

doi: 10.11720/wtyht.2023.2579

刘军, 黄超, 杨林, 等. 顺北地区碳酸盐岩断控缝洞体油气产能量化估算技术[J]. 物探与化探, 2023, 47(3): 747-756. <http://doi.org/10.11720/wtyht.2023.2579>

Liu J, Huang C, Yang L, et al. Quantitative prediction technology for the hydrocarbon production capacity of fractures and vugs in fault-controlled carbonate reservoirs in the Shunbei area[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2023, 47(3): 747-756. <http://doi.org/10.11720/wtyht.2023.2579>

# 顺北地区碳酸盐岩断控缝洞体油气 产能量化估算技术

刘军<sup>1,2</sup>, 黄超<sup>2</sup>, 杨林<sup>2</sup>, 张永升<sup>2</sup>, 查明<sup>1</sup>

(1. 中国石油大学(华东)地球科学与技术学院, 山东 青岛 266580; 2. 中石化西北油田分公司勘探开发研究院, 新疆 乌鲁木齐 830011)

**摘要:** 走滑断裂带及其控制的缝洞体是顺北地区奥陶系新的勘探领域, 探索断控缝洞体储层单井产量多属性量化预测技术, 为顺北地区断裂带井位部署与井轨迹优选提供科学依据和技术支撑。断控缝洞体储层中, 断裂是油气运移通道, 其纵向延伸和宽度是断裂的通源性, 主干断裂与次级断裂平面交汇结构表征断裂的汇聚性, 通源性和汇聚性表征成藏断裂特征。断控缝洞体中缝洞是储集空间的主体, 断控缝洞体储层规模和断裂裂缝分布密度表征缝洞特征。断控缝洞体储层的单井产量既与断裂特征有关, 更与缝洞特征有关。因此, 量化的断裂特征和缝洞特征是单井产量量化预测的基础。地震数据及其多种属性的断层精细解释, 量化后得到断裂特征值。结构张量属性圈定断控缝洞体储层范围, 异常体振幅属性表征缝洞的分布及其体量, 最大似然概率属性表征断裂裂缝分布密度, 3 种属性融合得到缝洞特征值。最后将量化的断裂特征值和缝洞特征值融合为断控缝洞体特征值, 与实测钻井的年产液量进行统计分析, 得到年产液量与断控缝洞体特征值的统计关系式, 实现断控缝洞体储层单井产量的量化预测。

**关键词:** 断控缝洞体储层; 断裂特征; 缝洞特征; 断控缝洞体特征; 单井产量量化预测; 异常体分解; 结构张量; 最大似然概率

中图分类号: P631.4

文献标识码: A

文章编号: 1000-8918(2023)03-0747-10

## 0 引言

走滑断裂带及其控制的缝洞体形成了碳酸盐岩一种特有的断控缝洞体油气圈闭, 在塔里木盆地深部碳酸盐岩油气藏的勘探开发中具有重要意义<sup>[1-2]</sup>。断控缝洞体圈闭成为顺北地区奥陶系新的勘探领域, 已取得重大的油气突破。近期, 重点探井顺北 42X 井获高产工业油气流, 日产气 82.2 万 m<sup>3</sup>、日产油 300 t, 油气当量近千吨。

顺北油气田为超深油藏, 深度在 7 300 m 以下, 目前超过 8 000 m 的钻井有 40 口, 是亚洲最深商业开发油气田。因此, 开展地下 8 000 m 断裂带立体

特征的精细刻画与储集体含油气性预测, 强化规模储集体预测与目标评价, 深化油藏特征与富集规律认识, 优化井轨迹设计, 努力实现少井高产, 是地震预测的艰巨任务和目标。

当前, 对断控缝洞体储层的地震预测技术研究取得不少进展。吴涛等<sup>[3]</sup>以塔河油田托普台北为例研究了走滑断裂对碳酸盐岩断控缝洞体油藏形成的控制作用; 马乃拜等<sup>[4]</sup>依据塔里木盆地顺北地区断控缝洞体特征, 进行了地震反射特征与识别的正演模拟研究; 王震等<sup>[5]</sup>对塔河油田碳酸盐岩断溶体的刻画技术取得了新的认识, 用结构张量取代精细相干、蚂蚁体等属性, 用于刻画断溶体的轮廓。李鹏飞等<sup>[6]</sup>综合利用 GeoEast 解释系统中的构造解释、

收稿日期: 2022-02-22; 修回日期: 2023-01-31

基金项目: 中国石化重点科技项目“超深层碳酸盐岩地震关键技术研究与应用”(P21071)

第一作者: 刘军(1982-), 男, 2005 年获中国石油大学(华东)信息与计算科学专业学士学位, 2009 年获该校地球探测与信息技术专业硕士学位, 目前该校博士在读, 主要从事石油物探综合研究工作。Email: 408842381@qq.com

储层预测和地震属性融合等技术对塔北地区某区块进行断溶体描述与精细刻画研究;徐红霞等<sup>[7]</sup>利用 GeoEast 系统在塔北地区开展断溶体多属性预测。

20 世纪 90 年代,亿吨级塔河油田的发现,开启了碳酸盐岩缝洞储集体的地震预测方法技术的发展。唐文榜、姚姚等<sup>[8-9]</sup>指出充填流体溶洞可以形成强反射,后来被业内学者形象地称之为串珠;刘坤岩等<sup>[10]</sup>对塔河奥陶系隐蔽溶洞体进行地震精细识别;王晓梅、孙海宁等<sup>[11-12]</sup>提出用反演低波阻抗和 AVO 分析同时提取的强纵波和强横波振幅用于预测溶洞充填流体。李宗杰、樊佳方等<sup>[13-14]</sup>深化了缝洞体及其含油气性的预测,采用频率特征差异提取异常体属性表征洞穴的体量,基于频谱特征差异开展缝洞储集体中的油水识别与预测。与此同时,许多专家采用基于分频相干体的蚂蚁追踪技术、地震数据结构张量相干分析技术等开展裂缝预测、不同尺度裂缝预测断裂系统的精细分析和刻画<sup>[15-21]</sup>。

实现断控缝洞体储层单井产量的量化预测是油田勘探开发的现实需要,前期对断控缝洞体储层的研究和历年来对碳酸盐岩缝洞型储集体的预测研究为断控缝洞体储层单井产量的量化预测奠定了基础。断控缝洞体储层单井产量既与断裂纵向延伸和横向延展有关,更与断控缝洞体规模、断裂裂缝分布密度、缝洞储集体的体量有关。充分利用现有地震断裂解释技术,进行断裂的精细解释,得到表征断裂通源性和汇聚性等成藏断裂特征;利用异常体振幅属性、结构张量属性和最大似然概率属性等 3 种属性分析技术,用以表征断控缝洞体储层规模和断裂裂隙分布密度,即为缝洞特征。对断裂特征值和缝洞特征进行量化处理并加以融合,得到断控缝洞体特征值,将其与实际钻井的年产液量进行统计分析,得到年产液量与断控缝洞体特征值的统计关系式,即可用于断控缝洞体储层单井产量在一定精度范围内的量化预测。

## 1 断控缝洞体储层基本特征

断控缝洞体是碳酸盐岩特有的一种圈闭类型,为受多期次构造作用,沿深断裂带发育的局部脆性灰岩破碎带缝洞系统,在上覆泥灰岩、泥岩等盖层封堵以及侧向致密灰岩遮挡下,形成一种不规则断控缝洞体圈闭类型<sup>[5]</sup>。大型断裂带是油气疏导的有利通道,缝洞系统是油气富集成藏的有力空间,不同级次走滑断裂的变形样式和缝洞发育程度,控制了

断控缝洞体油藏的空间分布及油藏形态,构成了一种与传统砂岩层状介质油藏完全不同的油藏类型。

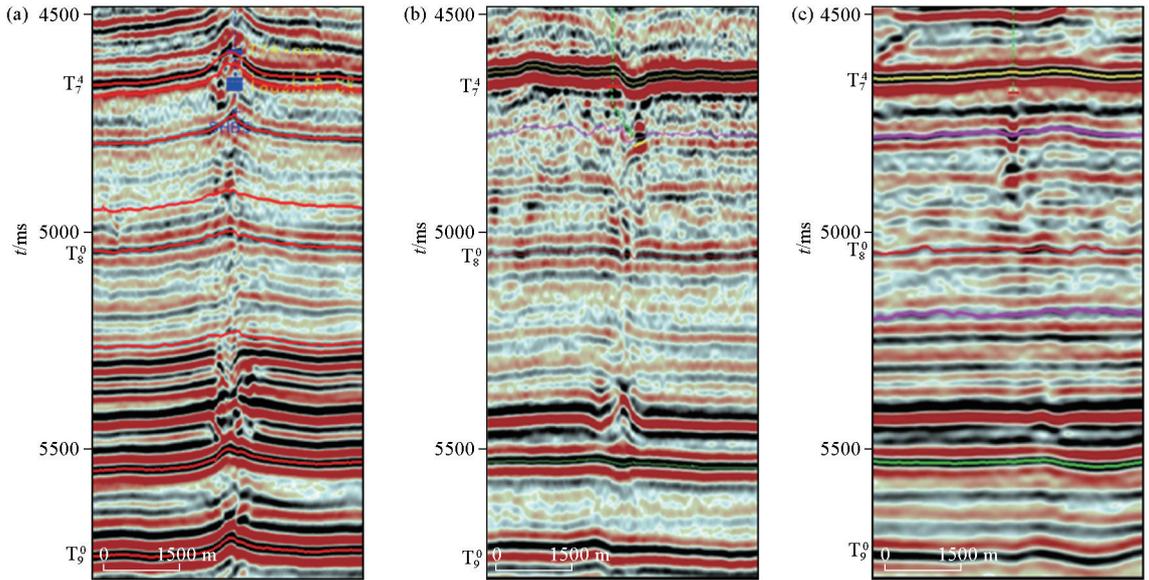
钻井、岩心、成像测井等资料综合分析表明,顺北地区奥陶系储层类型为沿深大断裂发育的裂缝—洞穴型储层,储集空间类型可划分为洞穴、孔洞、裂缝。首先,碳酸盐岩断控缝洞体储层,既有大、中、小型断裂裂缝,也有沿大断裂分布的大小洞穴、孔洞。洞穴是储集空间的主体,大型断层和断裂裂缝是将储集空间与源岩沟通的油气运移通道。其次,断控缝洞体储层中断裂、断层的纵向延伸和横向延展直接关系到储集体与油源的沟通和汇聚;断裂类型及沿断裂分布的缝洞体等储集空间的体量决定了富集成藏规模;断裂裂缝分布密度同时决定了缝洞的连通性及油气产出能力的大小。储层的规模由大型洞穴的体量和油藏富集程度两大因素决定,断裂裂缝连通储集体产出能力强。所以,研究断裂分布特征和缝洞的体量和分布特征,将其加以量化,进行单井产量量化预测,得到断控缝洞体储层中的高产区分布特征,指导碳酸盐岩断控缝洞体油气藏规模储层预测,提高钻井成功率。

### 1.1 表征通源性和汇聚性的断裂特征

通源性和汇聚性是断控缝洞体成藏的断裂特征,在单井产量预测中,起到控制作用。

1) 断裂的通源性。顺北地区断控缝洞体储层中的大型断裂按成因可分为挤压、拉分和平移 3 种类型。图 1 给出了挤压、拉分和平移 3 种类型断裂的地震反射特征:①挤压式:正花状断裂、能量强、断裂带宽度大,从浅到深的纵向延伸度大,形成良好的连通性;②拉分式:负花状断裂、能量弱、错断明显,纵向延伸度也很大,断裂带宽度也较大,加上拉张力的作用可形成较大空隙,具有良好的连通性;③平移式:以线性异常出现在平面图上,断裂带宽度小,连通性中等。

根据断裂规模将断裂细分为五类:主干 1 级、主干 2 级、分支、次级(包括褶曲)、隐伏断裂。在地震数据上采用断裂精细解释与最大似然概率属性等多属性分析相结合的方法,对断裂进行精细解释,确定出主干断裂,分支断裂,并进行平面分段的活动期次的厘定。同时加强小断裂的多属性识别与描述,在用相干属性和趋势面识别较大尺度断裂基础上,联合振幅变化率、曲率、AFE、倾角、蚂蚁及照明属性,以及 AFE 属性与能量类属性联合对低序级断裂进行识别,确定断裂的纵向延伸、横向延展、断裂带的规模。



a—挤压断裂; b—拉分断裂; c—平移断裂

a—compressional fault; b—pull-apart fault; c—translation fault

图 1 断溶体储层中不同类型断裂特征的地震响应特征

Fig. 1 Seismic response characteristics of different fault types

钻井资料分析表明, 挤压和拉分式断裂是组成主干断裂的主要类型, 这两类断裂的断裂带宽度大、纵向延伸度大, 是良好的通道。顺北地区寒武系之下(即  $T_8^0$  反射之下) 存在深部油源, 若断裂向深部延伸穿至震旦系(即  $T_9^0$  反射之下), 表示该断裂具有良好通源性。

2) 断裂的汇聚性。顺北地区存在大小断裂相交的平面结构特征, 使更大范围的油气汇聚在相交部位。图 2 展示的顺北 1 号断裂为 NE 向主干断裂, 有 7 条 NNE 向分支断裂和 1 条 NNW 向分支断裂与其相交, 形成断裂的平面结构特征。断裂彼此相交, 表示不仅有深部油源通向于此, 还有横向更大

范围的油源在此汇聚, 从而形成富集区。除了主干断裂和分支断裂相交之外, 还可见到主干断裂有与多条平行小断裂相交的情况, 如 3 号断裂。

综上所述, 断裂的规模和纵向延伸表示断控缝洞体储层内部具有良好的通源性, 断裂的平面交叉结构特征表示断控缝洞体储层具有更大范围的油气汇聚性。通源性和汇聚性是断控缝洞体储层富集的重要条件。

### 1.2 表征断控缝洞体规模和缝洞体体量的缝洞特征

断控缝洞体规模和缝洞体体量等缝洞特征是成藏的空间条件。选择结构张量、异常体振幅、最大似然概率 3 种属性来表征断控缝洞体储层规模、缝洞

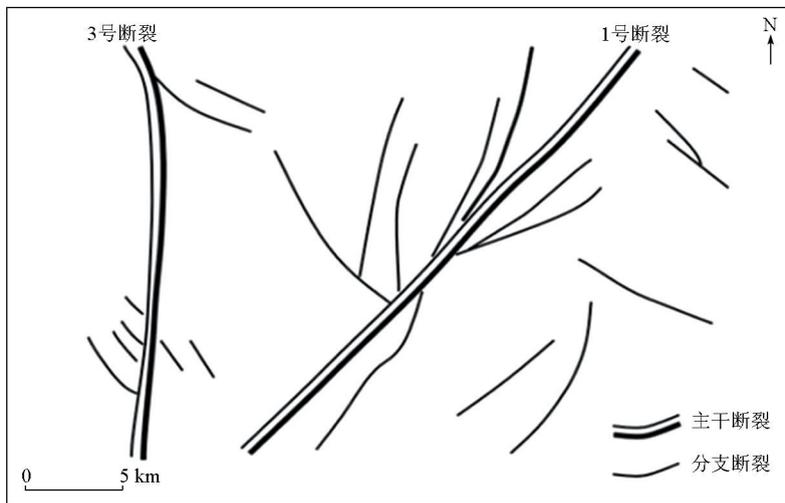


图 2 断裂平面相交的结构特征

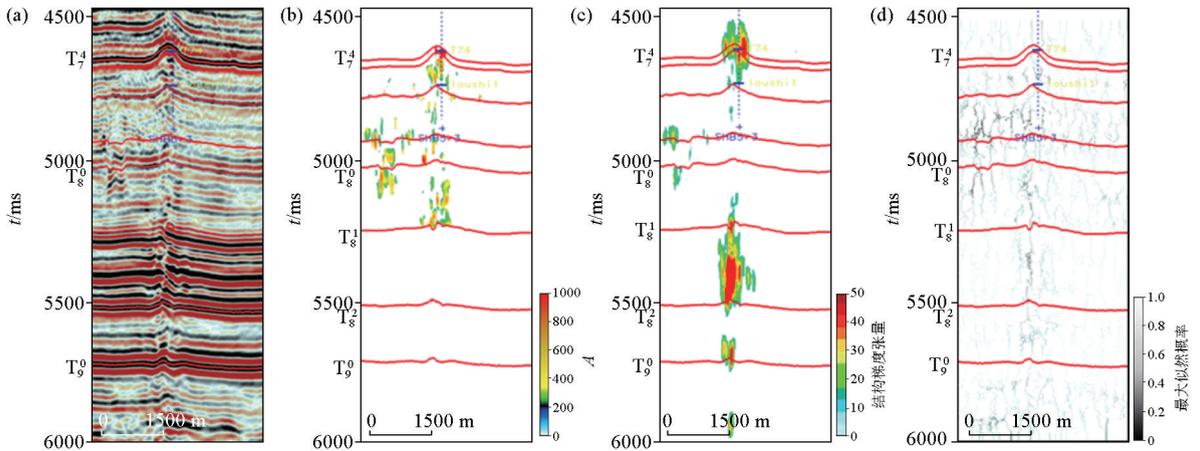
Fig. 2 Structural characteristics plane of intersecting fracture

体体量和断裂分布密度。

结构张量属性与钻时变化相结合已经用于确定断控缝洞体边界,圈定断控缝洞体储层有利范围和规模<sup>[5]</sup>。异常体分解技术是一种从层状反射波场中提取纵、横向尺度有限、非均匀分布的非规则洞穴反射波场的技术,异常体振幅属性可以表征洞穴的体量<sup>[14]</sup>。图3为偏移剖面及相应的异常体振幅属性、结构张量属性和最大似然概率属性剖面,图4是不同层位的异常体、结构梯度张量和最大似然概率3种属性平面。

从图3和图4可以看到:结构张量属性具有成片分布特征,描述了断控缝洞体有利储层的分布范围和规模;最大似然概率属性以非规则线状特征表

示大小断裂的分布,反映了缝洞体之外的断裂裂缝的细节,使偏移剖面上出现的断裂更加清晰,可提高地震断裂解释的精度,也可表示断裂裂缝分布密度。异常体振幅属性则表征单个尺度较大洞穴,这些洞穴随机分散分布或沿大断裂纵向分布,从图3可见异常体表证的洞穴主要分布在奥陶侵蚀面( $T_7^4$ 之下)至寒武系中部( $T_8^2$ 之上)。3种属性从不同侧面描绘出断控缝洞体储层的范围和内部结构,它们分别反映了断控缝洞体整体分布特征(包括断裂的尺度特征),大小断裂和洞穴的分布和断裂裂缝分布密度的特征;既反映了通源性、汇聚性等特征,也反映了富集成藏的条件。

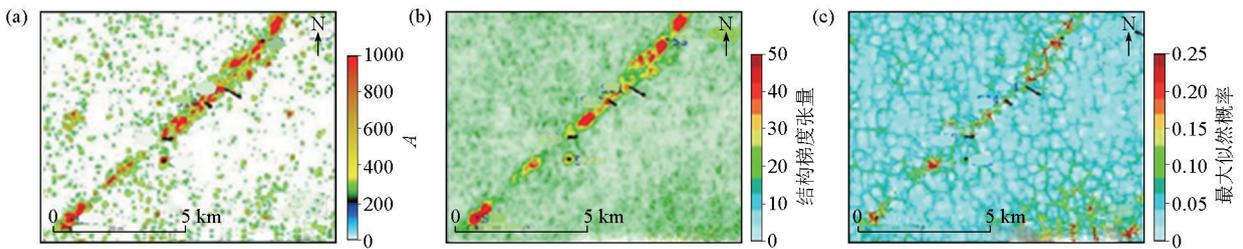


a—偏移剖面;b—异常体振幅属性剖面;c—结构梯度张量属性剖面;d—最大似然概率属性剖面

a—migration;b—abnormal body amplitude attribute;c—structural gradient tensor attribute;d—maximum likelihood probability attribute

图3 偏移剖面及其3种属性剖面

Fig. 3 The migration and its three attributes section



a— $T_7^6$ - $T_7^8$ 异常体振幅属性;b— $T_7^6$ - $T_7^8$ 结构梯度张量属性;c— $T_7^6$ - $T_7^8$ 最大似然概率属性

a— $T_7^6$ - $T_7^8$  abnormal body amplitude attribute;b— $T_7^6$ - $T_7^8$  structural gradient tensor attribute;c— $T_7^6$ - $T_7^8$  maximum likelihood probability attribute

图4 不同层位异常体振幅、结构梯度张量和最大似然概率3种属性平面

Fig. 4 Plans of attributes of abnormal body amplitude, structural gradient tensor and maximum likelihood probability at different horizons

## 2 断控缝洞体储层基本特征的量化表征

将通过精细地震断裂解释用以表征断裂通源性和汇聚性(“二性”)的特征称之为断裂特征,将异常体振幅、结构梯度张量和最大似然概率3种地震属

性(“三属性”)描述的断控缝洞体储层规模、储集空间体量、断裂裂缝分布密度的特征称之为缝洞特征。断裂特征和缝洞特征可作为断控缝洞体储层油藏富集程度和富集区分布范围的量化分析基础。将断控缝洞体储层中由“二性”表示的断裂特征和由“三属性”表征的缝洞特征量化之后融合为断控缝洞体特

征值,将其与单井产量进行统计分析,得到单井产量与断控缝洞体特征值的统计关系式,实现量化预测。

### 2.1 断裂特征的量化分析

图5和图6为典型的高产井的剖面属性和平面属性。图5是过高产井的偏移剖面及其异常体属性、结构梯度张量属性和最大似然属性剖面,偏移剖面 and 最大似然属性展示出井旁有一条断裂向深部延伸到  $T_9^0$  之下,表明此断层沟通了深部油源,成为深

部油源运移通道。结构梯度张量属性圈定的断控缝洞体向下延伸到  $T_9^0$  之下,表明断控缝洞体储层是下延伸到  $T_9^0$  之下的大型断控缝洞体储层。异常体属性表示在  $T_7^4$  之下和  $T_8^1$  和  $T_8^2$  之间存在多个大型洞穴,具有良好的储集空间。

图6是顺北1区  $T_7^4 \sim T_7^4 + 500$  ms 时窗范围内的异常体属性切片。图中有一 NE 向主干断裂,该主干断裂的东北段存在大小不等的分支断裂。沿主

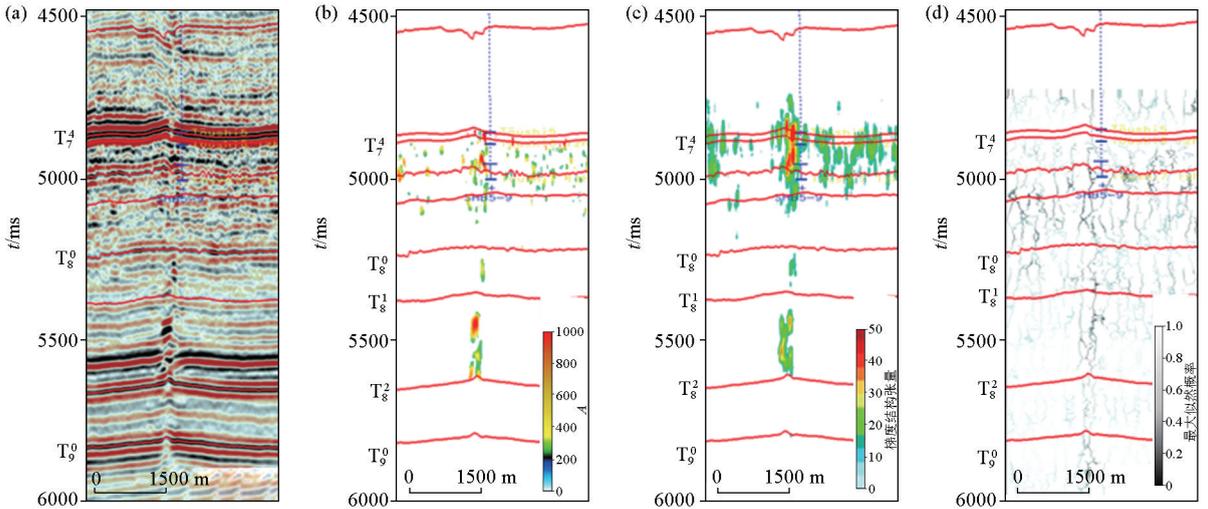


图5 过高产井的偏移剖面(a)、异常体振幅属性(b)、结构梯度张量属性(c)、最大似然概率属性(d)剖面  
Fig. 5 Sections of migration (a), abnormal body amplitude attribute (b), structural gradient tensor attribute (c), maximum likelihood probability attribute (d) across a high productivity well

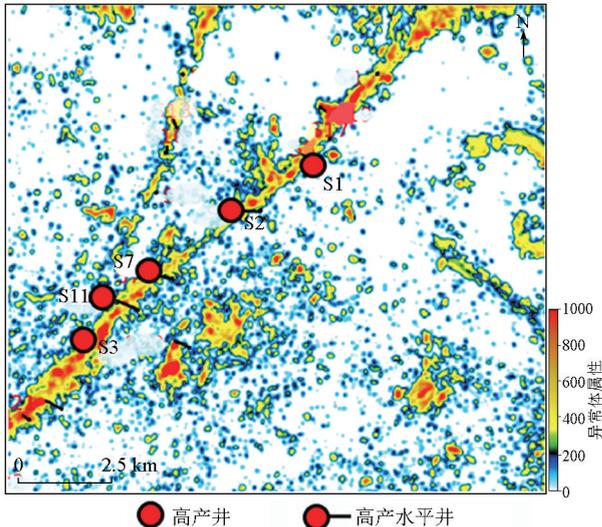


图6 主干断裂和分支断裂交汇部位的高产井  
Fig. 6 High-productivity wells at the intersection of main and branch faults

干断裂钻有多口井,其中高产井 S3、S7、S11、S2、S1 在分支断裂与主干断裂的交汇部位。说明主干断裂与分支断裂的交汇部位具有良好的油气汇聚性,有利于油气富集成藏。

将断裂的通源性量化为  $A_1$ , 汇聚性量化为  $A_2$ , 将二者之和定义为断裂特征值  $A$  :

$$A = A_1 + A_2, \quad (1)$$

式中通源性数值  $A_1$  和汇聚性数值  $A_2$  都可以分为两级。断裂的纵向延伸深度在  $T_9^0$  以下的  $A_1$  为 I 级, 延伸深度在  $T_9^0$  以上的  $A_1$  为 II 级; 主干断裂与分支断裂的交汇部位的  $A_2$  为 I 级, 无分支断裂交汇部位的  $A_2$  则为 II 级。将 I 级赋值为 0.5, II 级赋值为 0, 于是断裂特征值取值为 0、0.5 或 1.0。A 值大表示有利于形成高产储层。表 1 给出了通源性值  $A_1$  和汇聚特征值  $A_2$  的量化分级数值。

表 1 断裂的通源性和汇聚性的量化分级

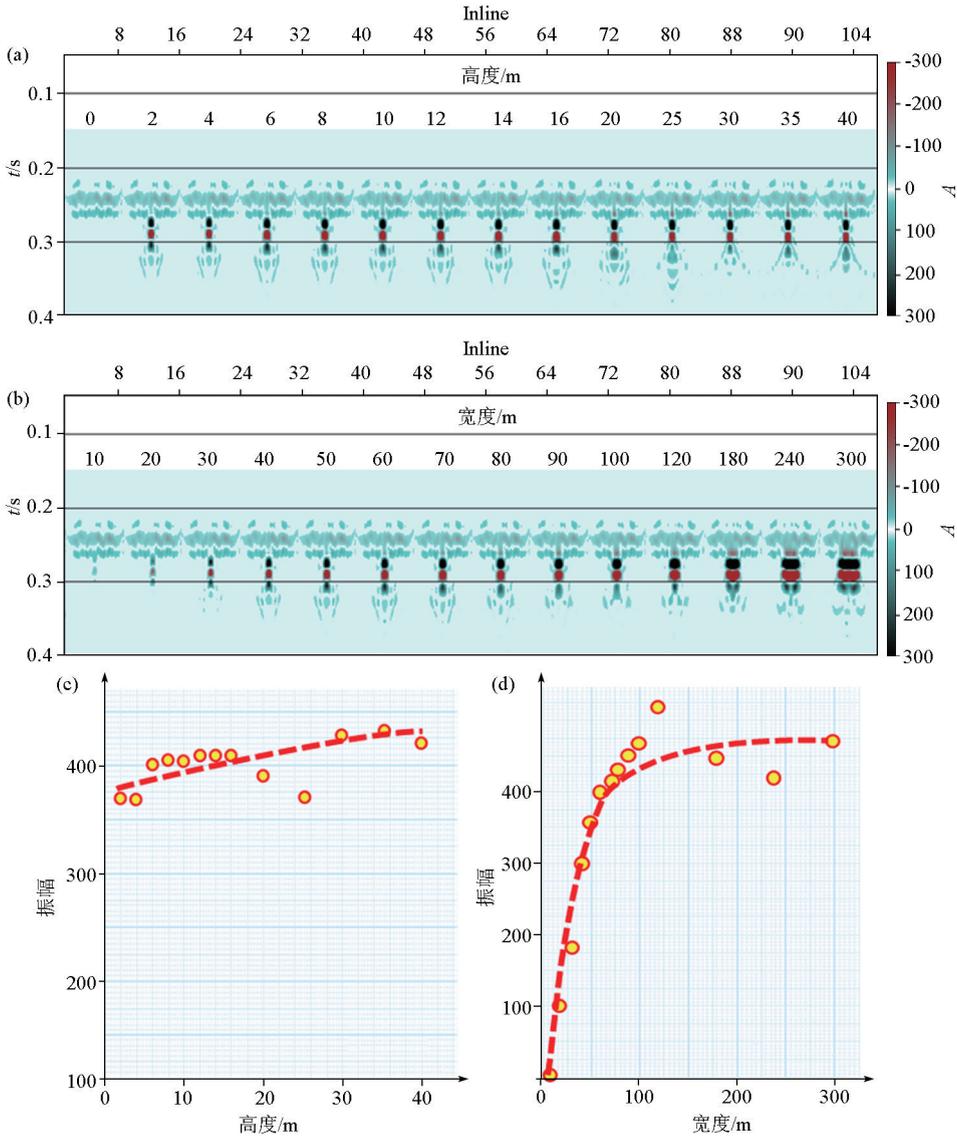
Table 1 Quantitative classification of nature to communicate oil sources and nature to convergence more oil sources

断裂特征	断裂通源性 $A_1$		断裂汇聚性 $A_2$	
	延伸至 $T_9^0$ 以下(I)	延伸至 $T_9^0$ 以上(II)	主干+分支交汇部位(I)	仅有主干断裂(II)
量化值	0.5	0	0.5	0

### 2.2 缝洞体特征的量化

断控缝洞体储层中,断裂裂缝是运移通道,也是储集空间,洞穴则是储集空间的主体,因此洞穴的体量是确定断控缝洞体储集空间体量的关键。

为说明异常体振幅属性值大小用以表征洞穴体量的大小,进行了正演模拟分析(图7)。图7a是宽



a—宽度 60 m、高度 0~40 m 洞穴正演模拟偏移剖面; b—高度 6 m、宽度 10~300 m 洞穴正演模拟偏移剖面; c—宽度 60 m、高度 0~40 m 洞穴串珠振幅变化曲线; d—高度 6 m、宽度 10~300 m 洞穴串珠振幅变化曲线

a—the cave forward modeling migration profile with a width of 60 m and a height of 0~40 m; b—the cave forward modeling migration profile with height of 6 m and width of 10~300 m; c—the amplitude variation curve of the beads with a width of 60 m and a height of 0~40 m; d—the amplitude variation curve of the beads with a height of 6 m and a width of 10~300 m

图 7 串珠振幅与高度和宽度相关关系的正演模拟

Fig. 7 Forward modeling of the correlation between the amplitude of beads and the height and width of caves

度为 60 m、高度为 0~40 m 的充填流体洞穴的正演模拟偏移剖面,洞穴形成了串珠状的短反射。图 7c 给出了串珠振幅与高度的关系曲线。可以看到:洞穴高度从 2 m 增高到 40 m,串珠的振幅随洞穴高度变化大致呈线性增大。图 7b 和 7d 分别是高度 6 m、宽度 10~300 m 的洞穴正演模拟偏移剖面及串珠的振幅随宽度变化曲线。可以看出串珠振幅总体上随宽度的变化分为两个区间:在宽度小于 100 m 范围内,振幅随宽度的加宽大体按线性增加,但在这一宽度范围内,串珠的宽度随洞穴宽度的加大变化很小;当宽度大于 100 m,随洞穴宽度的加

大,振幅则基本保持不变,但偏移剖面上串珠的宽度随洞穴宽度的加大而变宽。

模拟试验表明,洞穴高度增大时,串珠振幅与高度变化大体成正比。洞穴宽度增大时,宽度在 100 m 范围内串珠振幅与洞穴宽度变化成正比;洞穴宽度大于 100 m 时,虽然振幅不随洞穴宽度发生变化,但串珠宽度随洞穴宽度的加大而加大,对于一个完整串珠,串珠振幅之和会随洞穴加宽而加大,即串珠振幅之和与洞穴的体量(长、宽、高)的变化呈正相关关系。

由于断控缝洞体储层具有一定的空间体积,因此

用一定体积范围内的属性值,即体属性值,可以表示断控缝洞体储层规模。体属性值按下述步骤求取。

1) 对地震偏移数据体进行结构梯度张量、异常体分解和最大似然概率分析,得到结构张量、异常体振幅和最大似然概率 3 个属性数据体;

2) 在给定层位的每一个 CRP 上求取一定时窗的均方根属性值,得到该点一定厚度内的均方根属性值;

3) 以每一个 CRP 为中心的圆周内,求取圆内多个相邻 CRP 的均方根属性值之和,作为该中心点的属性值,即为该点的体属性值;

4) 将异常体振幅的体属性值记为  $B_1$ ,将结构梯度张量属性值记为  $B_2$ ,将最大似然概率属性值记为  $B_3$ ,求 3 种属性值  $B_1$ 、 $B_2$ 、 $B_3$  之和,得到复合属性  $B$ ,用以表征断控缝洞体储层的规模和断裂密度,称之为缝洞特征值:

$$B = B_1 + B_2 + B_3。 \quad (2)$$

表 2 16 口样本井年产液量  $SWOC$  与断控缝洞体特征值  $E_{FK}$  统计

Table 2 Annual fluid production  $SWOC$  and fault-controlled reservoirs features value  $E_{FK}$  of 16 sample wells were calculated

井名	单井年产液量 / t	断裂特征值			缝洞特征值	断控缝洞体特征值
	$SWOC$	$A_1$	$A_2$	$A$	$B$	$E_{FK} = (1 + A) \times B$
S1	77000	0.5	0.5	1	3484.184	6968.368
S2	54000	0.5	0.5	1	3546.903	7093.806
S3	42000			0	7605.866	7605.866
S4	27000	0.5	0	0.5	4052.342	6078.515
S5	25000			0	1985.622	1985.622
S6	24000			0	2696.085	2696.085
S7	24000			0	1354.254	1354.254
S8	22000			0	2408.270	2408.27
S9	21000			0	2810.141	2810.141
S10	21000			0	2207.304	2207.304
S11	19000			0	521.6	521.6
S12	18000			0	3565.860	3565.860
S13	12000			0	3936.628	3936.628
S14	7000			0	1609.080	1609.080
S15	5000			0	1503.801	1503.801
S16	1000			0	1406.6	1406.6

断裂特征值  $A$ 、缝洞特征值  $B$ ,以及由此计算出的断控缝洞体特征值  $E_{FK}$ 。

图 8 是单井年产液量  $SWOC$  与断控缝洞体特征值  $E_{FK}$  的变化趋势曲线,可以看到二者的数值变化有着相似的趋势。因此,将两种数值进行拟合得到图 9 所示的线性拟合曲线,其拟合关系式为

$$SWOC = 0.8366E_{FK} \times 895.48, \quad (4)$$

$SWOC$  与  $E_{FK}$  的拟合度接近 65%,即

$$R^2 = 0.6448。 \quad (5)$$

按照式(4),根据每一个点的断控缝洞体特征值  $E_{FK}$ ,即可估计出每一个点以年累计产液量表示的单井年产量  $SWOC$ ,实现断控缝洞体储层单井产量的量化预测。

## 2.3 断控缝洞体特征值

根据地震断裂精细解释结果得到的通源性和汇聚性,按照表 1 所给出的特征量化值得到断裂特征值  $A$ ,根据结构张量、异常体振幅和最大似然概率的体属性值按照式(2)计算得到表征断控缝洞体规模和断裂密度的缝洞特征值  $B$ ,即可按照式(3)得到断控缝洞体特征值  $E_{FK}$ :

$$E_{FK} = (1 + A) \times B。 \quad (3)$$

## 3 断控缝洞体储层单井产量量化预测

选择了单井年产液量作为产量指标与断控缝洞体特征值进行统计分析,得到产量指标与断溶体特征值之间相关关系。

### 3.1 单井年产液量的量化表达式

将断控缝洞体特征值与单井年累计产液量进行对比分析。表 2 列出了 16 口样本井单井年产液量、

### 3.2 断控缝洞体储层单井产量多属性量化预测使用

根据单井年产液量与断控缝洞体特征值的拟合曲线式(4),预测得到的顺北 1 区的单井年产液量,按年产液量划分出高产、中产和低产区域,高于 3 万 t 为高产区,低于 1 万 t 为低产区,介于二者之间为中产区。作出预测产量平面分布(图 10),图中展示出沿断控缝洞体(主要为主干断裂)的产量分布,色标的不同颜色表示不同的产量,红色表示高产区,橙色表示中产区,蓝色表示低产区。在图上同时标注出高产井、中产井和低产井。可以看到在顺北 1 区,1 号断裂带北段和中段产量较南段高。高产井主要集中在主干断裂北段与分支断裂交汇部位。

为清晰起见,将顺北 1 区实测与预测单井年累计产液量列于表 3 中。按照高、中、低三级划分的产

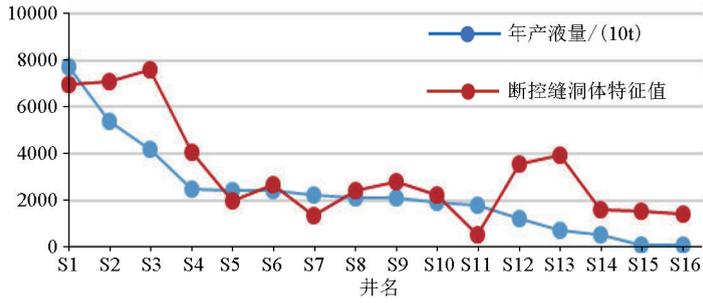


图 8 单井年产液量与断控缝洞体特征值变化趋势曲线

Fig. 8 Variation trend curve of single well annual fluid yield and fault-controlled reservoirs features value

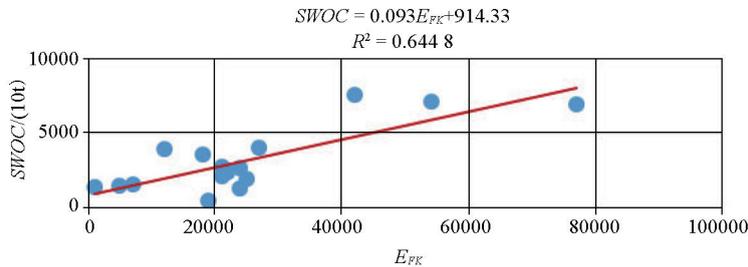


图 9 单井年产液量与断控缝洞体特征值的拟合关系曲线

Fig. 9 The fitting relation curve between the annual liquid production of a single well and the fault-controlled reservoirs features value

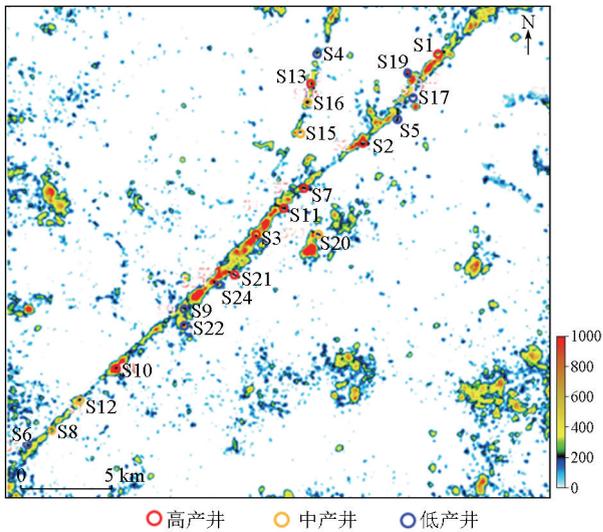


图 10 顺北 1 区预测年累计产液量平面  
Fig. 10 Plan of predicted annual liquid production in Shunbei 1 area

量进行对比,20 口钻井中预测符合 13 口,符合率为 65%,与式(4)的拟合度 64.48% 基本一致。表明以年累计产液量为产量指标的多属性量化预测,其符合率可达到 65%。

#### 4 结论与讨论

针对顺北地区奥陶系断控缝洞体储层特征,开展了单井产量的量化预测技术研究,提出了由“二性”“三属性”组成的断控缝洞体油气产能定量化

表 3 顺北 1 区年产液量预测符合率

Table 3 Coincident rate of predicted annual liquid production in Shunbei 1 area

序号	井名	年累计产液量/万 t	按产液量分级	预测产液量分级	预测符合情况	
1	S1	7.7	高产井	高产	✓	
2	S2	5.4		高产	✓	
3	S3	4.2		高产	✓	
4	S4	3.6	中产井	低产	×	
5	S5	2.7		低产	×	
6	S6	2.5		中产	✓	
7	S7	2.4		高产	×	
8	S8	2.4		中产	✓	
9	S9	2.2		低产	×	
10	S10	2.1		高产	×	
11	S11	2.1		中产	✓	
12	S12	1.9		中产	✓	
13	S13	1.3		中产	✓	
14	S14	1.2	低产	低产	×	
15	S15	1.1		中产	✓	
16	S16	1		中产	✓	
17	S17	0.5		低产	✓	
18	S18	0.1		低产	✓	
19	S19	0.1		低产	✓	
20	S20	0	中产	×		
总计					13	7
预测符合率					65%	35%

估算技术。该技术的实现由四部分组成:①在走滑断裂带精细解释基础上得到表示断裂纵向延伸的通源性和断裂平面展布结构的汇聚特征,并将两种特征量化为断裂特征值;②以异常体、结构张量、最大

似然属性等 3 种属性融合, 得到表征断控缝洞体规模和断裂裂缝分布密度的断控缝洞体征值; ③将断裂特征值与缝洞特征值融合为断控缝洞体特征值; ④将断控缝洞体特征值与实测单井年累计产液量进行统计分析, 得到年累计产液量与断控缝洞体特征值的拟合表达式, 实现断控缝洞体储层单井产量的量化预测, 预测符合率达到 65%。

断控缝洞体储层单井产量的量化预测仅仅走出第一步, 其有效性、稳定性还有待于深入研究。用于表征产量指标的选择, 使用年累计产液量, 还是单位压降产量, 或者其他指标, 还需进行对比试验。断裂特征的优选和断裂特征值的确定, 空间每一个点上异常体、结构梯度张量和最大似然概率等 3 种体属性值计算的时窗大小、横向范围的选取也还要深入试验。尽管如此, 目前研究中发现的断裂特征值与缝洞特征值融合得到的断控缝洞体特征值与年累计产液量之间变化趋势的相似性, 为产量量化预测的统计分析工作打下了基础, 为技术方法的发展提供了线索。通过进一步深入研究之后得到一种或多种有效的方法来预测断控缝洞体的产量, 为勘探开发提供技术支撑。

## 参考文献 (References):

- [1] 鲁新便, 胡文革, 汪彦, 等. 塔河地区碳酸盐岩断溶体油藏特征与开发实践[J]. 石油与天然气地质, 2015, 36(3): 347-355.  
Lu X B, Hu W G, Wang Y, et al. Characteristics and development practice of fault-karst carbonate reservoirs in Tahe area, Tarim Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2015, 36(3): 347-355.
- [2] 焦方正. 塔里木盆地顺北特深碳酸盐岩断溶体油气藏发现意义与前景[J]. 石油与天然气地质, 2018, 39(2): 208-216.  
Jiao F Z. Significance and prospect of ultra-deep carbonate fault-karst reservoirs in Shunbei area, Tarim Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2018, 39(2): 208-216.
- [3] 吴涛, 戴少康, 曹飞, 等. 走滑断裂系对碳酸盐岩“断溶体”油藏形成的控制作用——以塔河油田托普台北为例[J]. 地球科学前沿, 2017, 7(5): 681-694.  
Wu T, Dai S K, Cao F, et al. Strike slip fault system and its controlling on the formation of "reservoir of fault controlling dissolution": A case study of Toufutai Area, Tahe Oil Fields [J]. Advances in Geosciences, 2017, 7(5): 681-694.
- [4] 马乃拜, 金圣林, 杨瑞召, 等. 塔里木盆地顺北地区断溶体地震反射特征与识别[J]. 石油地球物理勘探, 2019, 54(2): 398-403.  
Ma N B, Jin S L, Yang R Z, et al. Seismic reservoir characteristics and identification of fault karst reservoir in Shunbei area, Tarim Basin [J]. Oil Geophysical Prospecting, 2019, 54(2): 398-403.
- [5] 王震, 文欢, 邓光校, 等. 塔河油田碳酸盐岩断溶体刻画技术研究与应用[J]. 石油物探, 2019, 58(1): 149-154.  
Wang Z, Wen H, Deng G X, et al. Fault-karst characterization technology in the Tahe Oilfield, China [J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2019, 58(1): 149-154.
- [6] 李鹏飞, 崔德育, 田浩男. 塔里木盆地塔北地区 X 区块断溶体刻画方法与效果[J]. 石油地球物理勘探, 2017, 52(s1): 189-194.  
Li P F, Cui D Y, Tian H N. Fault karst carbonate reservoir description with GeoEast interpretation sub-system in the Tabei area, Tarim Basin [J]. Oil Geophysical Prospecting, 2017, 52(s1): 189-194.
- [7] 徐红霞, 沈春光, 李斌, 等. 多属性分析技术在碳酸盐岩断溶体预测中的应用[J]. 石油地球物理勘探, 2017, 52(s2): 158-163.  
Xu H X, Shen C G, Li B, et al. Fault-karst carbonate reservoir prediction with comprehensive multi-attribute analysis [J]. Oil Geophysical Prospecting, 2017, 52(s2): 158-163.
- [8] 唐文榜, 韩革华, 刘来祥, 等. 溶洞充填物判识的频率差异分析技术[J]. 石油与天然气地质, 2002, 23(1): 41-44.  
Tang W B, Han G H, Liu L X, et al. Analysis technique of difference for discrimination of cavity fillers [J]. Oil & Gas Geology, 2002, 23(1): 41-44.
- [9] 姚姚, 唐文榜. 深层碳酸盐岩岩溶风化壳洞缝型油气藏可检测性的理论研究[J]. 石油地球物理勘探, 2003, 38(6): 623-629.  
Yao Y, Tang W B. The theoretical researching of detecting for deeply carbonate grotto mantlerock cavity reservoir [J]. Oil Geophysical Prospecting, 2003, 38(6): 623-629.
- [10] 刘坤岩, 许杰. 塔河奥陶系隐蔽溶洞体地震精细识别[J]. 石油地球物理勘探, 2019, 54(5): 1106-1114.  
Liu K Y, Xu J. Identification of Ordovician subtle cave reservoirs in Tahe on seismic data [J]. Oil Geophysical Prospecting, 2019, 54(5): 1106-1114.
- [11] 王晓梅, 唐文榜, 李学著, 等. 碳酸盐岩溶洞型储层反演方法[J]. 物探与化探, 2005, 29(1): 44-46.  
Wang X M, Tang W B, Li X Z, et al. An inversion techniques for water-eroded case type carbonate reservoirs [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2005, 29(1): 44-46.
- [12] 孙海宁, 王晓梅, 刘来祥. AVO 技术在识别充填流体溶洞中的应用[J]. 物探与化探, 2008, 32(4): 397-399.  
Sun H N, Wang X M, Liu L X. The application of AVO to the prediction of water-eroded caves filled with liquids for carbonate reservoirs [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2008, 32(4): 397-399.
- [13] 李宗杰, 刘群, 李海英, 等. 塔河油田缝洞储集体油水识别的谐频特征分析技术应用研究[J]. 石油物探, 2014, 53(4): 484-490.  
Li Z J, Liu Q, Li H Y, et al. Application of HFC technique for hydrocarbon identification in fracture-cave reservoirs of lower-Ordovician Carbonate in Tahe oilfield [J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2014, 53(4): 484-490.
- [14] 樊佳方, 李宗杰, 韩革华, 等. 基于属性差异薄储集层(体)流体预测技术 [C]//北京: SPG/SEG 南京 2020 国际地球物理会议论文集, 2020: 723-726.  
Fan J F, Li Z J, Han G H, et al. Fluid prediction techniques for thin reservoirs based on seismic attribute differences [C]//Beijing: SPG/SEG Nanjing 2020 International Geophysical Conference, 2020: 723-726.
- [15] 马艺璇, 李慧莉, 刘坤岩, 等. 基于分频相干体的蚂蚁追踪技术在塔河油田断裂刻画中的应用[J]. 石油物探, 2020, 59(2): 258-266.

- Ma Y X, Li H L, Liu K Y, et al. Application of an ant-tracking technique based on spectral decomposition to fault characterization [J]. *Geophysical Prospecting for Petroleum*, 2020, 59(2): 258–266.
- [16] 陈双全, 季敏. 地震数据结构张量相干计算方法[J]. *石油物探*, 2012, 51(3): 234–238.
- Chen S Q, Ji M. Structure tensor coherence computation method of seismic data [J]. *Geophysical Prospecting for Petroleum*, 2012, 51(3): 234–238.
- [17] 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.
- Liang Z Q. Post stack seismic prediction techniques for fractures of different scales [J]. *Geophysical Prospecting for Petroleum*, 2019, 58(5): 766–772.
- [18] 刘振峰, 曲寿利, 孙建国, 等. 地震裂缝预测技术研究进展[J]. *石油物探*, 2012, 51(2): 191–196.
- Liu Z F, Qu S L, Sun J G, et al. Progress of seismic fracture characterization technology [J]. *Geophysical Prospecting for Petroleum*, 2012, 51(2): 191–196.
- [19] 朱成宏, 黄国骞, 秦瞳. 断裂系统精细分析技术[J]. *石油物探*, 2002, 41(1): 42–48.
- Zhu C H, Huang G Q, Qin T. Methods for detailed fracture system description [J]. *Geophysical Prospecting for Petroleum*, 2002, 41(1): 42–48.
- [20] 黄苇, 周捷, 高利君, 等. 基于同步挤压改进短时傅里叶变换的分频蚂蚁追踪在断裂识别中的应用[J]. *物探与化探*, 2021, 45(2): 432–439.
- Huang W, Zhou J, Gao L J, et al. The application of frequency division ant tracking based on synchronous extrusion improvement of short time Fourier transform in crack detection [J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2021, 45(2): 432–439.
- [21] 马玉歌, 苏朝光, 张健, 等. 低序级断层结构导向坎尼属性边缘检测识别方法[J]. *物探与化探*, 2020, 44(3): 698–703.
- Ma Y G, Su C G, Zhang J, et al. Low-order fault structure-oriented Canny property edge detection and recognition method [J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2020, 44(3): 698–703.

## Quantitative prediction technology for the hydrocarbon production capacity of fractures and vugs in fault-controlled carbonate reservoirs in the Shunbei area

LIU Jun<sup>1,2</sup>, HUANG Chao<sup>2</sup>, YANG Lin<sup>2</sup>, ZHANG Yong-Sheng<sup>2</sup>, ZHA Ming<sup>1</sup>

(1. School of Geosciences, China University of Petroleum, Qingdao 266580, China; 2. Exploration and Development Research Institute, Sinopec Northwest China Petroleum Bureau, Urumqi 830011, China)

**Abstract:** The strike-slip fault system and the fractures and vugs in fault-controlled reservoirs have become new Ordovician exploration targets in the Shunbei area. This study explored a multi-attribute quantitative prediction technique for the single-well production of fault-controlled reservoirs, aiming to provide a scientific basis and technical support for well deployment and well trajectory optimization in the fault zones of the Shunbei area. Faults serve as pathways for hydrocarbon migration in fault-controlled reservoirs. Their connectivity to provenance areas can be characterized by their longitudinal extension and the width of the fault zone, and their convergence can be characterized by their lateral extension and the planar intersection structure between major and secondary faults. Both characteristics of faults were used to indicate the fault characteristics in the oil source conditions for oil accumulation. The space for hydrocarbon accumulation in fault-controlled reservoirs is dominated by dissolution fractures and vugs, such as caves. The fracture-vug characteristics, which represent the space for hydrocarbon accumulation and its connectivity, were characterized by the scale of fault-controlled reservoirs, the volume of the fractures and vugs, and the density of fractures in faults. The single-well production of fault-controlled reservoirs is related to both the fault characteristics and the fracture-vug characteristics. Therefore, the quantification of fault characteristics and the fracture-vug characteristics is the basis for the quantitative prediction of single-well production. The fault characteristic values were determined through the fine-scale interpretation of faults based on seismic data and their multiple attributes. Moreover, the range of fault-controlled reservoirs was delineated based on structure tensors; the distribution and volume of caves, fractures, and vugs were characterized using the amplitude of anomalous bodies; and the density of fractures in faults can be characterized using the maximum likelihood probability. Then, the three attributes were fused to determine the fracture-vug characteristic values. Finally, the quantified fault characteristic values and fractured-vug characteristic values were fused into the characteristic value of fault-controlled reservoirs. Through the statistical analysis of the characteristic value and annual liquid production of drilled wells, the statistical relationship between the annual fluid production and the characteristic value of fault-controlled reservoirs was determined, thus achieving the quantitative prediction of the single-well production of fault-controlled reservoirs.

**Key words:** fault-controlled reservoirs; fault characteristic; fracture-vug characteristic; characteristic of a fault-controlled reservoirs; quantitative prediction of single-well production; anomalous body decomposition; structure tensor; maximum likelihood probability