

蚂蚁体参数敏感性分析及足201井区龙马溪组页岩储层裂缝预测研究

冯加阳, 刘鸿宇, 陈志愿, 许佳鑫

重庆科技大学石油与天然气工程学院, 重庆

收稿日期: 2025年9月19日; 录用日期: 2025年10月20日; 发布日期: 2025年10月29日

摘 要

天然裂缝是影响页岩气产能的关键因素之一, 四川盆地五峰组-龙马溪组优质页岩是中国南方海相页岩气开发的主力产层, 前人对该地区页岩储层裂缝研究较少。本文以四川盆地足201井区龙马溪组页岩储层为研究对象, 分析了初始蚂蚁边界、蚂蚁追踪背离、蚂蚁搜索步长、非法步长、合法步长及终止条件等六个关键参数对裂缝提取结果的影响规律, 明确了各参数对蚂蚁体稀疏性或密集性的控制作用。结合实际地震属性与地质特征, 优化参数并进行方向约束与产状过滤, 结果表明足201龙马溪组南部较北部裂缝发育程度明显偏高、东部较西部裂缝发育程度明显偏高。经验证, 蚂蚁追踪结果与电成像测井解释的裂缝走向高度一致, 表明该方法在复杂构造区页岩储层裂缝识别中具有较高的可靠性和实用性, 为该类地区的裂缝建模与油气开发提供了有效技术支撑。

关键词

蚂蚁追踪技术, 参数对比, 裂缝预测, 地震属性

Sensitivity Analysis of Ant-Tracked Parameters and Fracture Prediction in the Longmaxi Formation Shale Reservoir of Zu 201 Block

Jiayang Feng, Hongyu Liu, Zhiyuan Chen, Jiaxin Xu

School of Petroleum Engineering, Chongqing University of Science & Technology, Chongqing

Received: September 19, 2025; accepted: October 20, 2025; published: October 29, 2025

文章引用: 冯加阳, 刘鸿宇, 陈志愿, 许佳鑫. 蚂蚁体参数敏感性分析及足 201 井区龙马溪组页岩储层裂缝预测研究[J]. 地球科学前沿, 2025, 15(10): 1471-1485. DOI: 10.12677/ag.2025.1510137

Abstract

Natural fractures are one of the key factors affecting shale gas productivity. The high-quality shale in the Wufeng-Longmaxi Formations in the Sichuan Basin is the main producing layer for marine shale gas development in southern China. Previous studies on fractures in the shale reservoirs of this region have been relatively limited. This paper focuses on the shale reservoir of the Longmaxi Formation in the Zu 201 Block of the Sichuan Basin. It analyzes the influence of six key parameters—Initial Ant Boundary, Ant Tracking Deviation, Ant Step Length, Illegal Step Length, Legal Step Length, and Stopping Criteria—on fracture extraction results, and clarifies the control effect of each parameter on the sparsity or density of the ant-tracked attribute volume. By integrating seismic attributes and geological characteristics, parameters were optimized with directional and geometric constraints. The results indicate that the fracture development degree in the southern part of the Longmaxi Formation in Zu 201 Well Block is significantly higher than that in the northern part, and the eastern part exhibits notably higher fracture density compared to the western part. Verification through electrical imaging log interpretation shows a high consistency with the fracture orientations predicted by ant tracking, demonstrating the reliability and practical utility of this method for fracture identification in complex structural shale reservoirs. This study provides effective technical support for fracture modeling and hydrocarbon development in similar areas.

Keywords

Ant Tracking, Parameter Comparison, Fracture Prediction, Seismic Properties

Copyright © 2025 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

随着油气勘探开发对象日益复杂，常规构造解释已难以满足对断层、裂缝系统描述的需求[1]。尤其是在四川盆地这类构造活动强烈的地区，发育的裂缝网络是致密砂岩气、页岩气等非常规资源高产稳产的关键控制因素。蚂蚁追踪(Ant Tracking)技术，模仿蚂蚁觅食路径寻优的生物智能算法，能够从三维地震数据体中自动、高效地提取断层和裂缝的空间展布信息，其解释精度和效率远高于人工解释[2]。然而，该技术的应用效果高度依赖于处理人员对核心参数的理解与设置。不同的参数组合会得到截然不同的追踪结果，或过于稀疏遗漏细节，或过于杂乱引入噪声。因此，该次研究通过设置对照组和试验组对每个参数设置对比试验，直观显示每个参数的影响作用，并结合实际工区进行验证，具有重要的现实意义。

2. 区域地质概况

四川盆地位于扬子准地台的西北缘，西北为龙门山断褶带，东北为大巴山断褶带，西南为峨眉瓦山断块带和娄山褶皱带，东南为川湘拗陷断褶带[3]，是一个呈北东向展布的菱形盆地，具典型多旋回、多层次结构、多期构造变动等特点，面积约 $26 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。四川盆地在构造演化过程中主要可划分为 3 个演化阶段、6 个旋回：第一阶段处于太古代 - 早震旦世，经历中元古代多次地壳增生作用，最终于晋宁运动使扬子地台固结形成统一的基地陆块(扬子旋回)；第二阶段为晚震旦世 - 中三叠世海相碳酸盐岩台地发展阶段，主要以加里东旋回、海西旋回、印支旋回、燕山旋回为主；第三阶段为晚三叠世 - 第四纪陆内改造阶段，主要以喜马拉雅旋回为主[4]。研究区位于四川盆地东南部的渝西地区，总面积约 430 平方千

米，地处川中低平构造区与川南低陡构造区的交界地带[5]。该区域构造形态呈狭长状展布，整体隆起幅度显著，构造轴线主要呈北东走向。自西向东依次发育有弥陀场向斜、西山背斜、蒲吕场向斜和西温泉背斜等一系列地质构造单元(图 1)根据断裂发育状况可知，西山背斜和西温泉背斜区域是断裂发育的主要区域，蒲吕场向斜和弥陀场向斜的断裂相对较少的。

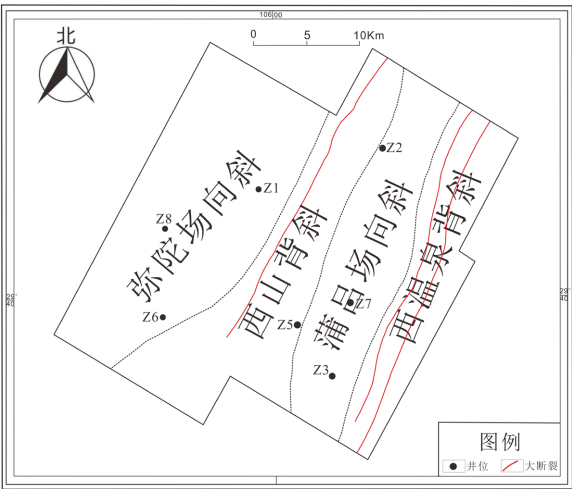


Figure 1. Research area plan
图 1. 研究区平面图

3. 蚂蚁追踪技术原理及关键参数分析

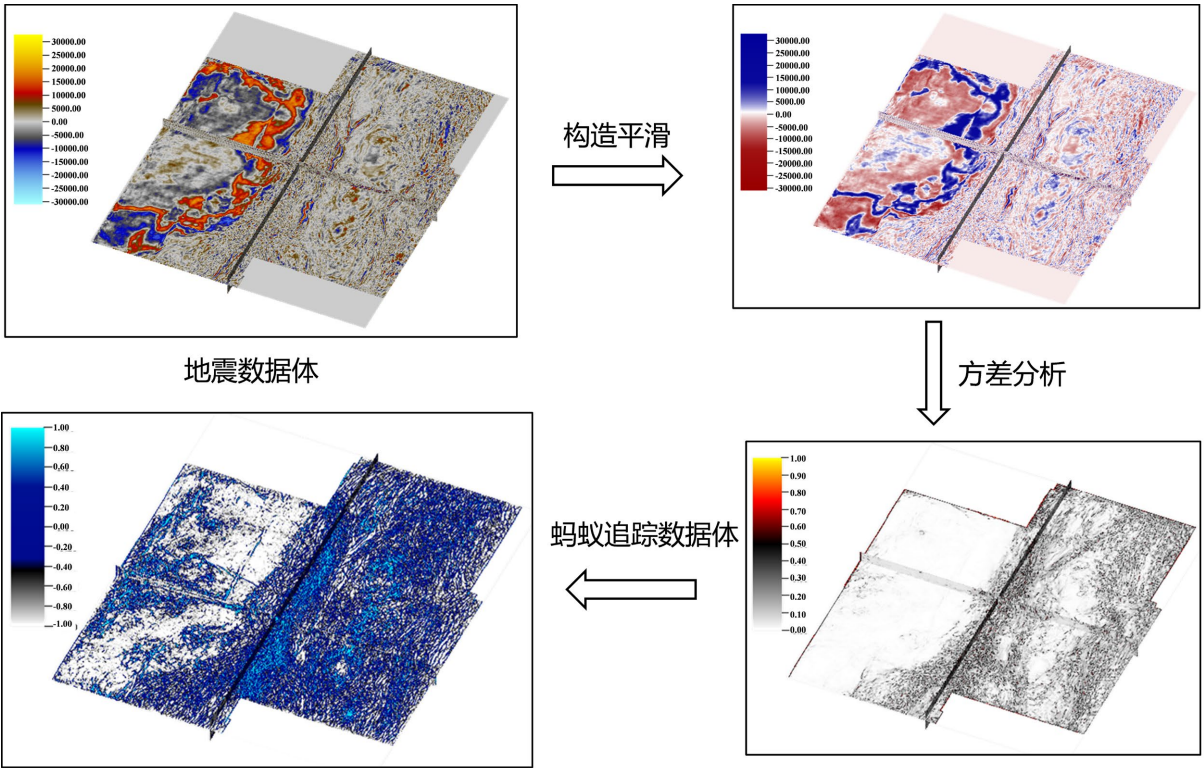


Figure 2. Ant tracking technology flow chart
图 2. 蚂蚁追踪技术流程简图

蚂蚁追踪技术基本过程是：将大量虚拟“蚂蚁”随机置于数据体中，蚂蚁根据其周围区域的“信息素”(即不连续性特征的强弱)概率性地移动并释放信息素，最终在断裂特征明显的路径上形成高信息素浓度，从而勾勒出断层和裂缝的轨迹[6]。基于蚁群算法的正反馈机制，在对地震数据体进行数据平滑、边缘检测等一系列解释性处理后，在叠后地震不连续性属性基础之上，通过类似蚂蚁系统的追踪方法完成断层和裂缝的追踪与预测。蚂蚁追踪所获得的地震属性体的振幅相关系数分布是对地下构造(如断层、裂缝)识别结果的一种综合质量评估和可靠性验证，系数值范围通常在-1 到 1 之间，数值 1 表示两个信号完全相似，数值 0 表示两个信号毫无关系，数值-1 表示两个信号完全相反。具体流程如图 2 所示。

在这个过程中，涉及到 6 个参数的选取(初始蚂蚁边界、蚂蚁追踪背离、蚂蚁搜索步长、非法步长、合法步长、终止条件)。该次研究通过设置对照组和试验组对每个参数设置对比试验直观显示该参数的影响作用。

Table 1. Control group parameter selection
表 1. 对照组参数选择

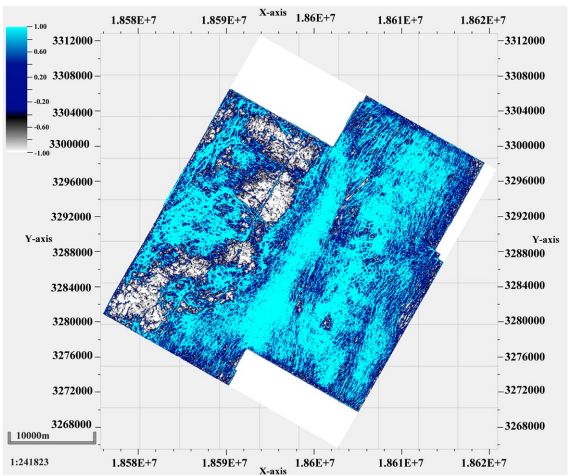
对照组参数	初始蚂蚁边界	蚂蚁追踪背离	蚂蚁搜索步长	非法步长	合法步长	终止条件
取值	11	2	5	2	2	25

对照组中的 6 个参数都取中间值(表 1)，试验组中每个参数都取软件所提供的最小值和最大值，其他参数不变，然后结合对照组和试验组结果分析某特定参数的影响作用。下面是试验组参数的选择过程：

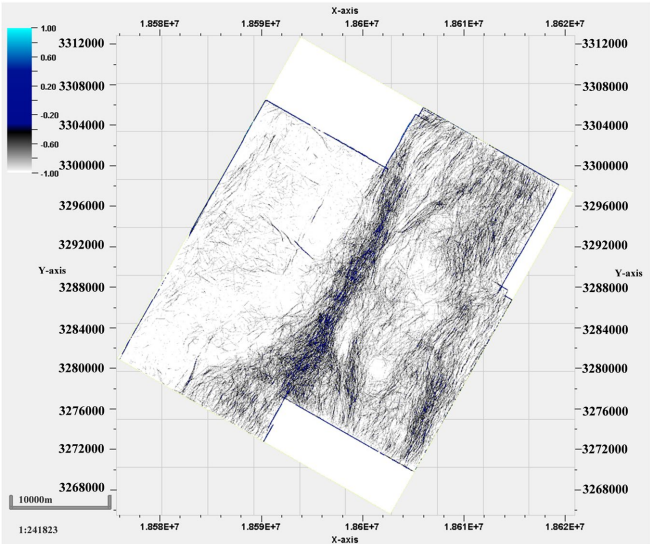
(1) 初始蚂蚁边界(样点数 1~30)

该参数用于确定蚂蚁算法中初始蚂蚁种群的数量及其在三维数据空间中的初始分布范围。初始蚂蚁边界值越大，意味着投入计算的蚂蚁数量越多，且每只蚂蚁被允许的初始活动范围也更广，从而显著增强算法在全局范围内的断裂搜索能力。然而，该参数的增大会大幅增加计算复杂度，对算法的执行时间产生明显影响[7]。

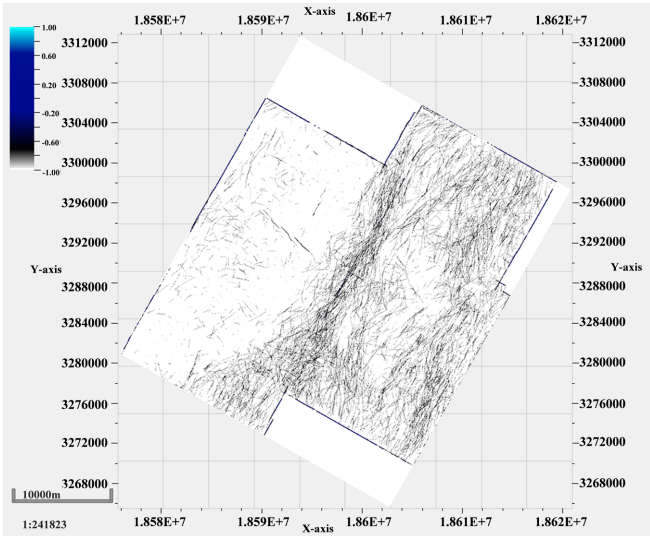
在本试验中，分别将初始蚂蚁边界设置为最小值 1 和最大值 30 进行对比(图 3)。结果显示，当该参数取值较大(如 30)时，蚂蚁追踪所获得的地震属性体在振幅相关系数分布上更倾向于-1 (图 4)。这说明更大范围的初始蚂蚁分布虽可覆盖更多潜在断裂，但也引入了更多噪声或不确定性响应，导致最终生成的蚂蚁属性体结构相对稀疏、断裂网络的连通性较低；反观取值为 1 时，算法聚焦于局部高相关性信号，蚂蚁体结果更密集，但对大范围断裂体系的识别能力有限。



(a) 初始蚂蚁边界 = 1

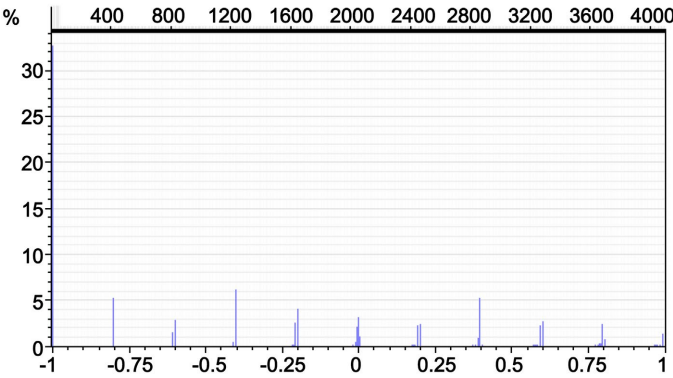


(b) 初始蚂蚁边界 = 15



(c) 初始蚂蚁边界 = 30

Figure 3. Diagram of parameter comparison of ant initial boundary
图 3. 蚂蚁初始边界参数对比图



(a) 初始蚂蚁边界 = 1

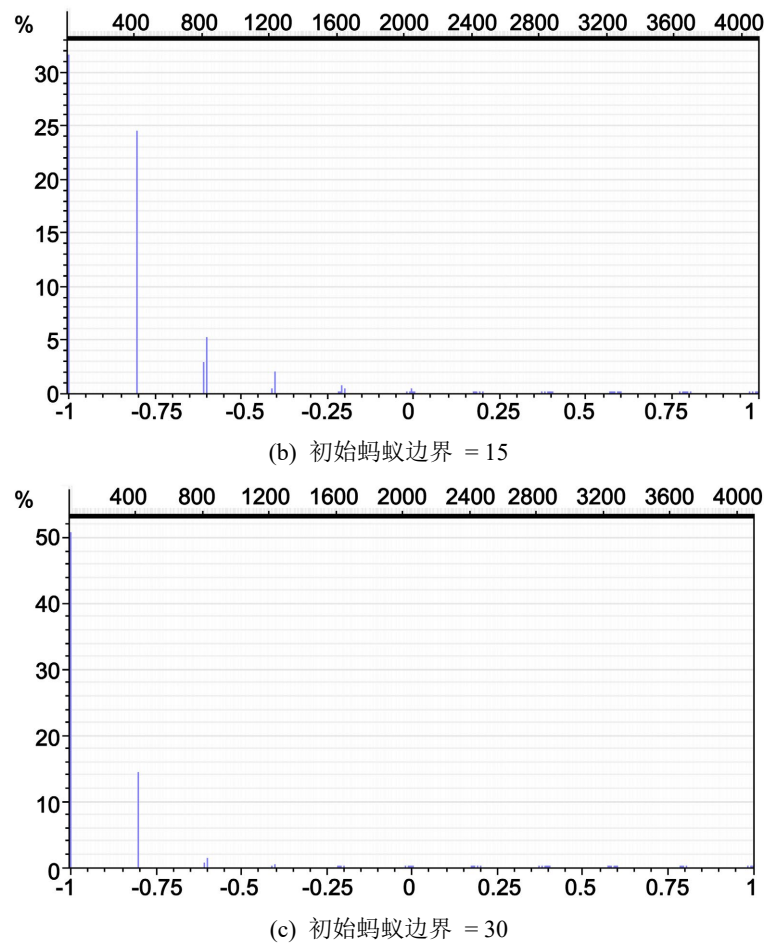
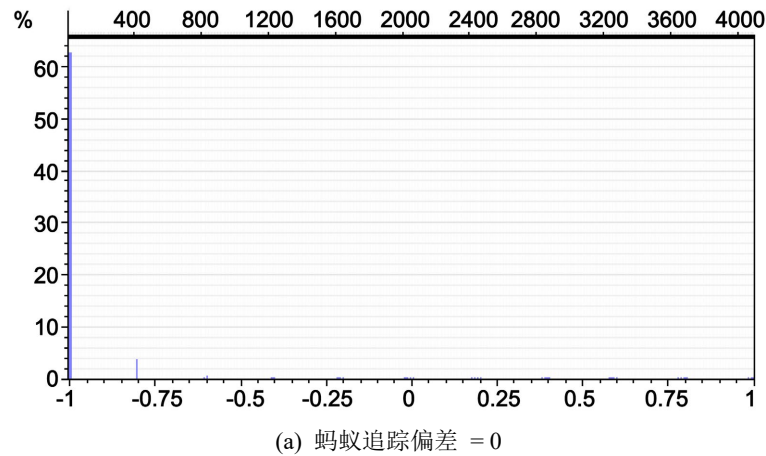


Figure 4. Diagram of correlation coefficients comparison of ant initial boundary
图 4. 蚂蚁初始边界振幅相关系数对比图

(2) 蚂蚁追踪偏差(样点数 0~3)

该参数控制了蚂蚁在追踪时偏离路径的最大角度，该参数值越大，对弯曲断裂的识别越有利。

试验组中分别取 0 和 3，结果表明蚂蚁追踪偏差值越大，振幅相关系数就越接近+1 值(图 5)，因而其追踪出来的蚂蚁体就越密集。



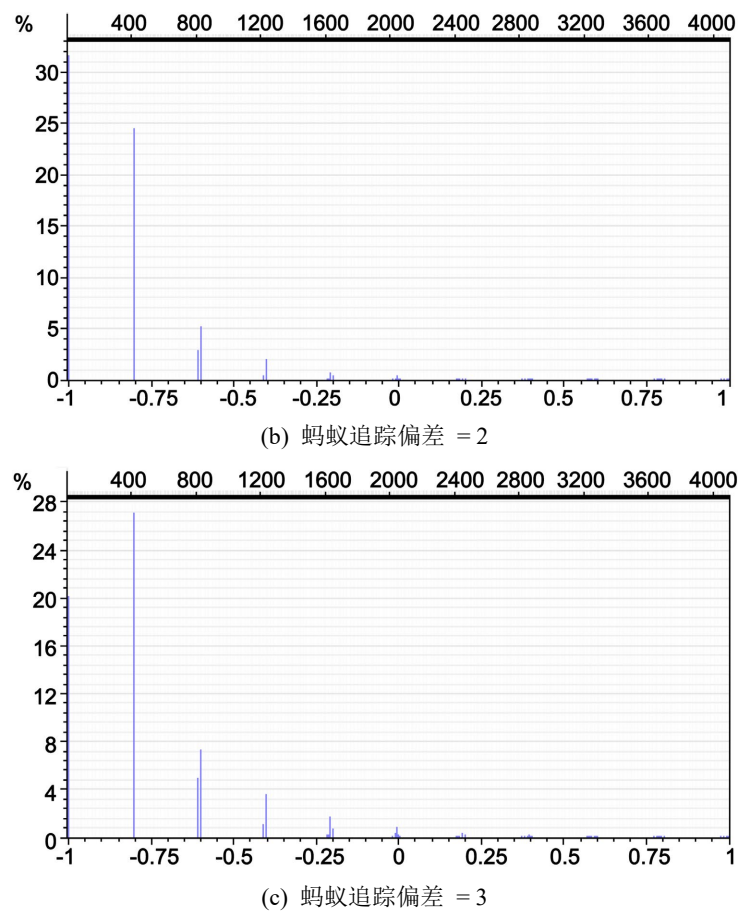
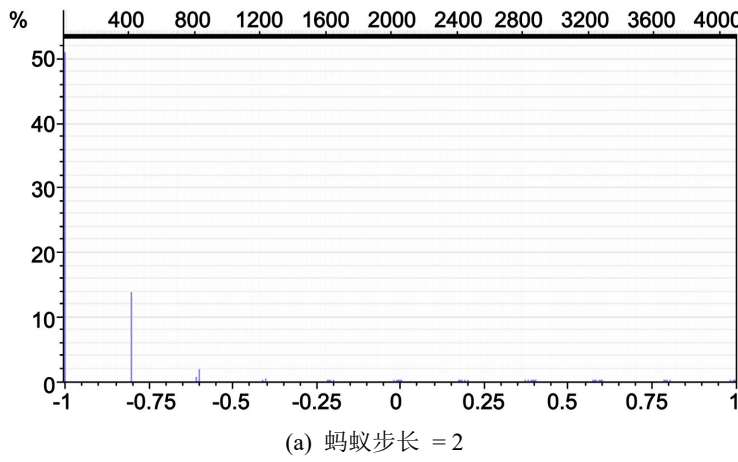


Figure 5. Diagram of correlation coefficients comparison of ant track deviation
图 5. 蚂蚁追踪偏差相关系数对比图

(3) 蚂蚁步长(样点数 2~10)

该参数用于设定蚂蚁算法在每一次迭代过程中搜索和前进的距离增量。步长值越大，代表单次搜索覆盖的范围越广，蚂蚁在三维地震数据体中的全局探索能力越强，能够更快速地追踪潜在的断裂路径，尤其对规模较大、连续性较好的断裂识别效果更为显著。然而，过大的步长也可能导致算法忽略局部细微断裂或小型离散裂缝，降低对复杂地质细节的分辨能力。



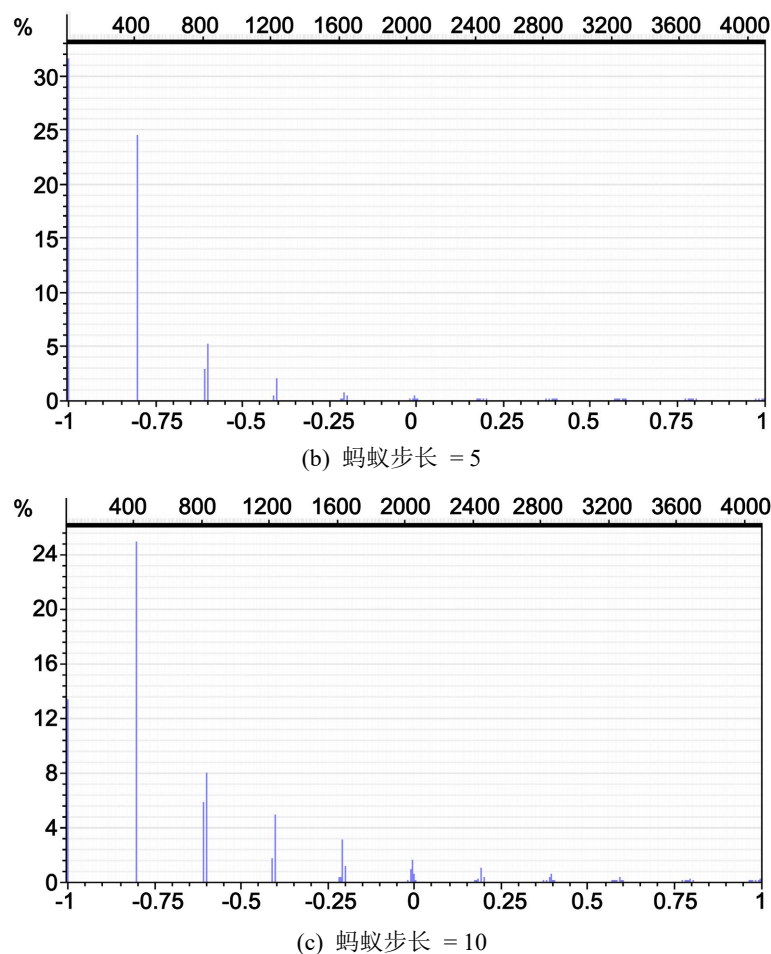


Figure 6. Diagram of correlation coefficients comparison of ant step size
图 6. 蚂蚁步长相关系数对比图

本次试验组分别对蚂蚁步长取值为 2 和 10 进行了对比分析。结果表明, 步长值增大时, 所得到的振幅相关系数更接近于+1 (图 6)。这说明算法在更大搜索范围内识别出较高的一致性信号, 将更多道间数据点关联为同一断裂结构, 因此最终生成的蚂蚁体结果更为密集、连续性好, 断裂网络的整体连通性表现也更突出。相反, 当步长设置为 2 时, 算法表现更为精细, 对小型断裂保留更多响应, 但整体追踪效率较低, 蚂蚁体结构可能相对稀疏。

(4) 非法步长(样点数 0~3)

该参数用于设定在合法步长范围之外, 蚂蚁算法仍被允许进行追踪的最大距离。其核心作用在于提供一定的容错能力, 当遇到由于噪声干扰、数据缺失或地层突变导致的局部不连续区域时, 若断裂延伸线索略微超出合法步长限定的范围, 系统仍可凭借非法步长继续维持追踪过程, 从而减少有效断裂结构的漏识。

试验组分别测试了非法步长取 0 和 3 两种情况。结果显示, 非法步长取值越大, 所得到的振幅相关系数越接近于+1 (图 7)。这表明算法在更远的距离上仍然识别出良好的波形相似性, 将更多道间信号关联为同一断裂结构, 因此最终生成的蚂蚁体断裂分布更为密集、连续性强, 断裂刻画细节也更丰富。相比之下, 非法步长为 0 时追踪结果较为保守, 仅在严格连续的路径上进行连接, 蚂蚁体结构可能更为断裂和稀疏。

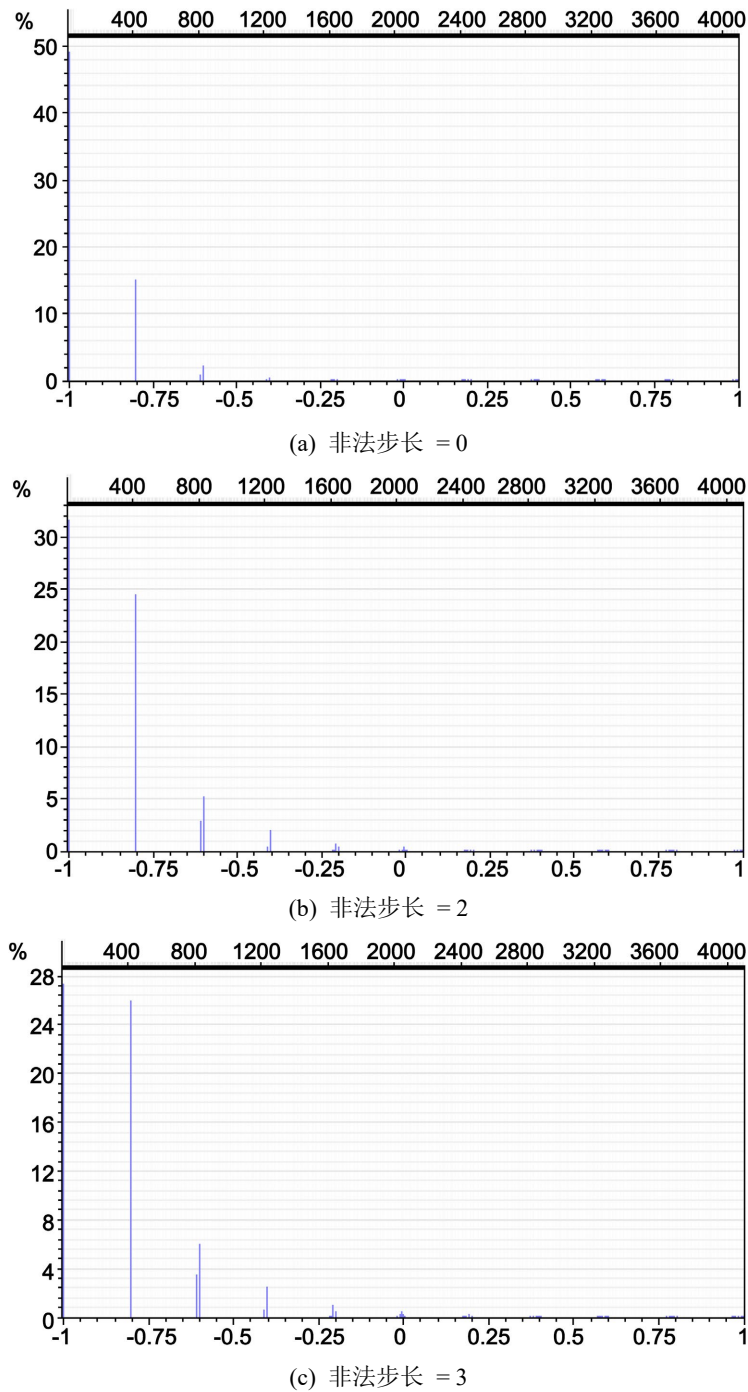


Figure 7. Diagram of correlation coefficients comparison of illegal steps allowed
图 7. 非法步长相关系数对比图

(5) 合法步长(样点数 0~3)

该参数用于控制在断裂追踪过程中是否允许连接因噪声或数据缺失造成的非法间隙，其与“允许非法步数量”参数协同作用，共同影响解释结果的连续性。合法步长决定了在判定两个地震道之间的连接关系时，可接受的最大无数据区间长度。增大合法步长可在一定程度上增强对断裂结构的连续解释能力，尤其适用于低信噪比或局部数据缺失的区域。

本次试验组分别对合法步长取值为 0 和 3 进行了对比分析。结果表明,随着合法步长的增加,所得到的振幅相关系数逐渐趋近于-1 (图 8)。这一现象说明系统在更大范围内接受了振幅相反或差异明显的信号之间的关联性,从而导致断裂识别结果更为宽松。因此,在合法步长设置为 3 时,所追踪出的蚂蚁体结构显得更为稀疏,连续性较弱,但覆盖的潜在断裂范围更广;相反,合法步长为 0 时生成的蚂蚁体则更密集、连续性更强,但对噪声和缺失数据的容忍度较低。

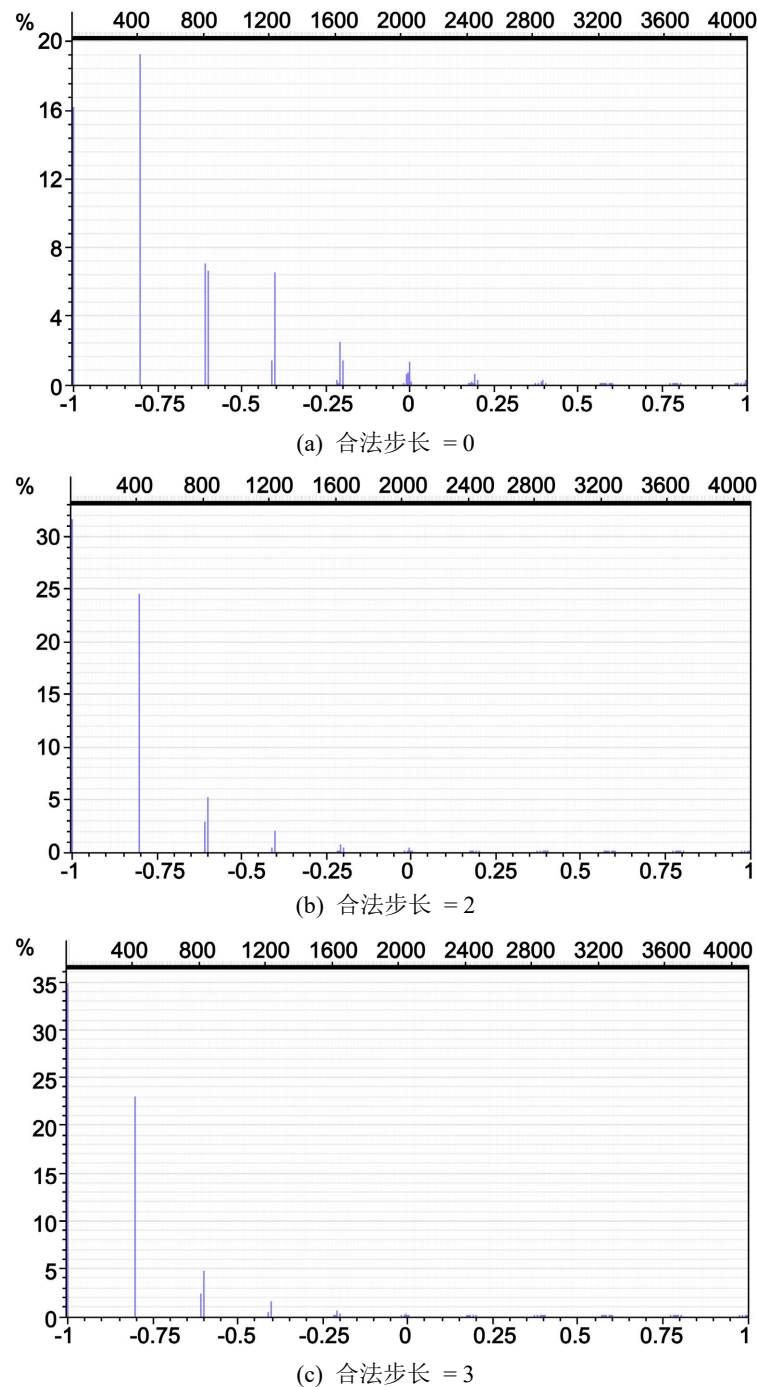


Figure 8. Diagram of correlation coefficients comparison of legal steps allowed
图 8. 合法步长相关系数对比图

(6) 终止条件(样点数 0%~50%)

该参数通过设定每只蚂蚁在追踪路径上所允许的非法步数占总步数的最大百分比，来控制蚂蚁个体的“生存”或“死亡”。当某只蚂蚁在追踪过程中累计的非法步数比例超过此阈值时，其追踪过程将被强制终止。该参数直接影响蚂蚁追踪路径的持续性和完整性：取值较低时，算法对数据噪声或局部不连续性更为敏感，易于提前终止追踪；取值较高时，蚂蚁容错能力增强，能够穿越信噪比较低或数据缺失区域，更完整地刻画潜在断裂结构。

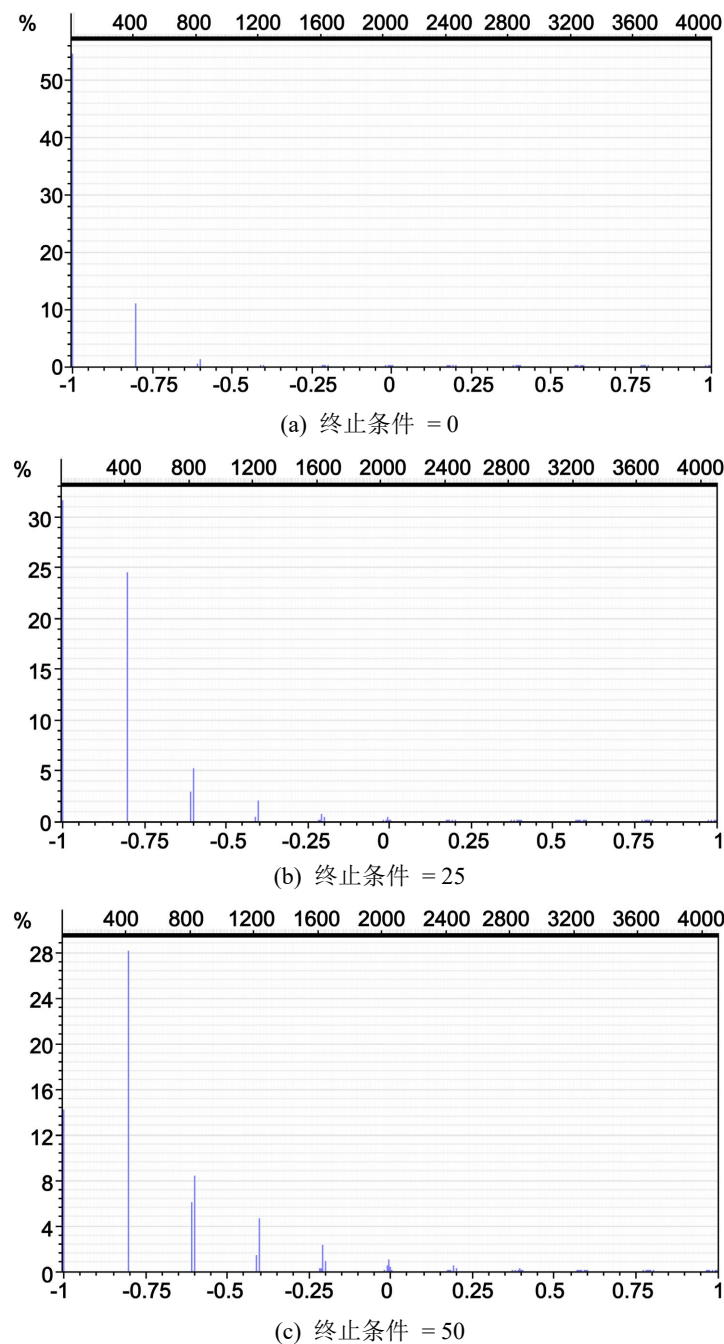


Figure 9. Diagram of correlation coefficients comparison of stop criteria
图 9. 终止条件相关系数对比图

试验组中分别取 0 和 50 进行对比。结果表明，终止条件取值越大，所获得的振幅相关系数越接近+1 (图 9)。这说明允许蚂蚁在遇到较多非法步时仍继续追踪，有助于保持路径的连贯性，增强对断裂整体结构的识别，从而最终生成的蚂蚁体结果更为密集、连续性好，断裂空间的填充也更充分。相反，终止条件为 0 时，路径极易中断，蚂蚁体表现更为稀疏，断裂结构连续性较差。

4. 蚂蚁追踪技术在足 201 井区页岩储层中的应用

对足 201 井区龙马溪组页岩储层的原始地震资料依次进行“去噪”处理，得到构造平滑属性体、方差属性体；在方差属性体基础上采用自定义追踪的方式，调整 6 个参数，获得不同参数下的蚂蚁体，最终通过考虑与已知断层的匹配度优选了参数组合(表 2)进行蚂蚁追踪，得到龙马溪组裂缝预测初始蚂蚁结果(图 10)。此时的蚂蚁追踪结果搜索到了全方位的裂缝，而实际工区的裂缝发育并非在全方位都发育，因此需要根据生成的地震属性以及初始蚂蚁结果，结合前人研究成果，统计出大断层走向、倾向和倾角等产状参数信息，得到裂缝发育空间展布形态，确定过滤原则[8]。同时考虑层位痕迹一般为低倾角响应，因此需滤去较小的倾角。

Table 2. Ant tracking final parameter selection

表 2. 蚂蚁追踪最终参数选择

初始蚂蚁边界	蚂蚁追踪背离	蚂蚁搜索步长	非法步长	合法步长	终止条件
2	3	3	2	2	10

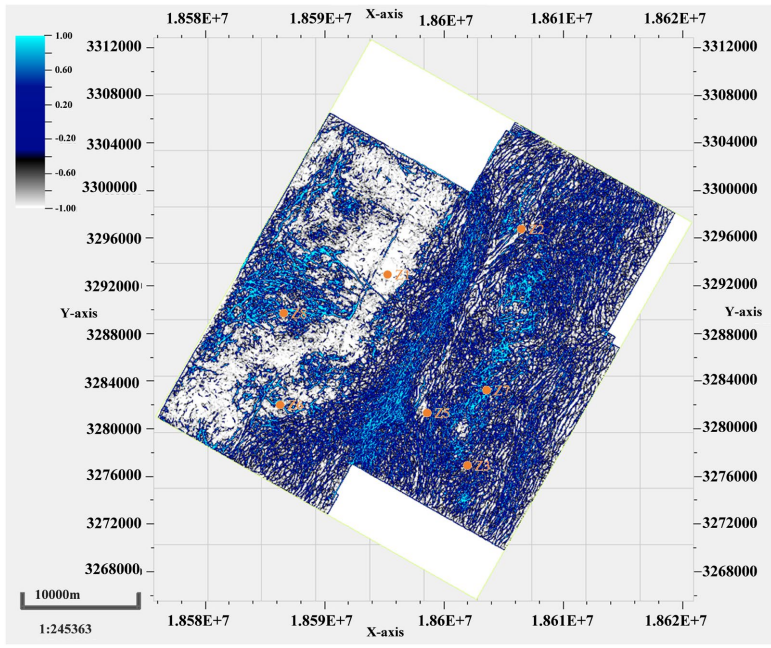


Figure 10. Initial ant results for fracture prediction in Longmaxi Group

图 10. 龙马溪组裂缝预测初始蚂蚁结果

根据前人研究表明，研究区经历了长期复杂的构造演化。根据生成的相干、方差、最大正曲率地震属性(图 11)以及初始蚂蚁结果，结合前人研究成果可得，研究区裂缝主要走向为 NW-SE 向，同时发育有 NE-SW 向裂缝，结合足 201 井区实际地质情况，设定参与计算的裂缝倾角为 45°~90°，倾角选定为 285°~45° 和 105°~225°，利用 Petrel 软件内的赤平投影图来控制蚂蚁追踪的搜索方向(图 12)，将要过滤掉的裂缝倾

角($0^{\circ}\sim45^{\circ}$)和($45^{\circ}\sim105^{\circ}$ 、 $225^{\circ}\sim285^{\circ}$)走向选为灰色,则该部分裂缝将不会被蚂蚁追踪结果记录到;反之,白色部分则为蚂蚁追踪结果所追踪和记录的,图 13 为最终的产状控制下的龙马溪组蚂蚁体属性沿层切片。

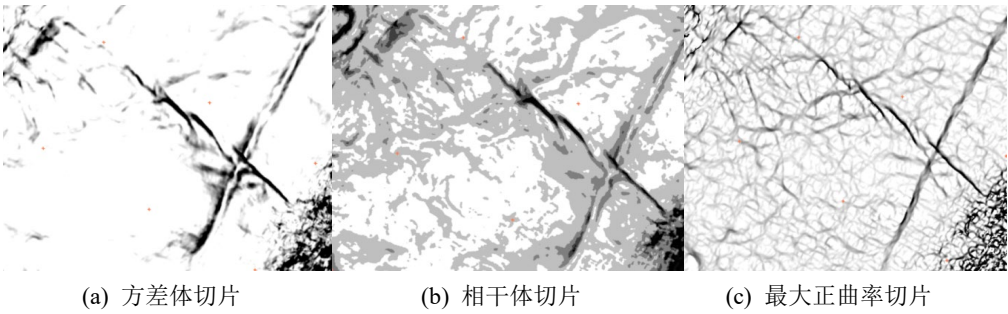


Figure 11. Seismic properties along the layer section near Z1 well in Longmaxi Group
图 11. 龙马溪组 Z1 井附近地震属性沿层切片

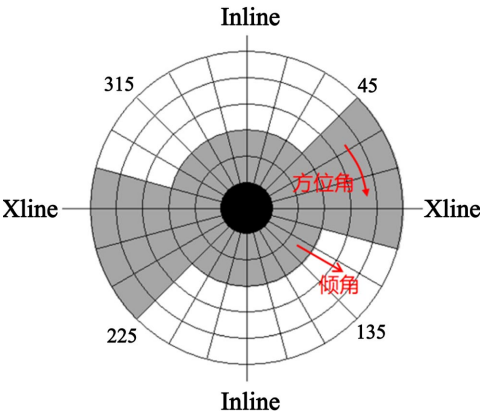


Figure 12. Parameters of inclination and azimuth
图 12. 倾角、方位角参数

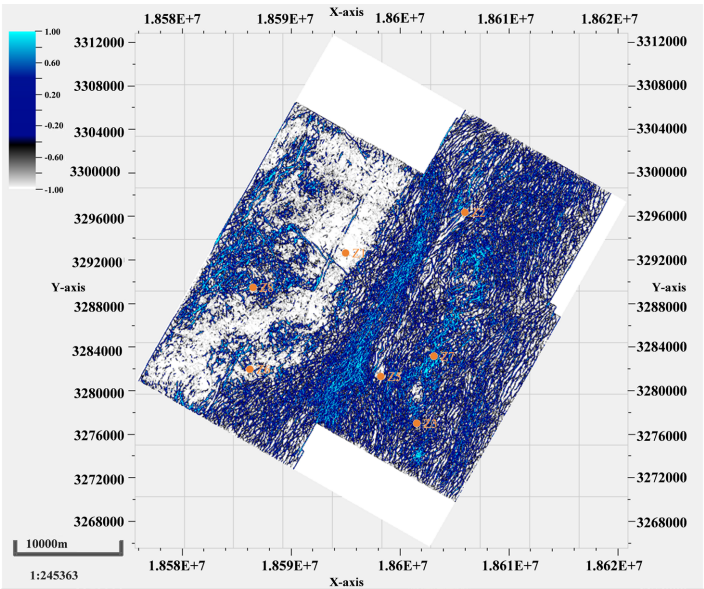


Figure 13. Ant attributes of the Longmaxi Formation under production control along with cross sections
图 13. 产状控制下的龙马溪组蚂蚁属性沿层切片

该属性面表明研究区内断裂主要集中发育在研究区的中部和东部，南部较北部裂缝发育程度明显偏高、东部较西部裂缝发育程度明显偏高，断裂方向为北东-南西向，在断裂发育的周围又普遍发育北西-南东向微裂缝。蚂蚁追踪属性体有助于对研究区内的地质构造特征进行研究。

通过利用后验井对裂缝发育方向进行验证分析，由 Z1 井的电成像测井结果可知，Z1 井的裂缝方向主要呈北西-南东向，少部分呈北东-南西向，与蚂蚁体追踪所确定的单井裂缝方向(图 14)高度一致。由此证实，蚂蚁追踪技术预测裂缝方法的可靠性和准确性。

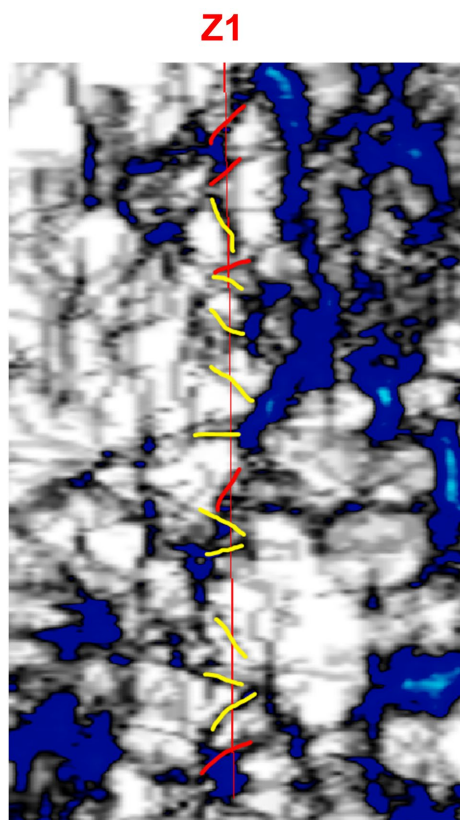


Figure 14. Cross section of Z1 well ant tracking properties
图 14. Z1 井蚂蚁追踪属性剖面图

5. 结论

(1) 蚂蚁追踪技术能够显著提升解释的精度与效率，尤其适用于构造复杂、裂缝发育的四川盆地页岩气储层。

(2) 运用参数对比试验分析方法对蚂蚁追踪过程中的 6 个参数进行研究，得到 6 个参数对结果的影响作用。其中初始蚂蚁边界、合法步长值越大，提取出来的蚂蚁追踪属性体就越稀疏；蚂蚁追踪偏差、蚂蚁步长、非法步长、终止条件越大，提取出来的蚂蚁追踪属性体就越密集。

(3) 结合实际工区地质特征与地震属性(如方差体、相干体、曲率属性)，通过产状过滤与方向约束，生成蚂蚁追踪结果，使其更符合实际裂缝发育规律。后续经电成像测井验证，蚂蚁追踪所预测的裂缝走向与实测结果高度一致，证明了该方法在裂缝预测中的可靠性与实用性。

(4) 本研究不仅为足 201 井区的裂缝建模提供了可靠的技术支撑，也为类似复杂构造区的蚂蚁追踪参数优化与裂缝解释提供了可借鉴的方法流程和经验参数范围。

基金项目

重庆科技大学科技创新基金项目“页岩储层多尺度天然裂缝分级评价及其对产能的控制作用——以渝西地区足 206-足 208 区块为例”(立项编号: YKJCX2420104)资助。

参考文献

- [1] 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.
- [2] 谢清惠, 蒋立伟, 赵春段, 等. 提高蚂蚁追踪裂缝预测精度的应用研究[J]. 物探与化探, 2021, 45(5): 1295-1302.
- [3] 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.
- [4] 陈渝川. 川南——川东龙马溪组页岩气优质储层主控因素分析[D]: [硕士学位论文]. 荆州: 长江大学, 2024.
- [5] 刘浩. 川东南华蓥山断裂带构造特征及地震危险性研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 中国地震局地震预测研究所, 2024.
- [6] 龙旭, 武林芳. 蚂蚁追踪属性体提取参数对比试验及其在塔河四区裂缝建模中的应用[J]. 石油天然气学报, 2011, 33(5): 76-81, 336.
- [7] 郭南舟, 汪江涛, 郑雪静, 等. 基于蚂蚁追踪技术的三维地震精细解释研究——以溧阳市土包山地面塌陷区为例[J]. 山西煤炭, 2024, 44(1): 103-109.
- [8] 丁圣, 刘金华, 尚娅敏, 等. Z4 变质岩潜山油藏裂缝特征及地震预测[J]. 新疆石油地质, 2024, 45(5): 516-521.