

文章编号: 1001-1749(2023)01-0053-08

# 蚂蚁曲率融合属性在华北潜山裂缝型储层中的应用

张超铭<sup>1,2</sup>, 文晓涛<sup>1,2</sup>, 兰昀霖<sup>1,2</sup>, 张晓琦<sup>1,2</sup>, 何易龙<sup>1,2</sup>

(1. 成都理工大学 油气藏地质及开发工程国家重点实验室, 成都 610059;

2. 成都理工大学 地球物理学院, 成都 610059)

**摘要:** 裂缝及断裂的分布影响着潜山的储层和成藏条件, 以华北潜山1区地震数据体为研究对象, 对构造平滑后的数据体分别进行常规曲率计算, 曲率坐标旋转和蚂蚁体属性的计算来预测裂缝和断裂的大概分布情况, 多种属性对比后发现这些单一属性虽然都能不同程度反映裂缝发育, 但都有各自的弊端。为了提高裂缝预测效果, 弥补单一属性的缺陷, 在优化后的曲率属性的基础上进行追踪步长缩小后的蚂蚁体计算, 形成新的融合属性体, 新方法提取的蚂蚁体属性反映出裂缝连续性更好, 分布规律更加清晰, 东南部大断裂较为突出, 与地质资料对比后结果可靠, 为后期工作提供借鉴。

**关键词:** 蚂蚁体属性; 优化曲率属性; 融合属性体; 裂缝预测; 潜山储层

**中图分类号:** P 631.4 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-1749.2023.01.07

## 0 引言

潜山地段受到多期构造活动的影响, 形成较多尺度不同, 类型不一的裂缝和断裂, 形成过程也复杂多样, 给勘探工作造成了极大的难度, 预测这些裂缝和断裂<sup>[1-3]</sup>的分布规律及大概走向对于后期工作极为关键。近年来, 多种属性反映裂缝带的方法应用于多个工区, 较常见的有几何曲率、蚂蚁体属性、方差相干体属性, 流度属性等<sup>[4-11]</sup>。徐森<sup>[12]</sup>用曲率的方法提取的蚂蚁体与试油资料匹配效果明显; 隆雨辰等<sup>[13]</sup>采用蚂蚁体与曲率融合属性应用于川西工区断裂分析, 可同时清晰识别规模大而连续的带状分布裂缝; 陈杰等<sup>[14]</sup>利用分频相干技术实现了页岩裂缝发育的精细描述与刻画。由于区域地质环境差异和地震数据体自身的特点, 常规曲率算法较适用于地层平缓地区, 但如果地层陡峭倾斜甚至于反转,

就会有算法高估曲率属性, 而这常常是因为传统算法对相关的方位角及倾角做出了不准确的估计, 进而影响了区域曲率精度。单一的曲率、蚂蚁体属性对同一数据体的裂缝反映在效果上存在差异。

笔者在坐标变换优化后的曲率属性体基础上提取了蚂蚁体属性, 在显示效果上有了明显改进。

## 1 基本原理

### 1.1 曲率坐标旋转与蚂蚁体提取

曲率属性应用于断裂、裂缝反映中已经较为常见<sup>[15-16]</sup>, 是一种较为成熟普遍的方法。但受到地形弯曲程度的影响, 常规曲率计算值难免误差较大, 分辨率较低, 容易造成不准确的地质解释, 为了降低这种影响, 本次在常规曲率方法基础上进行了坐标旋转变换处理(图1)。

笔者是在旋转后的新坐标系中进行曲率属性计

收稿日期: 2021-09-27

基金项目: 国家自然科学基金(41774142); 国家科技重大专项(2016ZX05002-004-013)

第一作者: 张超铭(1994—), 男, 硕士, 研究方向为裂缝储层预测, E-mail: 791705138@qq.com。

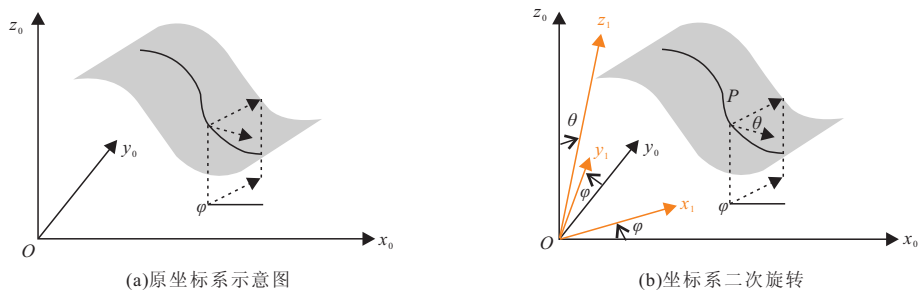


图 1 坐标转换示意图

Fig. 1 Schematic diagram of coordinate conversion

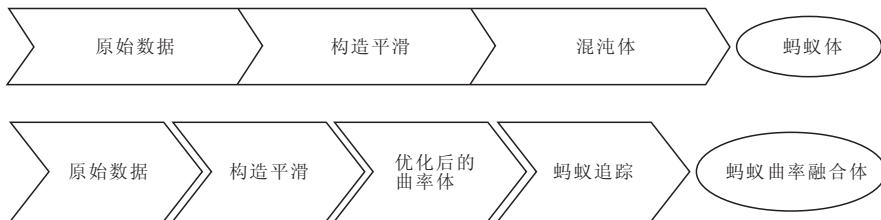


图 2 常规的蚂蚁体与优化后蚂蚁体流程图

Fig. 2 Flow chart of conventional ant body and optimized ant body

表 1 蚂蚁体属性个参数定义

Tab. 1 Parameter definitions of ant properties

参数	含义	特点	值
初始边界	定义搜索范围	在 5~7 范围时有利于小型裂缝识取	6
蚂蚁追踪偏差	设置蚂蚁追踪方向偏移范围	值的大小影响弯曲断层的分辨	2
搜索步长	追踪搜索步长	步长越大追踪能力强,但分辨较低	5
允许的无效步长	允许搜索超过定义步长的范围	值越大裂缝连续性越好	2
需要的有效步长数	蚂蚁继续追踪的有效步长	值越小连续性较差	2

算,  $x_0$ 、 $y_0$ 、 $z_0$  表示原坐标系中坐标参数,  $x_1$ 、 $y_1$ 、 $z_1$  表示旋转后的新坐标系参数,其中轴沿倾斜方位角方向,轴与过原点的表面垂直。具体操作步骤为:将轴作为旋转轴,方位角为旋转角度,对原始坐标系沿逆时针(右侧)进行旋转,得到新的系统。以  $y_1$  为旋转轴,在旋转角  $\theta$  基础上进行逆时针二次旋转后,得到新的坐标系(图 1(b))。

通过使用最小二乘法近似的获得二次曲面方程:

$$z(x, z) = ax^2 + by^2 + cxy + dx + ey + f \quad (1)$$

通过计算上述微分方程,趋势面系数计算如下:

$$a = \frac{1}{2} \frac{\partial^2 z_0}{\partial x_0^2}, b = \frac{1}{2} \frac{\partial^2 z_0}{\partial y_0^2}, c = \frac{\partial^2 z_0}{\partial x_0 \partial y_0},$$

$$d = \frac{\partial z_0}{\partial x_0}, e = \frac{\partial z_0}{\partial y_0} \quad (2)$$

所以倾角  $\theta$  和方位角  $\varphi$  分别表示为:

$$\theta = \tan^{-1}(\sqrt{d^2 + e^2}) \quad (3)$$

$$\varphi = \tan^{-1}\left(\frac{e}{d}\right) \quad (4)$$

完成三维旋转后,最后计算新曲面的二阶导数,带入曲率计算方程。本次提取了目的层的最大和最小两个曲率属性,最大正曲率、最小负曲率计算公式(5)。

$$k = \frac{1}{2} \left[ \left( \frac{\partial^2 z_1}{\partial x_1^2} + \frac{\partial^2 z_1}{\partial y_1^2} \right) - \sqrt{\left( \frac{\partial^2 z_1}{\partial x_1^2} - \frac{\partial^2 z_1}{\partial y_1^2} \right)^2 + 4 \left( \frac{\partial^2 z_1}{\partial x_1 \partial y_1} \right)^2} \right] \quad (5)$$

单独的曲率属性存在一定的局限性,为了更直观地反映工区裂缝和断裂,在优化后的曲率属性基础上提取蚂蚁体取得了不错的效果。蚂蚁算法在上世纪 90 年代末首次提出,近年来不断改进优化,蚂蚁追踪算法的结果可以直观显示裂缝,关键步骤有:数据体滤波处理、构造平滑、裂缝追踪提取等,结合

实际数据选取最佳参数进行计算分析。为了解决单独蚂蚁体算法和曲率算法的局限性,近几年一些学者开始尝试将曲率、蚂蚁属性的优势结合起来改进裂缝显示效果,但由于地质构造及其他因素影响,其应用效果仍有待提高<sup>[17-22]</sup>。

经过数次实验结果对比,在传统的蚂蚁体计算步骤中,在对数据体进行构造平滑之后直接运行方差或者混沌体计算,而笔者把方差体属性或者混沌体属性替换为处理后的最大曲率属性,将蚂蚁体和优化后的曲率两者融合到一起进行分步计算,得到蚂蚁曲率融合体,使得观测结果更加清晰,优化了裂缝显示连续性较差的问题。

## 1.2 具体应用流程

选取裂缝较发育区块进行地震数据采集,对实际的目的工区进行计算测试,主要步骤如图 2 所示。

1) 工区数据预处理。由于噪声对地震数据体的影响,在 petrel 软件中先对数据体进行构造平滑处理,利用中值滤波算法,有效地降低噪声干扰,增强了地震反射轴的连续性。将 inline 和 X-line 的比例参数均调为 1.5,其他参数设为“0”。

2) 最大曲率计算。更好地突出该地区的地质凹凸性和地震信息的不连续性,将垂直半径参数为 20,inline 和 X-line 比例参数调为“1”,方位角度设为 30,在构造平滑后的数据体上生成曲率数据体。

3) 蚂蚁体属性参数设置。经过实验参数对比最终确定了该工区最佳参数(表 1),初始蚂蚁分布边界为 6,蚂蚁追踪背离为 2,蚂蚁追踪步长为 5,非法步长为 2,合法步长为 2,在最大曲率数据体的基础上进行计算,运行后得到新的数据体。

## 2 实际应用

### 2.1 区块概况

华北潜山 1 区地理位置位于河北蓟州区东大屯村东印家庄西北约 500 m(图 3)。构造位置为方山拗陷印家凸起西段潜山构造带东部华北 125 潜山北部较低部位。根据实钻资料、地球物理测井资料结合邻井及区域资料综合对比分析认为,本工区主要地层为新生界第四系平原组,新近系明化镇组、馆陶组及下古生界奥陶系地层。草房—广饶潜山受到多期构造活动的作用,这些断裂影响了潜山储层裂缝的发育和成藏。从东营凹陷东部叠前时间偏移三维测线地震剖面及邻井实钻资料看,该地区岩性主要分布有泥岩、砂岩、灰岩。工区区内构造较为发育,



图 3 实际工区背景图

Fig. 3 Background map of actual work area

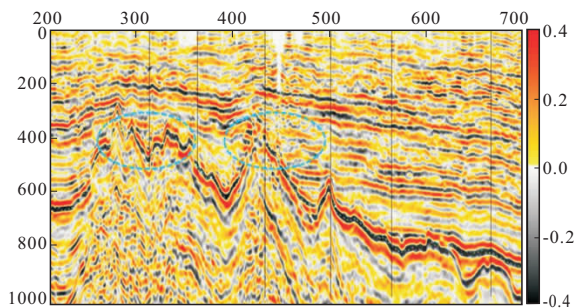


图 4 原始数据目的层连井剖面

Fig. 4 Profile of original data connecting well

主要为气孔构造和杏仁构造。本区下第三系地层向南超覆尖灭,上第三系地层直接覆盖在下古生界地层之上,形成地层圈闭。

### 2.2 实际应用分析

本次对华北潜山 1 区分步进行地震数据采集,主要对奥陶系地层段进行裂缝整体分析,最后结合钻井资料加以验证。根据早期钻井资料已知该地区裂缝类型主要为缝洞型裂缝,大部分裂缝、缝洞可能分布在工区东南方向,裂缝宽度长度大小不一。工区 128 井是一口评价井,设计井深为 627.00 m,钻探目的:向北扩大 125 井区古生界含油气范围,完钻井深为 642.40 m,完钻层位奥陶系,在井段 574 m~642 m 处未被充填,岩心破碎严重,纵横裂缝较发育。先使用常规曲率属性计算对目标数据体进行计算试验(图 5)。工区剖面图如图 4 所示,纵向时间范围为 500 ms~1 000 ms,目的层范围在 550 ms~950 ms 之间,在 128 井和 115 附近裂缝、断裂较为明显。受早期地下板块活动的影响,在 100 井和 128 井之间井明显反映出地层受到地质构造应力作用而产生的形变与断裂带。将上述方法应用于此,为后期油气资源开发提供参考依据。

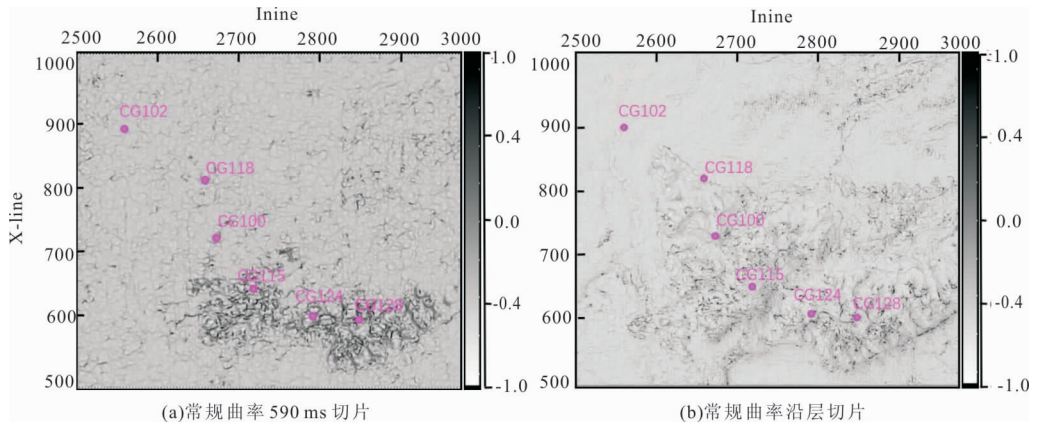


图 5 常规曲率切片  
Fig. 5 Normal curvature slice

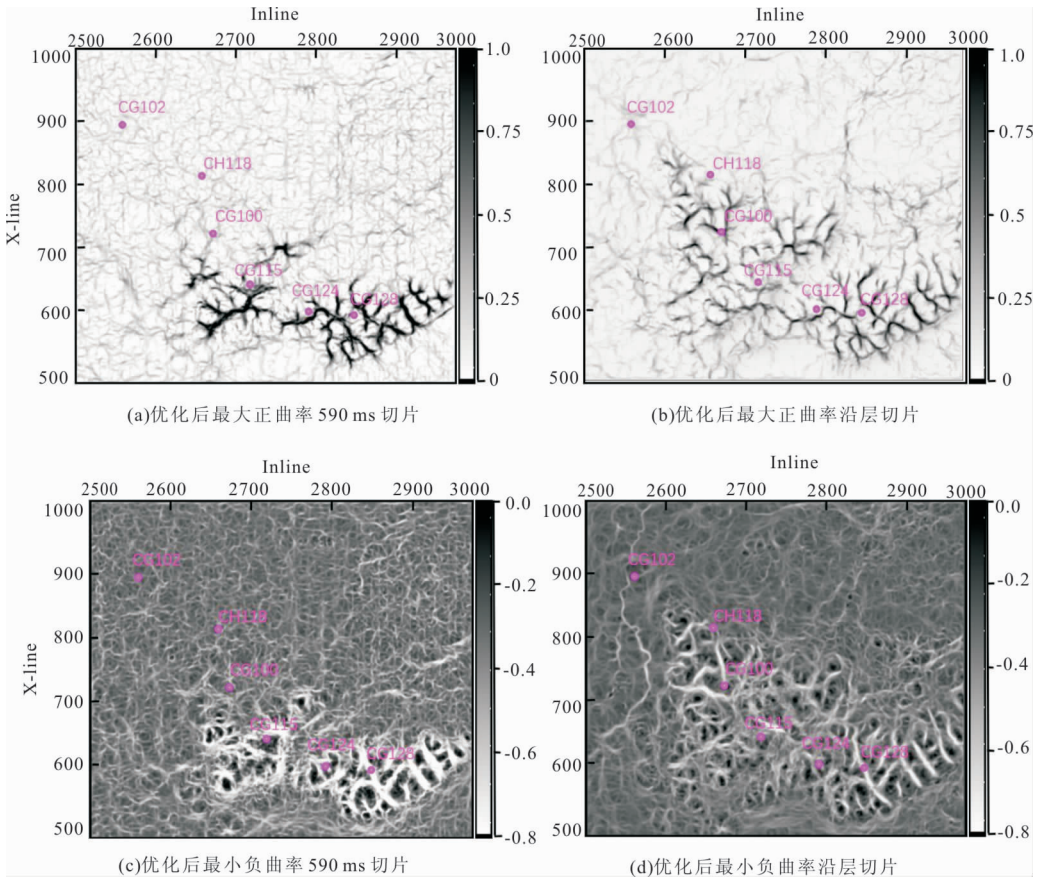


图 6 坐标旋转后最大(正)、最小(负)曲率切片图  
Fig. 6 Maximum (positive) and minimum (negative) curvature slices after coordinate rotation

### 2.3 效果分析

以 590 ms 曲率时间切片为例,将常规方法计算的曲率属性和坐标旋转优化后的曲率对比分析(图 6)。将倾角参数设置为  $30^\circ$ ,图 6(a)、图 6(b)中黑色较深部分为裂缝发育或断裂带,整个裂缝及断裂带由北向南,由西向东发育。在 128 井和 115 井附近

伴生多条北东向小断裂,东南区块内,主断裂带发育明显,主断裂带北部区域存在多数不太明显的细小裂缝。常规曲率方法效果并不理想,裂缝反映分辨率较低,连续性较差。经过优化后裂缝发育显示结果有了明显地改善,从时间切片上看出,最大正曲率的实际显示效果图 7(c)、图 7(d)要好于最小负曲率

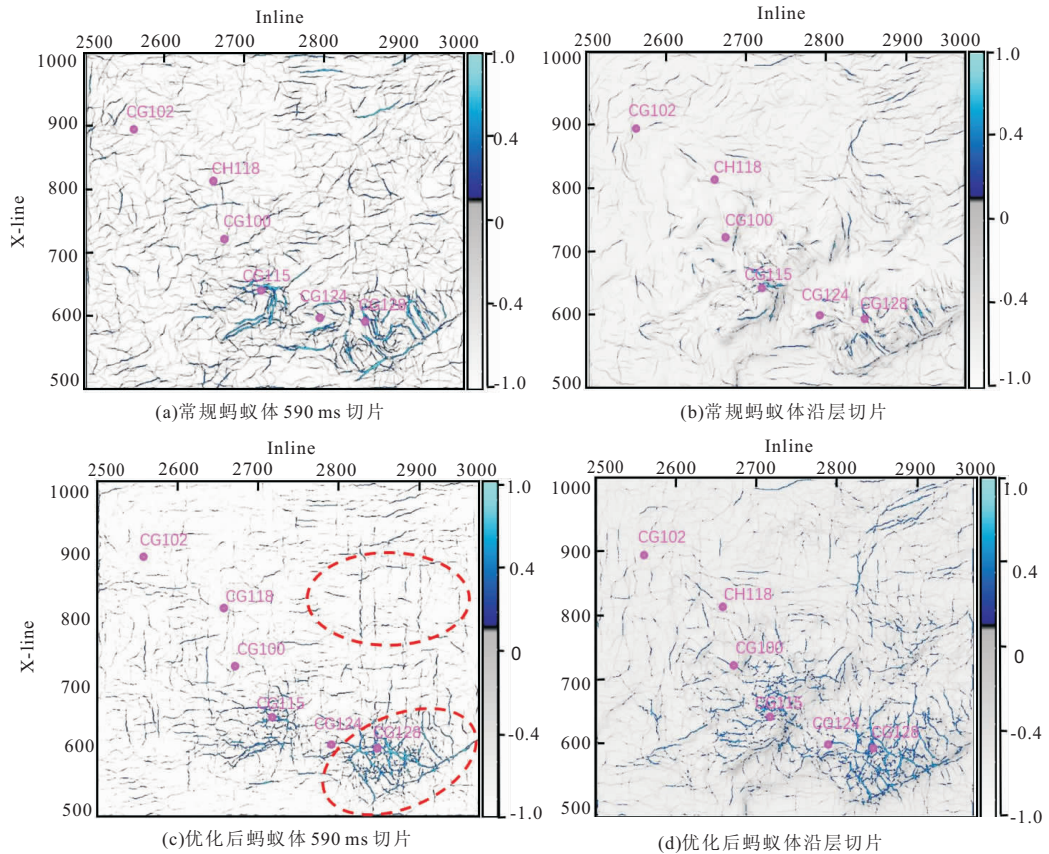


图 7 常规蚂蚁体切片和最大正曲率与蚂蚁体融合切片

Fig. 7 Conventional ant body slices and maximum positive curvature and ant body fusion slices

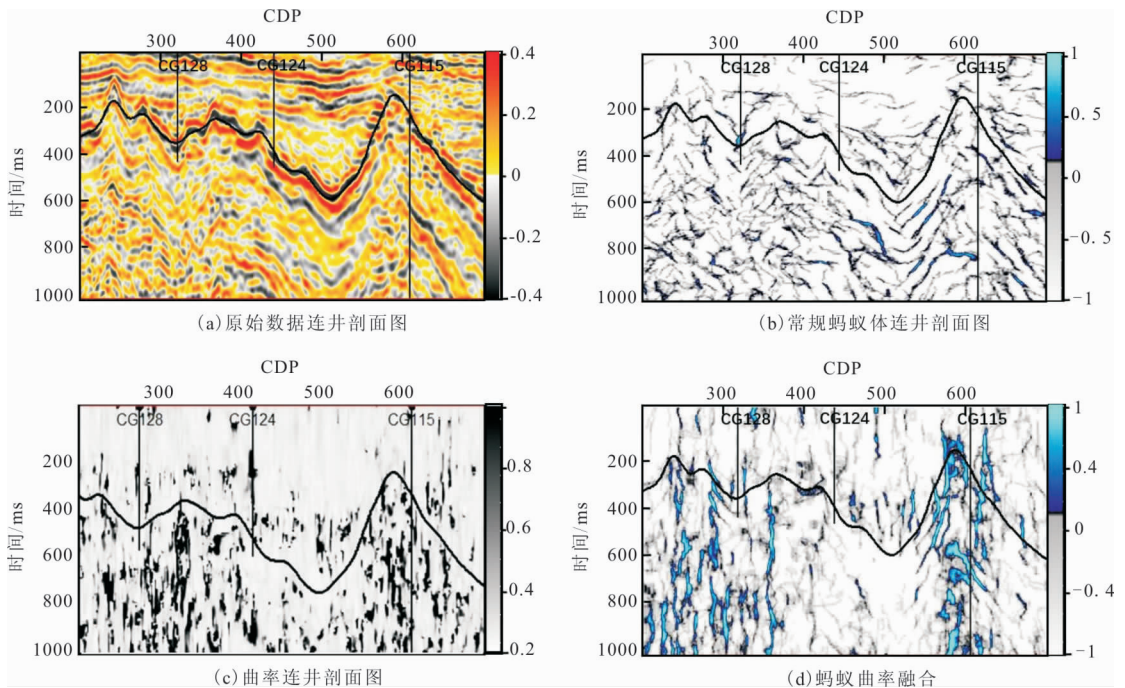


图 8 井 128—124—115 个属性连井剖面图

Fig. 8 Sections of wells 128—124—115 with linked wells

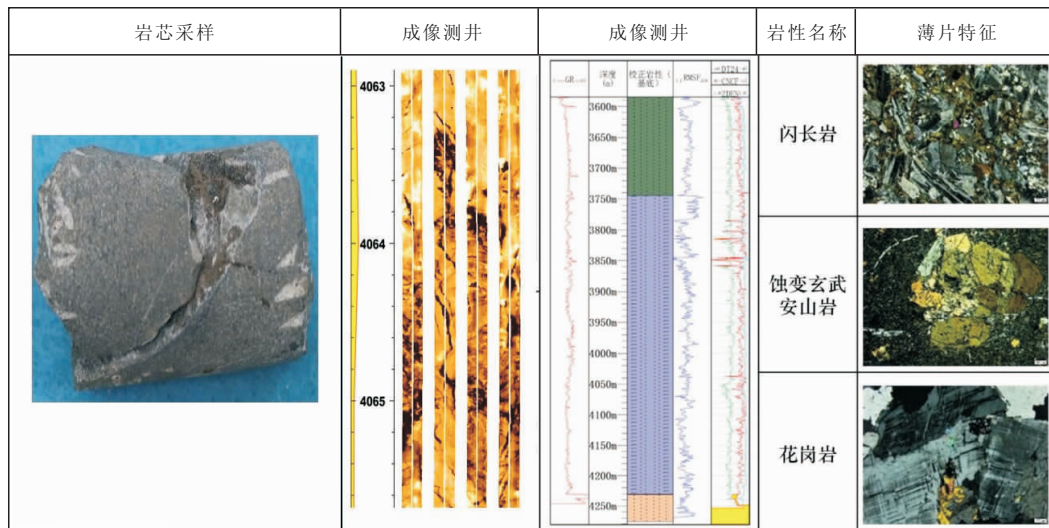


图9 潜山128井岩芯及测井资料图

Fig. 9 Core and logging data of well 128 in buried hill

图7(e)、图7(f),但曲率属性会放大区域裂缝信息,单独的曲率属性不足以去验证。

结合传统方法对比后的效果图,经过分析发现,传统的属性方法虽然都能不同程度反映裂缝发育和大概位置分布,但是曲率效果图都存在模糊性,而常规蚂蚁体连续性较差。为了弥补传统属性方法预测的弊端,在原来方法效果的基础上做进一步改进,将坐标旋转后的曲率与常规蚂蚁体结合,得到(图7)最大正曲率和蚂蚁体的融合图。

数据体经构造平滑后直接进行最大正曲率的计算,将角度参数设置为 $30^\circ$ ,曲率体计算完成后,蚂蚁体追踪步长由5设置为4,提高在追踪过程中的精细程度。从改进后的图和蚂蚁体连井剖面(图8)中可以看出,东南区块内主要断裂更加直观清晰,在128井、115井处及其周围裂缝发育明显,已有岩芯及测井资料表明,该潜山储层岩性以闪长岩和蚀变玄武安山岩为主,碎裂花岗岩构成了储层的基底。由于裂缝的发育,被泥浆、晶体以及其他矿物填充(图9),与剖面切片显示结果基本对应。对于常规方法而言,裂缝的连续性有了很好地改进,南部北东向断裂向东延伸较长,在整体分布特征上把早期北部小型裂缝到后期南部裂缝的演化清楚展现了出来,南部区块后期受构造活动更强,周期长,裂缝发育方向更加复杂。

### 3 结论

1)结合蚂蚁追踪技术在裂缝识别中的优势和曲

率的连续性好的特点,作为一种较新的方法应用于实际工区,在潜山1区取得了较好的显示效果,直观展现了目的区域主要裂缝,裂缝带响应增强,也同时克服了单一属性的缺陷。

2)在传统的裂缝预测诸多方法中,对比常规的曲率属性,优化后的曲率属性和蚂蚁体融合,找到了对于华北1区潜山地区效果最好的方法,最终效果与相应地质资料一致,为后期的工作提供了可靠的依据。

### 参考文献:

- [1] 崔立杰,何幼斌,王锦喜,等.基于层面的地震曲率属性在碳酸盐岩断裂预测中的应用——以塔里木盆地塔北某区块为例[J].岩性油气藏,2012,24(1):92-96.  
CUI L J, HE Y B, WANG J X, et al. Application of plane based seismic curvature attribute in carbonate fault prediction: a case study of a block in Tabei, Tarim basin [J]. Lithologic Reservoir, 2012, 24 (1): 92-96. (In Chinese)
- [2] 陈志刚,马文杰,赵宏忠.利用曲率类属性预测储层裂缝的流程及应用实例[J].物探与化探,2020,44(5):1201-1207.  
CHEN Z G, MA W J, ZHAO H Z. Process and application of curvature attributes in predicting reservoir fractures [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2020, 44 (5): 1201-120. (In Chinese)
- [3] 马晓宇,王军,李勇根.基于蚂蚁追踪的叠前裂缝预测技术[J].石油地球物理勘探,2014,49(6):1199-1203.  
MA X Y, WANG J, LI Y G. Prestack fracture pre-

- diction technology based on ant tracking [J]. *Petroleum Geophysical Exploration*, 2014, 49 (6): 1199—1203. (In Chinese)
- [4] 陈芊澍,文晓涛,何健. 基于极限学习机的裂缝带预测[J]. *石油物探*, 2021, 60(1): 149—156.  
CHEN Q S, WEN X T, HE J. Fracture zone prediction based on extreme learning machine [J]. *Petroleum Geophysical Prospecting*, 2021, 60 (1): 149—156. (In Chinese)
- [5] 王雷,陈海清,陈国文. 应用曲率属性预测裂缝发育带及其产状[J]. *石油地球物理勘探*, 2010, 45(6): 885—889.  
WANG L, CHEN H Q, CHEN G W. Prediction of fracture development zone and its occurrence by curvature attribute [J]. *Petroleum Geophysical Exploration*, 2010, 45 (6): 885—889. (In Chinese)
- [6] DI H, GAO D. [Society of exploration geophysicists SEG technical program expanded abstracts 2014—denver, colorado (26 October to 31 October)] SEG Technical Program Expanded Abstracts 2014—A new analytical method for azimuthal curvature analysis from 3D seismic data[J]. 2014, 8(5): 1634—1638.
- [7] 杨威. 曲率属性分析及其应用[D]. 成都: 成都理工大学, 2011.  
YANG W. Curvature attribute analysis and its application [D]. Chengdu: Chengdu University of technology, 2011. (In Chinese)
- [8] 张继标,戴俊生,冯建伟,等. 蚂蚁追踪技术在大程庄地区断裂自动解释中的应用[J]. *石油天然气学报*, 2012, 34 (5): 53—57.  
ZHANG, DAI J S, FENG J W, et al. Application of ant tracking technique in fault automatic interpretation in Dachengzhuang area [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2012, 34 (5): 53—57. (In Chinese)
- [9] 张欣. 蚂蚁追踪在断层自动解释中的应用[J]. *石油地球物理勘探*, 2010, 45(2): 279—281.  
ZHANG X. Application of ant tracking in fault automatic interpretation [J]. *Petroleum Geophysical Exploration*, 2010, 45 (2): 279—281. (In Chinese)
- [10] 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.  
LONG X, WU L. Comparative experiment of extracting parameters from ant tracking attribute volume and its application in fracture modeling of Tahe Area 4 [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2011, 33 (5): 76—81. (In Chinese)
- [11] 陈波,孙德胜,朱筱敏,等. 利用地震数据分频相干技术检测火山岩裂缝[J]. *石油地球物理勘探*, 2011, 46(4): 610—613.  
CHEN B, SUN D S, ZHU X M, et al. Detection of volcanic fractures using frequency division coherence technique of seismic data [J]. *Petroleum Geophysical Exploration*, 2011, 46 (4): 61. (In Chinese)
- [12] 徐森. 基于蚂蚁体追踪的裂缝预测技术在静北地区的应用[J]. *内蒙古石油化工*, 2015(S1): 106—108.  
XU M. Application of crack prediction technology based on ant tracking in Jingbei region [J]. *Inner Mongolia Petrochemical Industry*, 2015 (S1): 106—108. (In Chinese)
- [13] 隆雨辰,李俊,王志章,等. 综合蚂蚁体及曲率属性的断裂识别方法及应用[J]. *油气藏评价与开发*, 2017, 7 (4): 6—9.  
LONG Y C, LI J, WANG Z Z, et al. Fault identification method based on ant body and curvature property and its application [J]. *Reservoir Evaluation and Development*, 2017, 7 (4): 6—9. (In Chinese)
- [14] 陈杰,李琼,范欣然,等. 利用分频相干技术检测页岩裂缝发育带[J]. *成都理工大学学报(自然科学版)*, 2017, 44(3): 356—361.  
CHEN J, LI Q, FAN X R, et al. Detection of shale fracture development zone by frequency division coherence technique [J]. *Journal of Chengdu University of Technology (Natural Science Edition)*, 2017, 44 (3): 356—361. (In Chinese)
- [15] 李志勇,曾佐勋,罗文强. 裂缝预测主曲率法的新探索[J]. *石油勘探与开发* 2003, 30(6): 83—85.  
LI Z Y, ZENG Z X, LUO W Q. Exploration of principal curvature method for fracture prediction [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2003, 30 (6): 83—85. (In Chinese)
- [16] 刘松鸣. 曲率方位加强技术在识别低序级断层中的应用[J]. *断块油气田*, 2019, 26(1): 37—41.  
LIU S M. Research and Application of Azimuth—enhanced curvature analysis technology [J]. *Fault—Block Oil and Gas Field*, 2019, 26(1): 37—41. (In Chinese)
- [17] 梁宇涛,刘鹏程,冯高城. 基于蚂蚁追踪技术的裂缝型储层建模方法[J]. *复杂油气藏*, 2014, 7(3): 11—15.  
LIANG Y T, LIU P C, FENG G C. Modeling method of fractured reservoir based on ant tracking technology [J]. *Complex Reservoir*, 2014, 7 (3): 11—15. (In Chinese)
- [18] 孙乐,王志章,李汉林,等. 基于蚂蚁算法的断裂追踪技术在乌夏地区的应用[J]. *断块油气田*, 2014, 21(6): 716—721.  
SUN L, WANG Z Z, LI H L, et al. Application of

- fault tracking technology based on ant algorithm in Wuxia area [J]. *Fault Block Oil and Gas Fields*, 2014, 21 (6): 716—721. (In Chinese)
- [19] ZHOU G, LEI W B, ZHANG J H. Application of fault detection using ant-tracking algorithm: Daqing oilfield example[J]. *Advanced Materials Research*, 2012, 459: 406—410.
- [20] 刘雷颂, 高军, 代双河. 蚂蚁追踪裂缝预测技术在中AD油田开发中的应用[J]. *石油天然气学报*, 2013, 35 (8): 57—61.
- LIU L S, GAO J, DAI S H. Application of ant tracking fracture prediction technology in the development of zhongad oilfield [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2013, 35 (8): 57—61. (In Chinese)
- [21] 金维浚, 马珊珊, 张丽莉, 等. 基于地震数据构造曲率属性预测裂缝[J]. *地质科学*, 2019, 54(2): 345—355.
- JIN W J, MA S S, ZHANG L L, et al. Prediction of fractures based on structural curvature attribute of seismic data [J]. *Geological Sciences*, 2019, 54 (2): 345—355. (In Chinese)
- [22] 樊振光. 基于曲率属性的沙一段储层裂缝预测的研究[D]. 华北水利水电大学, 2020.
- FAN Z G. Research on fracture prediction of SHA1 reservoir based on curvature attribute [D]. North China University of Water Resources and Hydropower, 2020. (In Chinese)

### Application of improved ant body attribute extraction method in fracture prediction of buried hill reservoir

ZHANG Chaoming<sup>1,2</sup>, WEN Xiaotao<sup>1,2</sup>, LAN Yunlin<sup>1,2</sup>, ZHANG Xiaoqi<sup>1,2</sup>, HE Yilong<sup>1,2</sup>

(1. College of Geophysics, Chengdu University of technology, Chengdu 610059, China;

2. State Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation, Chengdu University of technology, Chengdu 610059, China)

**Abstract:** The distribution of fractures and faults affects the reservoir and accumulation of buried hills. Taking the seismic data volume of east China buried hill area 1 as the research object, the curvature, coherence, and ant body attributes of the data volume after structural smoothing are calculated respectively to predict the general distribution of fractures and faults. After comparing multiple attributes, it is found that although these single attributes can reflect fracture development in different degrees, they all have their characteristics. The disadvantages of self-reliance. In order to improve the effect of fracture prediction and make up for the defect of a single attribute, the ant body calculation after the tracking step is reduced based on the curvature attribute to form a new fusion attribute body. The optimized ant body attribute reflects that the fracture continuity is better, the distribution law is more precise, the southeast significant fault is more prominent, and the result is reliable compared with the geological data, which provides a reference for the later work theoretical basis.

**Keywords:** ant body; optimize curvature properties; fusion attribute body; crack prediction; buried hill reservoir