

文章编号:1673-5005(2011)06-0014-07

## 基于蚂蚁算法的断裂自动解释技术 在黄珏南地区的应用

张继标<sup>1</sup>, 戴俊生<sup>1</sup>, 赵力彬<sup>2</sup>, 毛成栋<sup>3</sup>, 田腾飞<sup>4</sup>, 吉亚明<sup>5</sup>, 李石磊<sup>6</sup>

- (1. 中国石油大学 地球科学与技术学院, 山东 青岛 266555; 2. 中石油塔里木油田公司 勘探开发研究院, 新疆 库尔勒 841000;  
3. 中国国土资源经济研究院, 北京 101149; 4. 中海石油深圳分公司研究院, 广东 广州 510240;  
5. 中石化中原油田分公司, 河南 濮阳 457001; 6. 中石油吉林油田公司 勘探开发研究院, 吉林 松原 138000)

**摘要:**在对地震资料进行预处理并综合应用相干体技术、方差体技术等多种地震属性技术检测地震反射不连续性的基础上,应用蚂蚁追踪技术对黄珏南地区三维地震资料进行断裂系统的自动解释,基于断裂自动解释结果提取黄珏南地区的三维断片系统,并将自动解释成果与人工解释方案进行对比。结果表明:在应用方差体技术对地震反射不连续性进行检测的基础上进行蚂蚁追踪得到的属性体断裂痕迹显示更加清晰直观,可以有效地指导断裂的平面及剖面解释;黄珏南地区主要发育一组近东西走向的断裂,呈阶梯状展布,断面北倾,一般倾角较大;蚂蚁追踪解释的主要断裂发育特征基本符合构造成因机制预测的断裂发育规律,这进一步验证了方法的实用性和有效性。

**关键词:**地震勘探; 蚂蚁算法; 地震属性; 蚂蚁属性体; 三维可视化; 断裂自动解释; 黄珏南地区

**中图分类号:**TE 121.2; P 542 **文献标志码:**A **doi:**10.3969/j.issn.1673-5005.2011.06.003

### Application of automatic fault interpretation technology based on ant colony algorithm in south Huang-jue area

ZHANG Ji-biao<sup>1</sup>, DAI Jun-sheng<sup>1</sup>, ZHAO Li-bin<sup>2</sup>, MAO Cheng-dong<sup>3</sup>,  
TIAN Teng-fei<sup>4</sup>, JI Ya-ming<sup>5</sup>, LI Shi-lei<sup>6</sup>

- (1. School of Geosciences in China University of Petroleum, Qingdao 266555, China;  
2. Exploration and Development Institute, Tarim Oilfield Company, PetroChina, Korla 841000, China;  
3. Chinese Academy of Land & Resource Economics, Beijing 101149, China;  
4. Shenzhen Research Institute of CNOOC, Guangzhou 510240, China;  
5. Zhongyuan Oilfield Branch Company, SINOPEC, Puyang 457001, China;  
6. Exploration and Development Institute, Jilin Oilfield Company, PetroChina, Songyuan 138000, China)

**Abstract:** On the basis of the pre-processing of seismic data and the integrated application of multiple seismic attribute technology such as the coherence and variance technique to detect reflection discontinuities in the seismic data, the ant tracking technology was applied in the automatic fault interpretation of the seismic data in south Huang-jue area. Based on the results of automatic interpretation, the three-dimensional fault patches were extracted and the artificial job was also compared with the automatic results. The results show that the fault traces of the attribute volume obtained by the ant tracking technology based on the detection of variance technique over the reflection discontinuities are much more distinct and can be used to effectively guide the fault interpretation both in the plane and the section. It is also concluded that a group of graded faults are developed with nearly EW strikes, N tendency and generally large dip. The main fracture characteristics interpreted by the ant tracking technology agree well with the law of the fault development predicted by structural genesis mechanism, which also proves the technology is effective and practical.

**Key words:** seismic prospecting; ant colony algorithm; seismic attribution; ant tracking attribute volume; three-dimensional

收稿日期:2011-04-22

基金项目:国家科技重大专项课题(2011ZX05011-001)

作者简介:张继标(1986-),男(汉族),山东安丘人,博士研究生,主要从事构造地质学方面的研究。

visualization; automatic fault interpretation; south Huang-jue area

三维地震资料在石油地质勘探领域有着广泛的应用,其快速精细解释一直是地质学家们面临的一个难题。目前的三维地震解释主要是通过解释一系列的二维剖面并结合水平切片来实现,是一种三维地震资料的二维解释,解释效率低,精度差,受人工干预影响较大<sup>[1-3]</sup>。随着新技术、新方法的不断发展,以地震相干技术及三维可视化技术等为代表的一系列三维地震解释技术的出现提高了地震解释的速度与精度,但在实际应用中会受各种因素制约<sup>[4-5]</sup>。基于蚂蚁算法的三维断裂系统自动解释技术的出现则为这些难题的解决提供了一种有效途径。黄珏南地区位于苏北盆地高邮凹陷南部断阶带的西部,由于受到多期构造运动的影响,断裂发育复杂,地震资料品质较差,利用常规的地震资料解释手段解释困难较大,小断层识别困难,构造落实程度较低,且受人为因素影响比较大。因此,笔者应用蚂蚁追踪技术对黄珏南地区进行断裂系统的精细自动解释,以提高断裂解释的准确性及构造落实程度。

## 1 蚂蚁算法模型

蚂蚁算法是由意大利学者 Colorini 等<sup>[6]</sup>于 20 世纪 90 年代初期通过模拟自然界中蚂蚁集体觅食的行为而提出的一种基于种群的启发式仿生进化算法。人工蚂蚁算法跟真实蚂蚁相比人工蚂蚁具有一定的记忆功能和有意识地寻找最短路径的优点。Dorigo 等<sup>[6-10]</sup>以经典的求解  $n$  个节点的旅行商 (TSP) 问题对蚂蚁算法计算模型进行了说明。

假设有  $n$  个节点,  $d_{ij}(i, j=1, \dots, n)$  表示任意两个节点  $i$  与  $j$  之间的距离,  $m$  为蚁群中蚂蚁的数目,  $\tau_{ij}(t)$  为  $t$  时刻在节点  $ij$  连线上残留的信息量。初始时刻各条路径上信息量相等。蚂蚁  $k(k=1, \dots, m)$  在运动过程中根据各条路径上的信息量决定转移方向,  $P_{ij}(t)$  表示在  $t$  时刻蚂蚁  $k$  由位置  $i$  转移到位置  $j$  的概率<sup>[8]</sup>,

$$P_{ij} = \begin{cases} \frac{\tau_{ij}^\alpha(t) \eta_{ij}^\beta(t)}{\sum \tau_{ij}^\alpha(t) \eta_{ij}^\beta(t)}, & j \in \text{蚂蚁 } k \text{ 允许走的下一节点;} \\ 0, & j \notin \text{蚂蚁 } k \text{ 允许走的节点.} \end{cases}$$

随着时间的推移,以前留下的信息逐渐挥发,经过  $n$  个时刻蚂蚁完成一次循环,各路径上信息量要根据下式作调整:

$$\tau_{ij}(t+n) = \rho \tau_{ij}(t) + (1-\rho) \Delta \tau_{ij}$$

其中

$$\Delta \tau_{ij} = \sum_{k=1}^m \Delta \tau_{ij}^k$$

式中,  $\eta_{ij}$  为由节点  $i$  转移到节点  $j$  的期望程度,可根据某种启发式算子计算;  $\rho$  为信息素的残留程度;  $1-\rho$  为信息素挥发程度;  $\Delta \tau_{ij}^k$  为第  $k$  只蚂蚁在该次循环中留在路径  $ij$  上的信息素;  $\Delta \tau_{ij}$  表示本次循环中留在路径  $ij$  上的信息量。

蚂蚁算法模型通常采用 Ant-Cycle 作为基本模型<sup>[8]</sup>,即

$$\Delta \tau_{ij}^k = \begin{cases} \frac{Q}{L_k}, & \text{第 } k \text{ 只蚂蚁在本次循环中经过 } ij; \\ 0, & \text{否则.} \end{cases}$$

式中,  $Q$  是信息素强度,它影响算法的收敛速度;  $L_k$  表示第  $k$  只蚂蚁在本次循环中所走路程的长度。

## 2 蚂蚁追踪技术及其流程

基于蚂蚁算法的蚂蚁追踪技术能自动分析、识别断裂系统,其原理是在地震数据体中散播大量电子蚂蚁,并让每个蚂蚁沿着可能的断裂痕迹向前移动,同时发出信息素。若蚂蚁遇到预期的断裂将用信息素做出明显的标记,否则将不做标记或只做不太明显的标记,以指导其他蚂蚁的追踪。利用蚂蚁追踪技术进行断裂系统的自动解释主要包括蚂蚁属性体的生成和断裂系统的自动提取两个过程。

### 2.1 蚂蚁属性体的生成

利用常规三维地震数据体生成蚂蚁属性体主要包括以下三步:

第一步是地震资料预处理。在地震资料的预处理过程中,主要采用中值滤波、高斯滤波、带通滤波及构造平滑处理等技术方法以增强地震有效反射的连续性,降低噪音影响。

第二步是地震数据体“边缘”探测。“边缘”即不连续点,对地震数据“边缘”的探测旨在寻找数据体中的不连续点,并借助于一些技术手段对这一不连续性进行强化,主要根据倾角和方位角属性、混沌属性及方差属性等。

(1) 倾角和方位角属性。在三维地震数据体中,将振幅当成三维空间变量,通过求取反射层上任一点处的振幅梯度就可以确定该处层面的法线方位。对各点计算出的梯度向量计算协方差矩阵,然后求解该协方差矩阵的特征向量和特征值,最大特征值对应的特征向量即为某一特定点的梯度主方向,该梯度方向即对应振幅变化的最大方向,也就是

反射层位的法线方向<sup>[11]</sup>。

(2)混沌属性。根据梯度向量对应协方差矩阵的3个特征值 $\lambda_{max}$ 、 $\lambda_{mid}$ 与 $\lambda_{min}$ 之间的相互关系,可以判别振幅的规律性与混乱性。如果有效波很强,等振幅面的成层性会十分明显,梯度向量对应协方差矩阵的最大特征值 $\lambda_{max}$ 较其他两个特征值 $\lambda_{mid}$ 、 $\lambda_{min}$ 会大得多, $\lambda_{max} > \lambda_{mid} \approx \lambda_{min}$ ,一般对应光滑、连续的反射层<sup>[12]</sup>(图1(a));如果层面弯曲或者是被断层切断(图1(b)),则梯度向量对应协方差矩阵将会有两个比较大的特征值, $\lambda_{max} \approx \lambda_{mid} > \lambda_{min}$ ;如果反射层被断层切断并且存在断裂破碎带(图1(c)),则3个特征值应该基本相等,即 $\lambda_{max} \approx \lambda_{mid} \approx \lambda_{min}$ <sup>[8-9]</sup>。

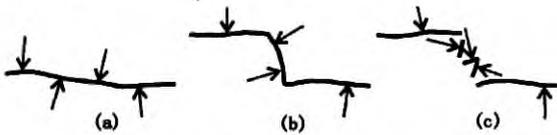


图1 不同层面混沌属性特征(据 Randen 等)

Fig.1 Characteristics of chaotic attribute in different layers(According to Randen, et al)

(3)方差体技术。方差体技术是近几年发展起来的一项地震资料解释新技术,它利用相邻道地震信号(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,通过计算样点的方差值揭示数据体中的不连续信息,进行断层、岩性识别<sup>[13]</sup>。在三维地震数据体中取很薄的水平层,计算某一点附近振幅的方差可以反映出振幅的横向变化。在规则层位面上沿层振幅变化不大,因此对应的方差也小,而在断层附近或岩性变化带附近,振幅变化较大,振幅方差也大<sup>[7]</sup>。

第三步是利用蚂蚁算法生成蚂蚁属性体。蚂蚁追踪技术创立了一种全新的断裂系统属性,在预先设定的地震体内突出具有方位特征的断裂,然后进行运算并产生蚂蚁属性体<sup>[7]</sup>。

### 2.2 三维断裂系统自动提取

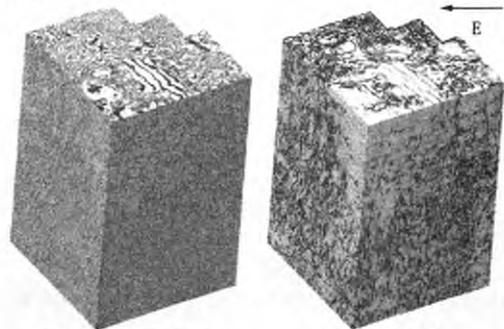
在对常规三维地震数据体进行蚂蚁追踪得到蚂蚁属性体之后,通过断裂提取工具对获得的蚂蚁属性体进行自动断片提取,提取过程中可以人为设置种子点,并通过交互工具对提取的断片进行评估、编辑和筛选等工作。通过提取最终可以获得一个直观的三维断裂模型。

## 3 蚂蚁追踪技术在黄珏南地区的应用

黄珏南地区地震资料品质较差,应用过程中首

先采用构造平滑技术进行地震资料预处理。通过计算倾角和方位角的优势方位确定局部构造方位,然后在输入信号引导下基于局部构造进行高斯平滑处理,以压制地震数据体中的噪声、增加地震反射的连续性。

在对地震数据体进行构造平滑后,尝试用多种方法强化地震数据的“不连续性”,图2(a)、(b)分别为应用地层倾角导数及方差体技术进行的地震数据不连续性检测,对比可以明显看出应用方差体技术进行的不连续检测效果好,断裂痕迹相对较清晰,因此最终确定在黄珏南地区应用方差体技术来强化地震数据不连续性。



(a)地层倾角属性体 (b)方差属性体

图2 黄珏南地区地震资料处理

Fig.2 Processing of seismic data in south Huang-jue area

在方差属性体的基础上,利用蚂蚁算法生成蚂蚁属性体(图3),这是断裂系统解释的核心。具体应用过程中要注意各项参数的选择,其中初始蚂蚁边界、蚂蚁追踪偏差及蚂蚁搜索步长这三项参数的



图3 黄珏南地区蚂蚁追踪属性体

Fig.3 Ant tracking attribute volume of south Huang-jue area

选择直接影响着断裂解释的效果。初始蚂蚁边界即指每只蚂蚁的活动范围,初始蚂蚁边界越小追踪的断裂越精细,但所需的计算时间也就越长。对于追踪规模较大的断裂,该参数一般选择 5~7,对于较小断裂,一般选择 3~4。蚂蚁追踪偏差控制了蚂蚁的拐弯能力,参数越大对追踪弯曲断裂越有利,但也会影响较直断裂的追踪。蚂蚁搜索步长控制了蚂蚁在追踪时每次移动的单步长度,增加该值将使蚂蚁搜索的更远,但会降低搜索的精度。黄珏南地区断裂体系复杂,小规模断裂较多,为了真实地反映各级断裂的发育规律,提高断裂解释的精度,在实际追踪过程中选择较小的蚂蚁初始边界、蚂蚁搜索步长及较大的蚂蚁追踪偏差。

三维断裂系统的自动提取可以在常规三维地震数据体及蚂蚁属性体的基础上进行,但在蚂蚁属性体基础上进行断裂系统的自动提取效果更佳。经过计算得到蚂蚁追踪属性体之后,再利用断片系统自动提取工具,经过反复的参数调校可以得到一个直观显示的三维断片系统。结合人工干预及对研究区地质规律的认识,对提取的三维断片系统进行分析处理,重新组合部分断裂,并剔除一些断裂假象,最终可以得到一个与人工解释方案吻合良好的三维断片系统(图 4),并可实现对研究区断裂系统的定量统计分析。



图 4 蚂蚁追踪自动提取三维断片系统

Fig. 4 Three-dimensional fault system extracted automatically by using ant tracking technology

#### 4 蚂蚁属性体的解释

利用蚂蚁追踪技术获得的蚂蚁追踪属性体虽然还无法实现断裂的自动解释,但其无论是在平面上还是剖面上都有清晰的断裂痕迹显示,可以有效地指导断裂系统的人工解释。

#### 4.1 蚂蚁追踪属性体平面分析

黄珏南地区目的层位阜宁组地震反射旅行时主要在 0.5~2.5 s,在此时间范围内提取蚂蚁属性体 1.0 s 及 1.5 s 等时切片(图 5),图中灰色线条代表断裂痕迹,颜色越深断裂可信度越高。

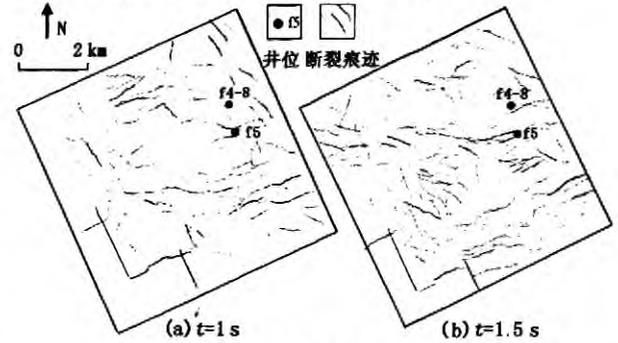


图 5 蚂蚁追踪属性体等时切片

Fig. 5 Isochronal slices of ant tracking attribute volume

从蚂蚁追踪属性体 1 s 等时切片(图 5(a))可以看出,黄珏南地区主要发育北东东向及近东西向两组断裂。北东东向断裂主要发育在研究区北部及东南部,近东西向断裂在全区均有分布,研究区中部断裂相对较少。随着深度变大,到 1.5 s 等时切片(图 5(b))研究区断裂发育明显增多,特别是中部地区,开始有北西向断裂发育,此深度断裂走向主要以北西西向为主,在南部边界见较多北东东向断裂发育。通过对这一系列不同等时切片的对比分析可以了解到不同深度范围内断裂发育规律的差异性。由于构造形迹和断裂展布特征反映了应力场的方向,通过一系列等时切片上断裂展布的变化还可以确定不同时期应力场方向的变化,进而指导断裂成因机制的研究。

#### 4.2 蚂蚁属性体剖面解释

通过蚂蚁追踪技术得到的属性体可以用于剖面上断裂系统的解释(图 6)。在蚂蚁追踪属性体剖面中可以清晰地反映断裂的发育位置及倾向等要素,对于垂向延伸较深的大断裂,需要结合人工干预进行断层组合。通过与原始地震剖面的对比分析可以看出,在原始地震剖面中具有较明显显示的大断裂在蚂蚁追踪剖面中都可以清晰追踪,而对于在原始剖面中肉眼难以识别的一些小断裂在蚂蚁追踪剖面中也都有反映,其形态和展布也比较清晰直观。地震剖面上深部反射凌乱的区域,在蚂蚁追踪属性体剖面中显示也比较杂乱无规律,对这些区域的灰色线条就不能当作断裂来处理,因此在应用蚂蚁追踪技术进行断裂解释过程中要剔除这些假象。

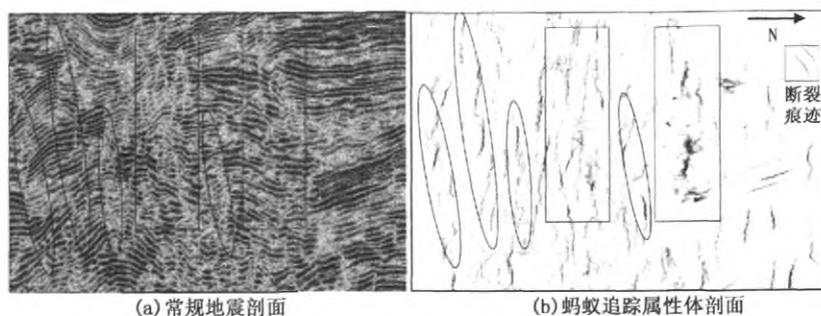


图6 常规地震剖面与蚂蚁追踪属性体剖面对比(360inline)

Fig. 6 Comparison between sections in conventional seismic data and ant tracking attribute volume(360inline)

### 5 三维断片系统分析

#### 5.1 三维断片筛选及定量统计

通过剔除黄珏南地区三维断片系统中由于噪声影响产生的断片假象及对部分断片进行重新组合,最终获得一个与地震数据匹配良好的三维断片系统。将三维断片系统与地震剖面进行叠合(图7(a))可以直观地展示断裂的展布特征。从图中可

以清晰地看出研究区断层的平面展布主要以近东西向为主,倾向主要为北倾,剖面上主要以阶梯状断层组合样式为主。通过与地震解释层位的交会(图7(b))还可以清晰地看出地层的连通情况。通过对提取的三维断片系统进行定向及定量统计也可以帮助了解研究区的断裂发育规律。通过主要断裂倾向分布直方图可以看出黄珏南地区断裂倾向以北倾为主,断裂倾角一般大于45°,主要发育高角度断裂。

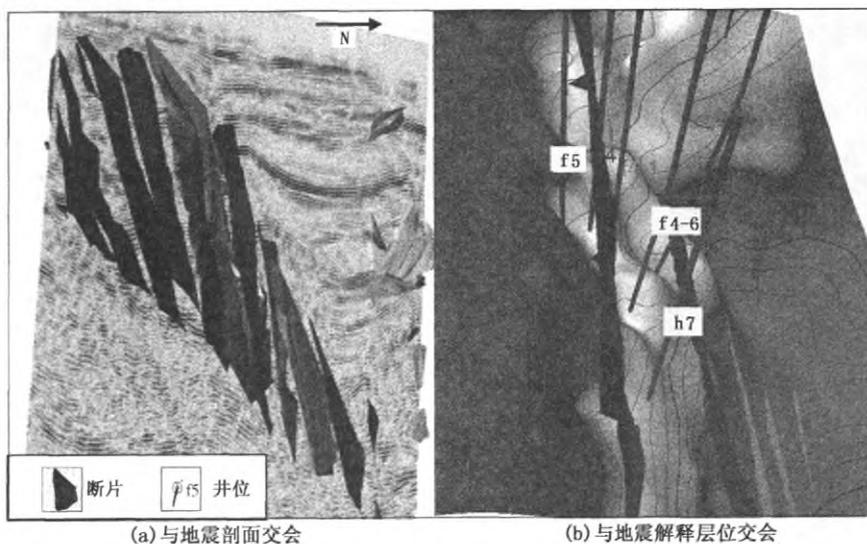


图7 三维断片系统与地震剖面及地震解释层位交会图

Fig. 7 Three-dimensional fault system cross-plot with seismic section and seismic interpretation horizons

#### 5.2 断裂自动解释方案与人工解释方案的对比

通过蚂蚁追踪提取的三维断片系统还可以直接转为断裂解释方案用于地震资料的解释。以黄珏南 Inline420线(图8)为例,最底部断层为真1断层,上部发育的真2断层与真2断层构成“Y”字形断层组合样式,真2断层与真1断层之间自剖面左端向右

依次发育了9条北倾的阶梯状断层,蚂蚁追踪解释的断层无论是在形态还是规模上都与人工解释方案基本一致,仅在局部地区有部分小断裂的解释不同,因此可以认为利用蚂蚁追踪技术自动提取断层可以直接应用于地震资料的解释,从而减少人为因素对断裂解释的影响,缩短解释时间,提高解释精度。

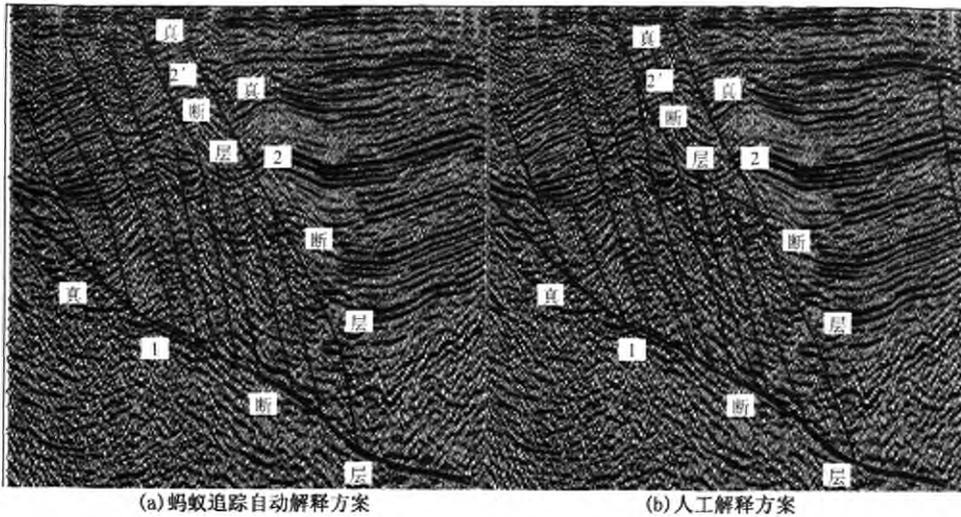


图 8 蚂蚁追踪自动解释方案与人工解释方案对比(Inline 420)

Fig.8 Comparison between automatic interpretation program using ant tracking technology and manual interpretation program(Inline420)

### 6 蚂蚁追踪断裂系统用于构造成因机制研究

对于低级序断裂构造成因机制的研究首先要确定古应力场的方向,而古应力场方向主要根据构造形迹及主要断裂发育方向来确定<sup>[14-15]</sup>,因此常规构造成因机制的研究必须要在研究区的精细地震资料解释的基础上进行,具有明显的滞后性。而通过蚂蚁追踪技术快速获得研究区的断裂展布特征之后就可以确定古应力场的方向进而进行构造成因机制的研究,并将研究结果应用于地震资料的解释过程中。

黄珏南地区主要目的层埋深在约 1.5 s 处,通过 1.5 s 等时切片可以看出该区主要发育北西西向及北东东向两组断裂,根据实际地质情况两组共轭剪切断裂的钝角平分线的方向指示张应力的作用方向,确定阜宁期最小主应力方向为近南北向,依此为基础进行应力场数值模拟(图 9,正值代表左旋),显示黄珏南地区阜宁期存在两个最小主应力高值区及两组共轭的最大剪应力,根据最小主应力的分布可以确定主要断裂发育区,根据剪应力的方向可以确定两组断裂的组合特征,研究区西部右旋剪应力下易产生一组北东东向右行断裂组合,而在东部左旋下易产生一组北西西向左行断裂组合,这与蚂蚁追踪解释的两组主要断裂的发育规律相吻合,因此认为这两组低级序断裂是在张应力和剪应力的共同作用下产生的,并可以将此结果应用于断裂的平面解释。

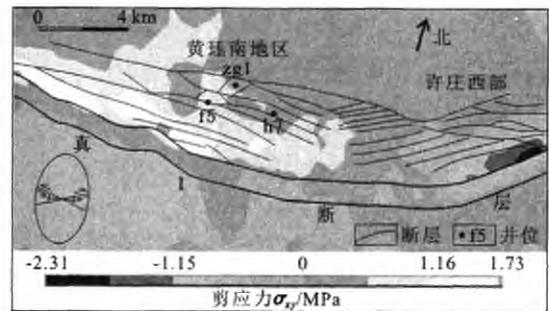


图 9 阜宁期断层发育与剪应力关系

Fig.9 Relation between fault grow and shear stress in Funing sedimentary period

### 7 结 论

(1)应用不同的地震属性处理技术对地震反射不连续性进行检测得到相应地震属性体,并在其基础上进行蚂蚁追踪得到的蚂蚁属性体差别较大,其中以在方差属性体基础上进行蚂蚁追踪得到的蚂蚁属性体效果最优,断裂显示更清晰直观。

(2)利用蚂蚁追踪技术得到的蚂蚁属性体可以很好地应用于断裂的平面及剖面解释,断裂解释结果与根据成因机制预测的断裂发育规律基本一致,解释结果可信,但应用时要注意一些断裂假象的剔除。

(3)通过提取的黄珏南地区三维断片系统可以直观形象地展示断裂发育形态。黄珏南地区断裂的平面展布主要为北西西及近东西走向;剖面上主要以阶梯状及“Y”字型断层组合为主,倾向北倾,断裂倾角较大,一般大于 45°。

## 参考文献:

- [1] 张进铎. 地震解释技术现状及发展趋势[J]. 地球物理学进展, 2006, 21(2): 578-587.  
ZHANG Jin-duo. Present status and future trend of seismic data interpretation techniques[J]. Progress in Geophysics, 2006, 21(2): 578-587.
- [2] 赵庆国, 赵华, 湛林福, 等. 虚拟现实技术在石油勘探中的应用[J]. 石油大学学报: 自然科学版, 2005, 29(1): 30-33.  
ZHAO Qing-guo, ZHAO Hua, ZHAN Lin-fu, et al. Application of virtual reality technology in petroleum exploration[J]. Journal of the University of Petroleum, China( Edition of Natural Science), 2005, 29(1): 30-33.
- [3] 祝靛谊. 油气勘探综合地球物理研究方法综述[J]. 地球物理学进展, 2003, 18(1): 19-23.  
ZHU Jing-yi. Overview of integrated geophysics of oil & gas exploration [J]. Progress In Geophysics, 2003, 18(1): 19-23.
- [4] 王大伟, 刘震, 陈小宏, 等. 地震相干技术的进展及其在油气勘探中的应用[J]. 地质科技情报, 2005, 24(2): 71-76.  
WANG Da-wei, LIU Zhen, CHEN Xiao-hong, et al. Progress of seismic coherence and its application to petroleum exploration[J]. Geological Science and Technology Information, 2005, 24(2): 71-76.
- [5] 孙夕平, 杜世通. 相干体技术算法研究及其在地震资料解释中的应用[J]. 石油大学学报: 自然科学版, 2003, 27(2): 32-35.  
SUN Xi-ping, DU Shi-tong. Development and application of algorithm of coherency cub technique to seismic interpretation[J]. Journal of the University of Petroleum, China( Edition of Natural Science), 2003, 27(2): 32-35.
- [6] FRANCISCO J Varela, PAUL Bourguine. Toward a practice of autonomous systems: Proceeding of the First European Conference on Artificial Life[C]. Paris: Elsevier, 1991.
- [7] 段海滨, 王道波, 朱家强, 等. 蚁群算法理论及应用研究的进展[J]. 控制与决策, 2004, 19(12): 1321-1325.  
DUAN Hai-bin, WANG Dao-bo, ZHU Jia-qiang, et al. Development on ant colony algorithm theory and its application[J]. Control and Decision, 2004, 19(12): 1321-1325.
- [8] 张纪会, 徐心和. 一种新的进化算法——蚁群算法[J]. 系统工程理论与实践, 1999, 19(3): 84-87.  
ZHANG Ji-hui, XU Xin-he. A new evolutionary algorithm ant colony algorithm[J]. Systems Engineering Theory & Practice, 1999, 19(3): 84-87.
- [9] 唐琪凌, 苏波, 王迪, 等. 蚂蚁算法在断裂系统解释中的应用[J]. 特种油气藏, 2009, 16(6): 30-33.  
TANG Qi-ling, SU Bo, WANG Di, et al. Application of ant colony algorithm in fault system interpretation [J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2009, 16(6): 30-33.
- [10] DORIGO M, GAMBARDELLA L M. Ant colony system: acooperative learning approach to the traveling salesman problem [J]. IEEE Trans on Evolutionary Computation, 1997, 1(1): 53-66.
- [11] 朱成宏, 黄国寿, 秦瞳. 断裂系统精细分析技术[J]. 石油物探, 2002, 41(1): 42-48.  
ZHU Cheng-hong, HUANG Guo-qian, QIN Tong. Methods for detailed fracture system description [J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2002, 41(1): 42-48.
- [12] RANDEN T, PEDERSEN S I, SONNELAND L. Automatic extraction of fault surfaces from three-dimensional seismic data[J]. Expanded Abstr, Int Mtg, Soc Exploration Geophys, 2001, 20(3): 551-554.
- [13] 吴有信, 方含珍. 相干体与方差体技术在全三维地震资料解释中的应用[J]. 安徽地质, 2006, 16(1): 47-51.  
WU You-xin, FANG Han-zhen. Application of the technology of relevance coherence cube and variance cube in interpretation of full 3D seismic data [J]. Geology of Anhui, 2006, 16(1): 47-51.
- [14] 王军, 戴俊生, 冯建伟. 乌夏断裂带二叠系火山岩-碎屑岩混杂地层裂缝预测[J]. 中国石油大学学报: 自然科学版, 2010, 34(4): 19-24.  
WANG Jun, DAI Jun-sheng, FENG Jian-wei. Fracture prediction of Permian volcanic-elastic rock formation in Wuxia fault belt [J]. Journal of China University of Petroleum( Edition of Natural Science), 2010, 34(4): 19-24.
- [15] 张仲培, 王清晨. 断层滑动分析与古应力恢复研究综述[J]. 地球科学进展, 2004, 19(4): 605-611.  
ZHANG Zhong-pei, WANG Qing-chen. The summary and comment on fault-slip analysis and palaeostress reconstruction [J]. Advance in Earth Sciences, 2004, 19(4): 605-611.

(编辑 徐会永)