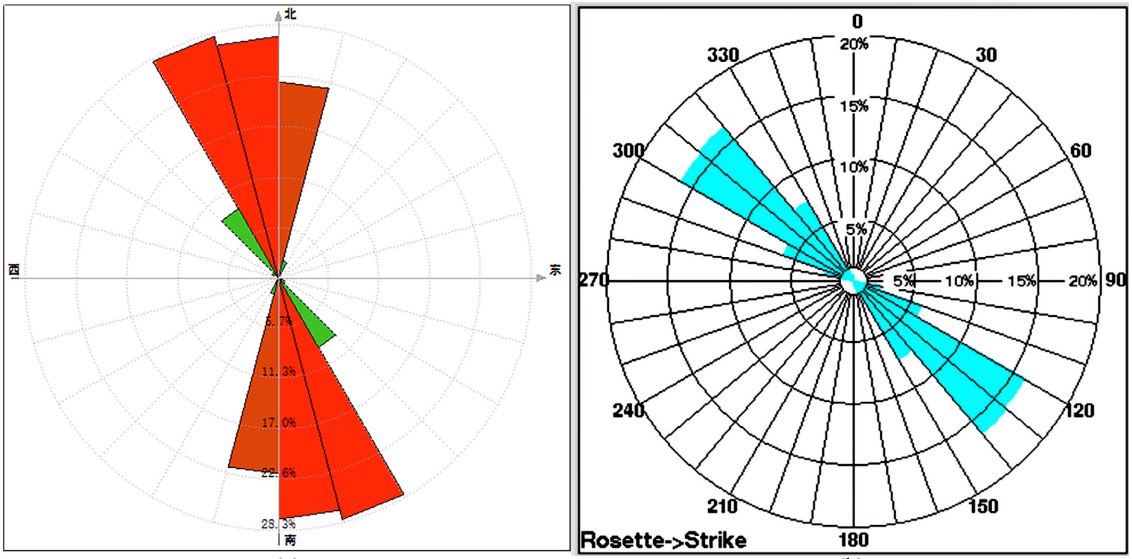
(a) (b)

Figure 8. Pre-stack fracture prediction azimuth map of Wufeng Formation and wells Z1 and Z3-1. (a) Pre-stack fracture prediction azimuth planar map of Wufeng Formation; (b) Azimuth map of Z1 and Z3-1 wells

图 8. 五峰组及 Z1、Z3-1 井周叠前裂缝方位预测平面图。(a) 五峰组叠前裂缝预测方位平面图；(b) Z1、Z3-1 井方位平面图

4.6. 预测结果验证

选取研究区内 Z1、Z3-1 两口井，利用电成像测井资料提取的裂缝信息与地震预测结果进行对比验证(图 9)。Z1 井叠前地震椭圆拟合裂缝分析玫瑰图与电成像测井裂缝分析玫瑰图均显示裂缝优势走向为北西－南东向，二者高度吻合，验证了 AVAZ 裂缝预测技术的可靠性。



(a) (b)

Figure 9. Rose diagram of pre-stack seismic ellipse fitting and electrical imaging logging fracture analysis for Well Z1. (a) Rose diagram of pre-stack seismic ellipse fitting fracture analysis for Well Z1; (b) Rose diagram of fracture analysis in Z1 well electrical imaging logging

图 9. Z1 井叠前地震椭圆拟合与电成像测井裂缝分析玫瑰图。(a) Z1 井叠前地震椭圆拟合裂缝分析玫瑰图；(b) Z1 井电成像测井裂缝分析玫瑰图

表 2 统计了 Z1 井与 Z3-1 井预测裂缝方位与实测裂缝方位的对比结果，二者误差均在可接受范围内。

Table 2. Comparison of predicted fracture orientations with those from electrical imaging logging

表 2. 预测裂缝方位与电成像测井裂缝方位对比

井名	预测主导方位	实测主导方位	误差
Z1	NW-SE	NW-SE	<5˚
Z3-1	NE-SW	NE-SW	<5˚

同时，受研究区钻井分布限制，目前仅有 Z1 和 Z3-1 两口井可用于 AVAZ 裂缝预测结果的定量验证。尽管两口井的预测方位与实测方位吻合较好，但有限的验证样本量尚不足以全面评估该技术在整个工区内的适用性。随着后续钻井的增多，应持续开展预测结果的动态验证与模板参数的迭代优化。

4.7. 裂缝预测对工程甜点划分的初步探讨

初步分析表明，将裂缝强度分级与裂缝走向分区叠加，可形成“裂缝工程甜点”的二维划分方案：裂缝发育强度适中(二类区)、裂缝走向与区域最大水平主应力呈大角度相交的区域，为水平井压裂改造的工程甜点有利靶区。研究区内符合该条件的区域主要分布在西山背斜两翼。

5. 结论

(1) 宽方位叠前 AVAZ 技术通过分区优选“炮检距–方位角”叠加模板，可有效预测页岩储层微小裂缝的发育强度与优势走向，一定程度上弥补传统叠后地震属性识别微小裂缝能力不足的问题。

(2) 研究区五峰组裂缝强度自西向东呈“弱–最强–较强”的阶梯状分布特征，中东部西山构造区域为裂缝最发育区；裂缝优势走向以北东–南西向为主。

(3) 预测结果经两口井的电成像测井裂缝解释初步验证，预测裂缝优势方位与实测裂缝玫瑰图较为一致，表明 AVAZ 技术在研究区页岩储层微小裂缝预测中具有一定的可行性与应用潜力，可为后续水平井轨迹优化设计提供参考。但鉴于验证井数量有限(仅 2 口)，预测结果的全区可靠性仍需更多钻井资料进一步检验。

基金项目

重庆科技大学研究生科技创新项目“渝西地区龙马溪组页岩纹层弱面类型与压裂效果相关性分析及应用”(立项编号：YKJCX2520114)资助。

参考文献

[1] 曾联波, 马诗杰, 田鹤, 等. 富有机质页岩天然裂缝研究进展[J]. 地球科学, 2023, 48(7): 2427-2442.

[2] 张成林, 张鉴, 李武广, 等. 渝西大足区块五峰组-龙马溪组深层页岩储层特征与勘探前景[J]. 天然气地球科学, 2019, 30(12): 1794-1804.

[3] 刘宇巍, 刘喜武, 韩磊, 等. 地震裂缝预测技术发展现状[J]. 世界石油工业, 2024, 31(3): 26-34.

[4] 崔刚, 李秀容, 王津津, 等. 叠前方位各向异性技术在潜山储层裂缝预测中的应用[J]. 海洋地质前沿, 2022, 38(10): 59-68.

[5] 陈珂磷, 杨扬, 井翠, 等. 页岩裂缝型储层模型参数化及 AVAZ 反演预测方法研究[J]. 地球物理学进展, 2022, 37(6): 2364-2372.

[6] 郭建林, 贾成业, 何东博, 等. 四川盆地川南地区五峰组-龙马溪组页岩储层分类评价[J]. 高校地质学报, 2020, 26(3): 323-332.

[7] 梁志强. 不同尺度裂缝的叠后地震预测技术研究[J]. 石油物探, 2019, 58(5): 766-772.

[8] 陈楠, 徐雷鸣, 宋志翔, 等. 叠前 P 波方位各向异性裂缝检测软件研制与应用[J]. 石油物探, 2018, 57(6): 914-926.

[9] Rüger, A. (1998) Variation of *P*-Wave Reflectivity with Offset and Azimuth in Anisotropic Media. *Geophysics*, **63**, 935-947. https://doi.org/10.1190/1.1444405

[10] 刘恩良, 丁拼搏, 张峰, 等. 利用物理模拟地震数据验证基于方位各向异性的裂缝预测方法[J]. 地球物理学报, 2025, 68(7): 2684-2702.

[11] 鲁统祥, 李明, 盖永浩, 等. 基于 OBC 地震资料的叠后叠前多尺度裂缝预测技术在涠西南潜山储层中的应用[J]. 物探化探计算技术, 2024, 46(2): 154-163.