

文章编号:1000-582X(2012)09-131-08

利用蚁群算法识别及预测碳酸盐岩裂缝的方法探讨

吴 斌^{1a,1b}, 唐 洪^{1a}, 王素荣², 王兴志^{1a,1b}, 徐立明³, 徐正华³

(1. 西南石油大学 a. 油气藏地质及开发工程国家重点实验室;
b. 天然气地质四川省高校重点实验室, 成都 610500;

2. 中国石油长庆油田分公司勘探开发研究院, 西安 710018; 3. 中石油煤层气有限公司, 北京 100028)

摘 要:针对东部某碳酸盐岩油藏裂缝发育,在开发后期油藏内部裂缝系统油水分布复杂,储层有利发育区的确定存在多解性的情况,采用蚁群算法对该区裂缝进行识别和预测。笔者参照岩心和成像测井资料对蚂蚁参数值调优,系统描述了研究区裂缝的空间展布特征,即裂缝体系呈网状结构,NW 向、NNE 向及近 EW 向的三组裂缝簇占绝对优势。再利用钻井漏失量、生产资料及成像测井对裂缝预测结果进行可靠性分析,表明利用蚁群算法识别及预测裂缝的方法切实可行,能为分析剩余油分布规律提供技术支持。蚁群算法作为一种新兴的仿生学算法,在利用地震资料定量预测裂缝方面有较大的发展潜力。

关键词:蚁群算法;碳酸盐岩;裂缝识别;可靠性分析

中图分类号:TE19

文献标志码:A

Recognition and prediction of fracture by using ant colony algorithm analysis in carbonate reservoir

WU Bin^{1a,1b}, TANG Hong^{1a}, WANG Surong², WANG Xingzhi^{1a,1b}, XU Liming³, XU Zhenghua³

(1a. State Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation;

1b. Sichuan Province University Key Laboratory of Natural Gas Geology, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China; 2. Exploration and Development

Research Institution of PetroChina Changqin Oilfield Company, Xi'an 710018, China;

3. PetroChina Coalbed Methane Company Limited, Beijing 100028, China))

Abstract: A fracture-developed carbonate oil field in the east has a complicate oil and gas distribution in facture network at late development stage, which leads to multiplicity of favorable reservoir estimation. In view of problems above, ant colony algorithm is adapted to recognition and predict facture in this field. The ant parameters are optimized on the basis of core and image log data, and the spatial distribution feature of fracture is described, as a reticulate structure with three dominant clusters of fracture (NW, NNE & NE). Drilling leakage, production data and image log are then used for reliability analysis of fracture predict, which presents that ant colony algorithm is a practicable methodology to recognition fracture and provides a support for remaining oil distribution analysis. As a booming bionic algorithm, ant colony algorithm has great potential for quantitative fracture predict with seismic materials.

Key words: ant colony algorithm; carbonate rock; fracture recognition; reliability analysis

收稿日期:2012-04-02

基金项目:教育部新世纪优秀人才支持计划(NCET-04-0911);四川省重点学科建设项目(SZD0414)

作者简介:吴斌(1980-),男,西南石油大学博士研究生,从事页岩气勘探和沉积储层地质学的学习和研究。

王兴志(联系人),男,西南石油大学教授,博士生导师,(E-mail)wxzswpi@163.com。

碳酸盐岩只占沉积岩的两成,却含五成以上的油气探明储量。裂缝是碳酸盐岩地层的重要组成部分,裂缝的存在提高了碳酸盐岩储层的性能,对它的正确描述有助于认识储集岩中的油气分布特征,因此识别、预测、并定量表征储层裂缝是有效开发该类油气藏的核心问题之一^[1-5]。随着裂缝型油气藏勘探的深入,以及三维地震勘探作为油气勘探的主力工具已日趋成熟,地震数据精度和分辨率的不断提高与三维可视化计算机技术的发展并驾齐驱^[6],要求地震解释人员能充分挖掘地震信息,利用三维地震资料精细识别、雕刻、并定量预测裂缝^[7-9]。目前,高分辨率相干体分析技术、地震属性体提取技术、多属性融合神经网络预测以及三维多分量地震技术等多种方法用于裂缝预测^[10-12],给裂缝油气藏的研究注入了新的活力。而利用数字图像处理技术识别裂缝,如 IPA 地震像素处理技术、蚁群算法以及图像边缘检测技术等也得到了极大的发展^[13-15]。蚁群算法已成功用于多个研究领域^[16-19],地震解释人员利用蚁群算法具离散性、并行性、鲁棒性和模糊聚类等优点,且能自动追踪断裂系统的特点,将其用于断层解释^[20-21]。笔者在三维地震数据体获取的基础上,尝试采用蚁群算法对碳酸盐岩裂缝系统进行识别及预测。

1 蚁群算法基本原理

蚁群算法是由意大利学者 M. Dorigo 于 1992 年提出^[22],其灵感来源于蚂蚁在寻找食物过程中发现路径的行为。蚁群算法是模拟自然界中真实蚁群的觅食行为而形成的一种新型的仿生类优化算法,通过设置人工智能蚂蚁来达到传递并优选信息的目的。其基本原理是一种正反馈机制,即蚂蚁总是偏向于选择信息素浓的路径,它通过信息量的不断更新达到最终收敛于最优路径上。作为一种新型的模拟进化算法,蚁群算法在数据挖掘中的应用正逐步引起关注。图 1 充分解释了蚁群发现最短路径的原理和机制,随着时间的推移,路径 BCD 积累的信息

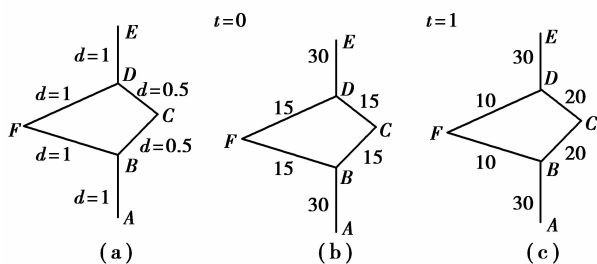


图 1 蚁群算法基本原理图

素浓度相对更大,蚂蚁将以越来越大的概率选择路径 BCD,最终蚂蚁会完全选择 BCD 路径,即实现了随机选择到自适应行为的过程。

2 裂缝识别及预测的蚁群算法设计

地震资料含有丰富的构造信息,其在裂缝描述中具有非常明显的作用,特别是对大裂缝及中等裂缝的描述。很多学者采用主曲率法、横波检测法、相干数据体技术来预测裂缝,取得了一定成效^[23]。笔者将转向简单的图像学知识,把地震剖面上每个采样点的振幅值转换成不同的灰度级,地震剖面就成为地震灰度图,将蚁群算法的图像处理方法引入到地震剖面的处理,而地震灰度剖面图上的裂缝信息就成为数字图像的边缘,就可以利用蚁群算法的方法识别裂缝。

2.1 蚁群算法设计

地震资料预处理是采用图像边缘检测手段,以获得地震灰度图,地震灰度图内容包括了目标、背景和边界等,灰度是目标背景的一个重要特征,选取像素的灰度值作为聚类的一个特征^[24],另外,边界点和噪声点通常是灰度发生突变的地方,而该点处的梯度体出现这种变化,反映边界点与背景或目标区域点区别的重要特征,对于梯度值较高的边界点和噪声点,利用像素是 3×3 的领域区分,因此蚁群算法的基本思想是给定原始图像 X ,将每个像素 X_j ($j=1, 2, \dots, n$) 看着一只蚂蚁,综合考虑每只蚂蚁灰度、梯度和领域为特征的三维向量,裂缝识别及预测就是这些具有不同特征的蚂蚁搜索食物源的过程。任意像素 X_i 到 X_j 的距离为 d_{ij} ,采用 Euclidean 加权距离公式^[25](1)计算,

$$d_{ij} = \sqrt{\sum_{k=1}^m p_k (x_{ik} - x_{jk})^2}, \quad (1)$$

式中: m 为维数,在这里 m 取为 3; p 为加权因子,其值根据像素分量对聚类的影响程度设定。设 r 为聚类半径, ph_{ij} 为 t 时刻蚂蚁 i 到聚类中心 C_j 的路径上的信息素浓度,则有式(2):

$$ph_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{若 } d_{ij} \leq r, \\ 0, & \text{否则。} \end{cases} \quad (2)$$

X_i 选择到 X_j 路径的概率 p_{ij} 为式(3),

$$p_{ij} = \begin{cases} \frac{ph_{ij}^\alpha(t) \eta_{ij}^\beta(t)}{\sum_{s \in S} ph_{is}^\alpha(t) \eta_{is}^\beta(t)}, & \text{若 } j \in S, \\ 0, & \text{否则。} \end{cases} \quad (3)$$

$$\eta_{ij} = \frac{1}{d_{ij}} = \frac{r}{\sqrt{\sum_{k=1}^m p_k (x_{ik} - c_{jk})^2}} \quad (4)$$

式中: α, β 分别为像素聚类过程中所积累的信息以及启发式引导函数对路径选择的影响因子, $S = \{X_s | d_{sj} \leq r, s = 1, 2, \dots, n\}$ 为可行性路径集合; $\eta_{ij}(t)$ 是启发式引导函数,式(4)中 r 为聚类半径,聚类半径越大,引导函数值越大,则选择该聚类中心的概率随之增大;反之亦然。

随着蚂蚁的移动,各路径上信息量发生变化,经过一次循环,各路径上信息量根据式(5)、(6)进行调整:

$$ph_{ij}(t+1) = (1-\rho)ph_{ij}(t) + \Delta ph_{ij}, \quad (5)$$

$$\Delta ph_{ij} = \sum_{k=1}^n \Delta ph_{ij}^k. \quad (6)$$

式中: ρ 为信息量随时间的衰减程度, Δph_{ij} 为本次循环中路径信息量的增量。

2.2 初始聚类中心设置

对图像特点进行分析,找出这些内容所对应的大致灰度、梯度及邻域特征作为初始聚类中心的特征,可使蚂蚁直接与聚类中心进行距离和概率计算,减少大量无关的计算,加快聚类进程^[26-27]。本次研究将所选定的初始聚类中心表示为 $C_j(V, G, N_e)$,其中 V 代表灰度特征向量, G 代表梯度特征向量, N_e 代表邻域特征向量, $j = 1, 2, \dots, n$ 。

2.3 算法流程

Step1:开始,对地震资料作预处理,获得地震剖面灰度级图像;

Step2:初始化 $\alpha, \beta, ph_{ij}, r, \lambda$ 等参数;

Step3:根据公式(1),计算像素 X_i 到不同食物源 C_j 的距离 d_{ij} 。如果 d_{ij} 为0,则该像素到该类的隶属度为1,否则,如果 $d_{ij} < r$,根据式(7)计算引导函数,同时根据式(5)计算 X_i 到各路径的信息量。

Step4:根据式(3),计算像素的隶属度,判断隶属度是否大于 λ 。若大于 λ ,则根据式(6),计算信息量增量 Δph_{ij} ,更新信息量,并按式(7)更新第 j 类聚类中心,其中 J 表示 C_j 类中元素个数^[24]。否则,将该蚂蚁记录到SS集中,为没有被归类的像素集合。

$$\bar{C}_j = \frac{1}{J} \sum_k X_k. \quad (7)$$

Step5:计算各类的类间距离,当类间距离小于阈值 ϵ 时,将两类合并为一类,更新聚类中心。

Step6:如果还有待分类像素,则跳转到Step2,否则结束计算并输出结果。

3 应用实例

东部某裂缝型碳酸盐岩油藏雾迷山组裂缝发育,自投产以来,经历了投产、高产稳产、产量快速递减阶段以后,目前进入高含水后期产量低速缓慢递减阶段,油藏内部裂缝系统油水分布复杂,储层有利发育区的确定存在多解性。多年研究表明,碳酸盐岩储层在纵向上和平面上都有极强的非均质性,导致大量的剩余油保留在低渗裂缝储层中。研究发现,该地区油藏油水界面以上的纯油带、中小裂缝中低渗透区域、稀井网区、水淹区内的井间锥间带和油水界面以下低渗透带均含有较多的剩余可动油,因此开展该地区的裂缝预测工作将为分析剩余油分布规律提供有利的证据。

3.1 地震资料预处理

为消除地震采集噪声、提高原始地震数据的图像清晰度,在裂缝处理前,应先了解数据体的整体趋势,对原始地震数据体进行预处理,包括高斯构造平滑滤波处理、混沌处理和方差处理等,这些属性处理不仅可以揭示裂缝及细小断层特征,还能直观的展示地层及裂缝分布规律,提高成像处理质量。

1)高斯构造平滑滤波处理,是基于正态分布理论的局部构造平滑^[28],以达到压制噪声,增加地震反射的连贯性,根据图2(a)和图2(b)的比较可知,经高斯构造平滑滤波处理后的剖面比原始剖面噪声更少,杂乱的纹理也减少,并且地震反射的连贯性增强。

2)混沌信号处理,地震资料中的大量噪声表现为混沌现象,目前研究人员多采用神经网络的方法对混沌信号进行检测和处理,根据相空间重构理论,利用延迟嵌入的方法将混沌系统的一维观测时间序列重构到嵌入空间,使系统原始状态变量构成的相空间和一维观测值重构的相空间的动力学行为等价,从而得到时间序列下一时刻预测值^[29],去除混沌背景检测出淹没在混沌背景中的微弱信号,使处理后的地震数据强振幅变强,弱振幅变弱,如图2(c)所示。

3)方差处理,该技术是利用采样点与周围相邻地震道时窗内所有样点,如振幅、相位等之间的相似性来描述地层、岩性等的横向非均匀性,计算平均值之间的方差^[30],然后再加权归一化即可得到要求取的值,从而揭示裂缝的不连续性信息,获得地震灰度级图像图2(d),因此,将方差处理技术与蚁群算法和三维可视化技术联合应用,将进一步提高裂缝识别精度。

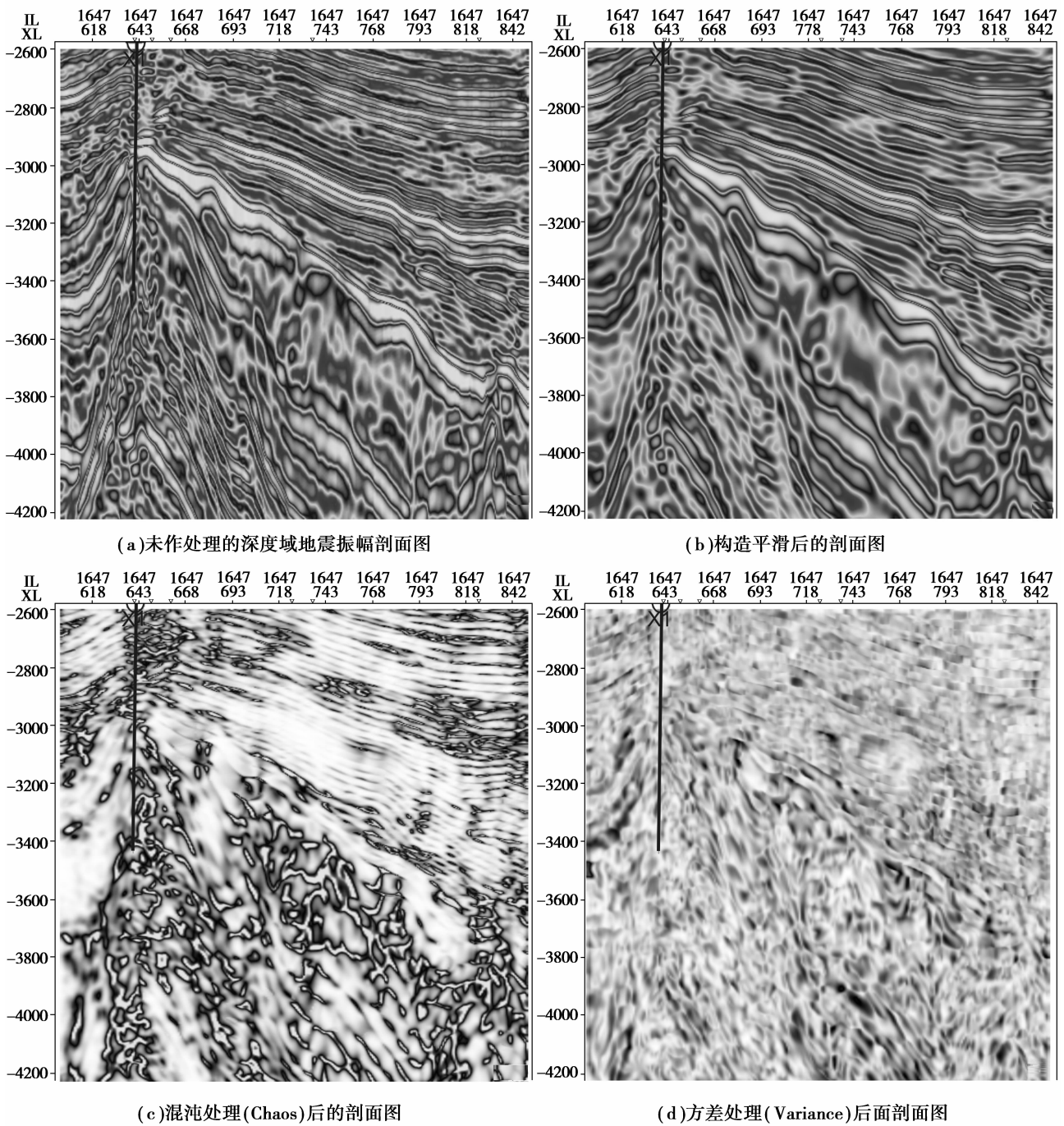


图 2 地震资料预处理图

3.2 裂缝预测及效果评价

笔者根据以上设计的蚁群算法步骤,结合实际工区的三维地震资料,通过预处理,获取三维地震灰度级图像后,利用岩心、成像测井、钻井和生产等资料,多次修改蚂蚁参数值,最终获得了与实际较相符的裂缝预测结果。由图 3、4 分析可知,所预测的裂缝清晰可见,能定量表征裂缝在空间和平面上的展布特征,即裂缝体系呈网状结构,NW 向、近 EW 向及 NNE 向的 3 组裂缝簇占绝对优势。下面就裂缝

识别及效果分别评述:

1)裂缝识别的过程中,涉及到蚂蚁参数值的设置问题,但是对这些参数的选取原则和方法目前尚未找到切实可行的理论依据,笔者研究过程中,主要利用岩心和成像测井的统计结果来调节蚂蚁参数,以达到合理预测裂缝的目的。根据 X3、X4、X5 井的岩心统计,共发育有 5 组裂缝(表 1),其中以 NNE 向 $15^{\circ}\sim 20^{\circ}$ 、近 EW 向 $80^{\circ}\sim 100^{\circ}$ 及 NW 向 $320^{\circ}\sim 330^{\circ}$ 三组为主。据 X3 井统计,在 396 块岩心中具有

裂缝 3 858 条,密度平均值为 8.7 条/m,不同等级宽度的裂缝具有不同的密度,窄裂缝的密度大,宽裂缝的密度小。为能获得更准确的预测结果,对研究区成像测井资料的裂缝走向和裂缝密度资料进行了统计,裂缝的走向也主要以 NNE、近 EW 及 NW 向为主(图 5),裂缝密度小于 10 条/m,这和岩心资料有一致性。笔者利用所掌握的裂缝信息资料,多次修改蚂蚁参数值,最终获得了裂缝预测结果,为分析剩余油分布规律提供了技术支持。

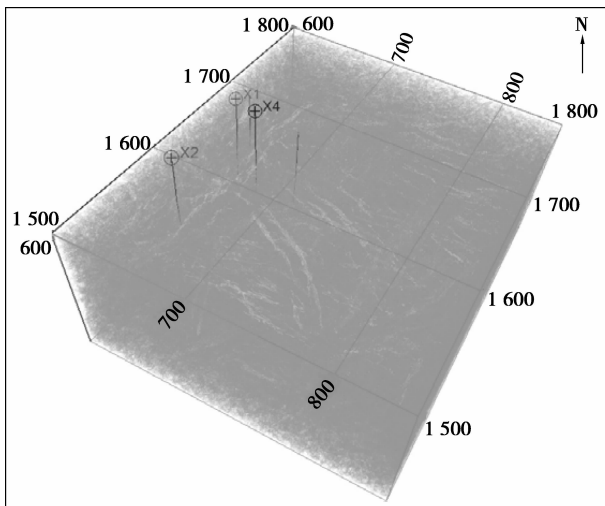


图 3 蚁群算法获得的裂缝预测空间展布图

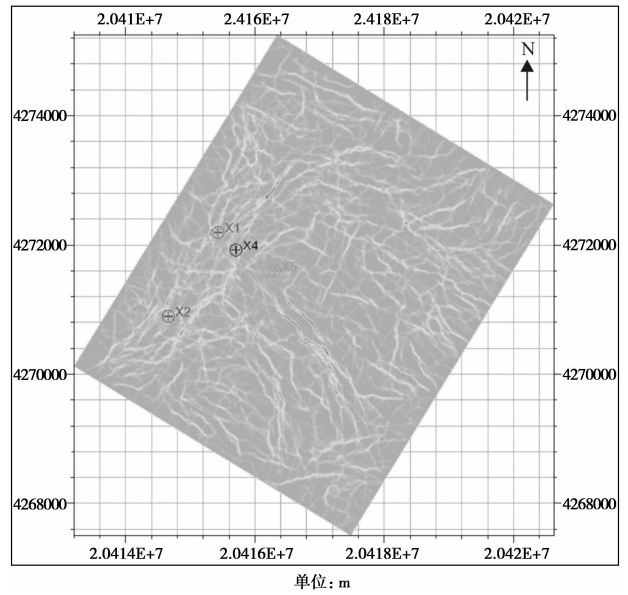
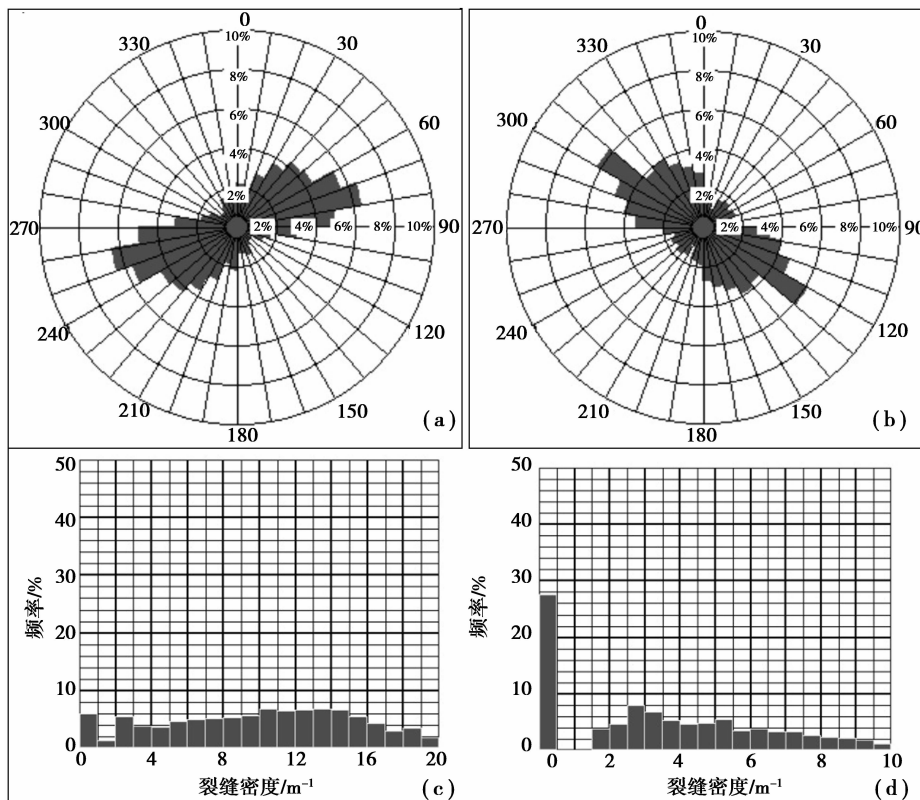


图 4 蚁群算法获得的裂缝预测平面展布图

表 1 裂缝走向发育表

井 号	裂缝走向/(°)				
	15~20	40~60	80~100	290~310	320~330
X3	16	55	100		320
X4	20		85	310	345
X5	25		87		320
井数(口)	3	1	3	1	3



说明: 图(a)和图(b)两口井裂缝走向图; 图(c)和图(d)为裂缝密度分布图

图 5 成像测井裂缝走向及密度分布图

2) 裂缝预测效果评价, 对于预测结果的可靠性分析, 笔者主要利用成像测井、钻井漏失量和与裂缝有关的高产井等资料来验证。图 6 是过 X1 井裂缝识别结果的解释剖面与成像测井资料的对比, 图 6 的右侧是成像测井裂缝解释图, 黑色小方块为裂缝发育部位, 图 6 左侧是过 X1 井裂缝识别结果的解释剖面图, 红色和黄色区代表裂缝发育带。总体分析知, 蚁群算法识别的裂缝优势带与成像测井上的裂缝发育带具较好的对应关系, 且在不同的深度, 在成像测井上有裂缝反映的, 同样裂缝识别结果上也有反映, 说明裂缝识别及预测结果是可靠的。笔者对研究区单井漏失量较大的井进行了统计(表 2), 发现漏失量的大小在一定程度上能反映裂缝发育状况, 图 7(a) 是过 X4 井裂缝预测的结果在地震属性剖面图上的展示, 从图上可以看到在 3 129~3 145 m 漏失量达到 914. 53 m³, 该井段与临近区域的裂缝较发育, 因此裂缝预测结果和实际钻井漏失量相关, 与实际相符。另外, 在研究区, 大多数高产油井都沿断层裂缝带分布, 主要生产井段均为裂缝或溶洞发育段。目前该油藏单井日产油达 1 000 t 的井有 2 口, 即 X1 井、X2 井。图 7(b) 是过 X1 井的裂缝预测地震属性剖面图, 酸化前 2 955. 42~3 125 m 井段试油为日产油 285 t, 酸化后 2 955. 42~3 458. 32 m 井段试油为日产油 5 435 t, 从剖面图上明显可以看出下段

显示的裂缝好于上段, 因此下段试油产量远远大于上段。而 X2 井也是一口单井日产和累产量都很高的特殊井, 在 3 224. 48~3 334. 66 m 井段发育裂缝, 日产油 3 510 t, 累产 290. 358 9 万 t。因此, 根据高产井分析知, 裂缝预测结果与裂缝较发育的高产井段相关。总之, 利用油田实际生产资料对预测结果的可靠性分析, 印证了采用蚁群算法识别和预测裂缝的方法是可行, 能达到研究目的。

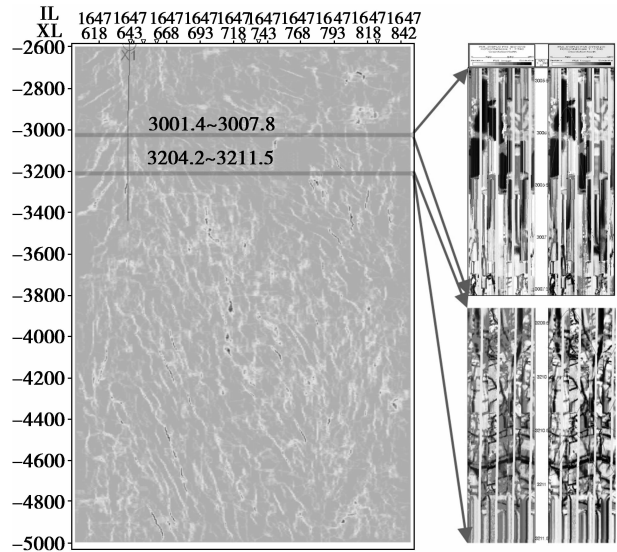
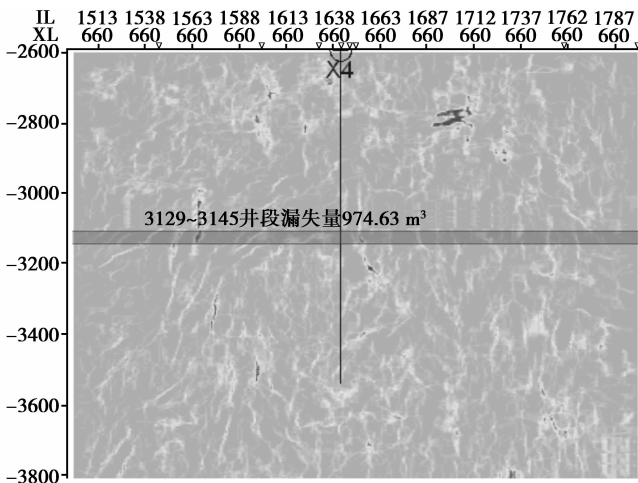


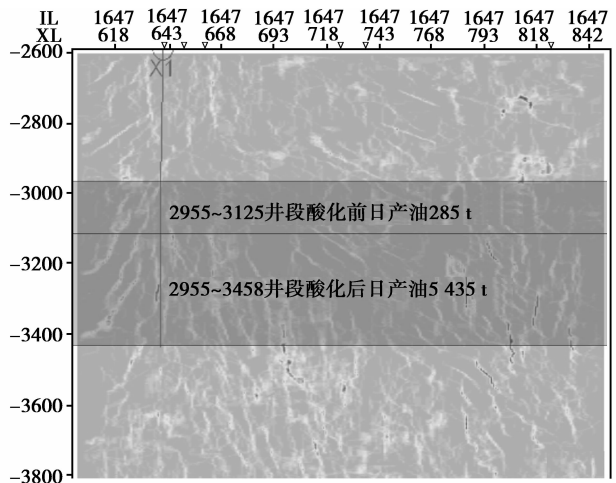
图 6 X1 井成像裂缝与预测裂缝对比图

表 2 研究区钻井漏失量统计表

井号	进山深度/m	完钻井深/m	揭开厚度/m	漏失井段/m	漏失量/m ³
X1 井	2 955. 00	3 458. 32	503. 32	3 432. 29~3 458. 32	365. 30
X3 井	2 989. 00	3 040. 00	51. 00	2 990. 19~3 009. 00	1 474. 00
X4 井	2 997. 00	3 560. 00	563. 00	3 129. 00~3 145. 00	914. 53
X2 井	3 222. 50	3 334. 66	112. 16	W9~W10	306. 00



(a) X4 井钻井漏失量



(b) X1 井日产油

图 7 X4 井和 X1 井的纵剖面裂缝发育图

4 结论与认识

针对东部某碳酸盐岩油藏裂缝发育,在开发后期油藏内部裂缝系统油水分布复杂,储层有利发育区的确定存在多解性的情况,采用蚁群算法对该区进行裂缝识别和预测,笔者参照岩心、成像测井资料对蚂蚁参数值调优,系统描述了研究区裂缝的空间及平面展布特征,即裂缝体系呈网状结构,北西向、北北东向及近东西向的3组裂缝簇占绝对优势。再利用钻井漏失量、生产资料及成像测井对裂缝预测结果进行可靠性分析,表明利用蚁群算法预测裂缝的方法切实可行,能为分析剩余油分布规律提供技术支持。因此,蚁群算法作为一种新兴的仿生学算法,虽然还存在许多的问题,如算法的收敛性、参数的合理设置以及运算速度较慢等问题,但该方法能直观地进行裂缝识别及预测,获得裂缝空间展布规律的认识,实现储层裂缝识别及预测从定性向量化转变,相信随着蚁群算法理论的不断成熟和创新,其将展示较大的生气和活力。

参考文献:

- [1] 赵彬,侯加根,刘钰铭,等. 基于示点性过程模拟的碳酸盐岩裂缝型储层建模方法[J]. 科技导报, 2011, 29(3):39-42.
ZHAO Bin, HOU Jiagen, LIU Yuming, et al. Modeling of carbonate fractured reservoirs based on marked point process simulation [J]. Technology Review, 2011, 29(3): 39-42.
- [2] 高霞,谢庆宾. 储层裂缝识别与评价方法新进展[J]. 地球物理学进展, 2007, 22(5):1460-1465.
GAO Xia, XIE Qingbin. Advances in identification and evaluation of fracture [J]. Progress in geophysics, 2007, 22(5): 1460-1465.
- [3] Qu S L, Ji Y X, Wang X, et al. Fracture detection by using full azimuth P wave attributes [J]. Applied Geophysics, 2007, 4(3): 238-243.
- [4] 张虹,沈忠民. 超致密裂缝性储层地震预测方法研究:以川西新场气田须二气藏勘探为例[J]. 成都理工大学学报:自然科学版, 2008, 35(2):150-157.
ZHANG Hong, SHEN Zhongmin. Study on seismic prediction methods for super tight fractured reservoirs—An example from the exploration of Member 2 of Xujiahe Formation reservoir in Xinchang gas field, Sichuan Basin, China [J]. Journal of Chengdu University of Technology: Science and Technology Edition, 2008, 35(2): 150-157.
- [5] 何雨丹,魏春光. 裂缝型油气藏勘探评价面临的挑战及发展方向[J]. 地球物理学进展, 2007, 22(2):537-543.
HE Yudan, WEI Chunguang. The present situation and research direction of evaluation methods in fracture type reservoir [J]. Progress in geophysics, 2007, 22(2): 537-543.
- [6] Brown A R. Interpretation of three-dimensional seismic data [M]. Tulsa, Oklahoma, USA: The American Association of Petroleum Geologists and the Society of Exploration Geophysicists, 2004: 42.
- [7] Hoyes J, Cheret T. A review of global interpretation methods for automated 3D horizon picking [J]. The Leading Edge, 2011, 1(1): 38-47.
- [8] Barness A E. A filter to improve seismic discontinuity data for fault interpretation [J]. Society of Exploration Geophysicists, 2006, 71(3): 1-4.
- [9] Vrugt J A, Stauffer P H, Wöhling Th, et al. Inverse modeling of subsurface flow and transport properties: a review with new developments [J]. Vadose Zone Journal, 2008, 7(2): 843-864.
- [10] 蔡希源,唐建明,陈本池. 三维多分量地震技术在川西新场地区深层致密砂岩裂缝检测中的应用[J]. 石油学报, 2010, 31(5):737-743.
CAI Xiyuan, TANG Jianming, CHEN Benchu. A 3D multi-component seismic exploration technique applied to the detection of deep-seated tight sandstone fractures in the Xinchang area of the western Sichuan Basin [J]. Acta Petrolei Sinica, 2010, 31(5): 737-743.
- [11] 王从斌,龚洪林,许多年,等. 高分辨率相干体分析技术及其应用 [J]. 地球物理学进展, 2008, 23(5): 1575-1578.
WANG Congbin, GONG Honglin, XU Duonian, et al. High-resolution coherency analysis technique and its application [J]. Progress in Geophysics, 2008, 23(5): 1575-1578.
- [12] 严哲,顾汉明,赵小鹏. 基于蚁群算法的非线性 AVO 反演 [J]. 石油地球物理勘探, 2009, 44(6):700-702.
YAN Zhe, GU Hanming, ZHAO Xiaopeng. Non-linear AVO inversion based on ant colony algorithm [J]. Oil Geophysical Prospecting, 2009, 44(6): 700-702.
- [13] 李红星,刘财,陶春辉. 图像边缘检测方法在地震剖面同相轴自动检测中的应用研究 [J]. 地球物理学进展, 2007, 22(5):1607-1610.
LI Hongxing, LIU Cai, TAO Chunhui. The study of application of edge measuring technique to the detection of phase axis of the seismic section [J]. Progress in Geophysics, 2007, 22(5): 1607-1610.
- [14] 冯明友,张帆,王兴志,等. 利用 IPA 技术精细识别裂缝:以柴达木盆地南翼山工区为例 [J]. 地球物理学进展, 2010, 25(6):2054-2060.
FENG Mingyou, ZHANG Fan, WANG Xingzhi, et al.

- Delineation of fractures by 3D seismic data IPA technique: a case study in Nanyishan area, Qaidam, Basin[J]. *Progress in Geophysics*, 2010, 25(6): 2054-2060.
- [15] 陈辉, 胡英, 李军. 数学形态学在 seismic 裂缝检测中的应用[J]. *天然气工业*, 2008, 28(3): 48-50.
CHEN Hui, HU Ying, LI Jun. Application of mathematical morphology to seismic fracture detection[J]. *Nature Gas Industry*, 2008, 28(3): 48-50.
- [16] Hajizadeh Y, Christie M, Demyanov V. Ant colony optimization algorithm for history matching [C] // EUROPEC/EAGE Conference and Exhibition, 8-11 June 2009, Amsterdam, The Netherlands. [S. l.]: Society of Petroleum Engineers, 2009: 13.
- [17] 胡小兵, 黄席樾. 基于蚁群算法的三维空间机器人路径规划[J]. *重庆大学学报*, 2004, 27(8): 132-135.
HU Xiaobing, HUANG Xiyue. Path planning in 3-D space for robot based on ant colony algorithm[J]. *Journal of Chongqing University*, 2004, 27(8): 132-135.
- [18] Rishiwal V, Yadav M, Arya K V. Finding optimal paths on terrain maps using ant colony algorithm[J]. *International Journal of Computer Theory and Engineering*, 2010, 2(3): 416-419.
- [19] 曹树刚, 王延钊, 卢华玮. 高层建筑人员疏散的蚁群算法数学模型[J]. *重庆大学学报: 自然科学版*, 2007, 30(12): 47-50.
CAO Shugang, WANG Yanzhao, LU Huawei. Ant colony algorithm mathematical model of high buildings pedestrian evacuation [J]. *Journal of Chongqing University: Nature Science Edition*, 2007, 30(12): 47-50.
- [20] 张欣. 蚂蚁追踪在断层自动解释中的应用: 以平湖油田放鹤亭构造为例[J]. *石油地球物理勘探*, 2010, 45(2): 278-281.
ZHANG Xin. Application of ant tracing algorithm in fault automatic interpretation: a case study on Fangheting structure in Pinghu Oilfield [J]. *Oil Geophysical Prospecting*, 2010, 45(2): 278-281.
- [21] Cox T, Seitz Ka. Ant tracking seismic volumes for automated fault interpretation[C] // 2007 CSPG CSEG Convention, May 14-17, 2007, Calgary, Alberta, Canada. [S. l.]: Canadian Society of Petroleum Geologist, 2007, 2: 670-671.
- [22] Dorigo M. Optimization, learning and natural algorithms[D]. Department of Electronics, Politecnico dimilano, Italy, 1992.
- [23] 王绪松, 杨长春. 对地震图象进行保边滤波韵非线性各向异性扩散算法[J]. *地球物理学进展*, 2006, 21(2): 452-457.
WANG Xusong, YANG Changchun. An edge-preserving smoothing algorithm of seismic image using nonlinear anisotropic diffusion equation[J]. *Progress in Geophysics*, 2006, 21(2): 452-457.
- [24] 段海滨. 蚁群算法原理及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2005: 302-303.
- [25] 陆宗骥, 朱煜. 用带形状校正的腐蚀膨胀实现 Euclidean 距离变换[J]. *中国图象图形学报*, 2010, 15(2): 294-300.
LU Zongji, ZHU Yu. Implementation of Euclidean distance transforms using erosion and dilation with form correction[J]. *Journal of Image and Graphics*, 2010, 15(2): 294-300.
- [26] 张惟皎, 刘春煌, 尹晓峰. 蚁群算法在数据挖掘中的应用研究[J]. *计算机工程与应用*, 2004, 28(2): 171-173.
ZHANG Weijiao, LIU Chunhuang, YIN Xiaofeng. Application research on data mining using ant colony algorithm[J]. *Computer Engineering and Applications*, 2004, 28(2): 171-173.
- [27] Wang J, Lu W K. Coherence cube enhancement based on local histogram specification [J]. *Applied Geophysics*, 2010, 7(3): 249-256.
- [28] 伍鹏, 贺振华, 陈学华, 等. 二维高斯迭代平滑滤波曲率属性及其应用[J]. *地球物理学进展*, 2010, 25(6): 2144-2149.
WU Peng, HE Zhenhua, CHEN Xuehua, et al. Curvature attribute of two-dimensional Gaussian iterated smoothing filtering and applications [J]. *Progress in Geophysics*, 2010, 25(6): 2144-2149.
- [29] 李月, 杨宝俊, 赵雪平, 等. 检测地震勘探微弱同相轴的混沌振子算法[J]. *地球物理学报*, 2005, 48(6): 1428-1433.
LI Yue, YANG Baojun, ZHAO Xueping, et al. An algorithm of chaotic vibrator to detect weak events in seismic prospecting records [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2005, 48(6): 1428-1433.
- [30] 陈风云. 方差体技术在地震勘探中的应用[J]. *中国煤田地质*, 2005, 12(4): 51-52.
CHEN Fengyun. Application of variance cube technique in seismic prospecting[J]. *Coal Geology of China*, 2005, 12(4): 51-52.

(编辑 郑洁)