

文章编号: 1673-5005(2012)01-0001-07

塔河油田奥陶系碳酸盐岩溶洞型储集体 识别及定量表征

李 阳

(中国石油化工股份有限公司,北京 100728)

摘要: 采用井震联合、动静结合手段,识别出塔河奥陶系碳酸盐岩溶洞型储集体 21 个缝洞单元,并根据缝洞单元储量规模和天然能量进行分类评价;整合井震资料,采用协同序贯指示模拟方法,建立塔河油田溶洞储集体的三维展布模型。结果表明:溶洞型储集体是塔河油田最主要的储集类型,钻录井过程中出现严重井漏、放空和钻时降至极低是识别大型溶洞的重要标志。“串珠状反射+波阻抗高异常”为溶洞型储集体的典型地震响应特征,据此可以定性预测井间溶洞展布;融合反射能量体和高精度相干体能量定量预测井间溶洞展布。

关键词: 塔河油田; 碳酸盐岩; 溶洞; 地震预测; 缝洞单元; 定量表征

中图分类号: P 618. 1308 文献标志码: A doi: 10. 3969/j. issn. 1673-5005. 2012. 01. 001

Ordovician carbonate fracture-cavity reservoirs identification and quantitative characterization in Tahe Oilfield

LI Yang

(China Petroleum & Chemical Corporation, Beijing 100728, China)

Abstract: In Tahe Ordovician carbonate fracture-cavity reservoirs, 21 fracture-cavity units were divided by integrating well-seismic data with static and dynamic methods. According to natural energy and the reserves scale, the fracture-cavity units were classified and evaluated. A 3D through-going model of cave reservoirs in Tahe Oilfield was built by integrating well-seismic data and sequential indicator co-simulation. The results show that the cave reservoir is the main reservoir in Tahe Oilfield. During drilling and logging, serious fluid loss, drilling tools unloading and drilling time reducing to the minimum are important indicators to a large cave. The beads-shaped reflection and high abnormal impedance are the typical seismic response characteristic of cave reservoirs. Based on this, the spread of caves between wells can be predicted qualitatively. Besides, the reflection energy bodies and high-accuracy coherence cube can quantitatively predict caves distribution between wells.

Key words: Tahe Oilfield; carbonate; cave; seismic prediction; fracture-cavity unit; quantitative characterization

塔河油田奥陶系碳酸盐岩油藏是目前我国陆上储量及产量规模最大的海相碳酸盐岩油藏,其最主要的储集空间是由岩溶作用所形成的溶洞。塔河油田奥陶系碳酸盐岩溶洞型储集体历经多次构造运动,并遭受强烈的风化、剥蚀和淋滤作用,导致溶洞储集体形态极不规则、分布离散随机^[1-2]。在成功钻井区,通过录井、测井等信息可以描述中小规模或充填型溶洞体^[3-5],利用波阻抗、波形等单因素地震预测大型溶洞体也有成功的实例^[6-12]。然而,由于储集体埋藏深、大型溶洞体钻井困难,很难获得完整的

测井资料。笔者在塔河油田高分辨率三维地震资料采集的基础上,结合各类动静态资料,探索钻录测震多学科定性定量综合的碳酸盐岩溶洞型储集体识别及定量表征方法。

1 井孔储集体识别

1.1 溶洞储集体井孔响应特征

塔河油田古生界奥陶系碳酸盐岩储层的有效储渗空间按成因、形态及规模可以分为溶洞、裂缝和基质孔隙,溶洞是最有效的储集空间,裂缝是主要的渗

收稿日期: 2011-07-10

基金项目: 国家“973”项目(2011CB201003)

作者简介: 李阳(1958-),男(汉族),山东东平人,教授级高级工程师,博士,主要从事油田开发工作。

流通道,其储油能力相对于溶洞极为有限,基质孔隙基本不具有储渗能力,因此溶洞型储集体是塔河油田奥陶系碳酸盐岩储层中最主要的储集体类型。

溶洞储集体的钻录井特征、成像测井、常规测井及生产测井响应特征较为明显。钻遇特大型溶洞段时通常出现钻井液严重漏失、钻具放空现象,无法取心及测井,所以将钻录井中严重井漏、放空和钻时降至极低作为识别大型溶洞的重要标志;在成像测井图像中,溶洞型储集体层段表现为较暗的颜色;在常规测井资料上,溶洞段井径曲线有明显的扩径现象,自然伽马呈明显“弓”型,去铀伽马值较围岩增大,双侧向电阻率值明显减小,呈大的“正差异”,密度值明显降低,中子及声波时差值明显增大;生产测井中产层贡献大的层段多为溶洞型储集体层段。

按充填情况及储油能力可将溶洞储集体划分为未充填型、部分充填型和全充填型3种类型。未充填型指保留较好的岩溶洞穴及与其相连的垮塌体,一般具有自然投产、油气单井产量高等特点;部分充填型主要由溶洞垮塌体和伴生的裂缝组成,也包括溶蚀孔隙,一般酸压投产;全充填型指被砂泥、角砾等严重充填的洞穴。不同类型溶洞储集体常规测井

响应特征存在一定差异(表1),对于未充填溶洞,自然伽马曲线值一般小于20 API;深侧向电阻率值一般小于100 Ω·m,与浅侧向电阻率出现明显正差异;密度曲线值较上下围岩有较大降低,一般小于2.4 g/cm³;声波时差测井值表现为高时差,一般大于164 μs/m;中子孔隙度值也表现为高值,一般为3%~10%。对于部分充填及全充填溶洞,自然伽马曲线值较上下围岩明显增大;深侧向电阻率值明显降低;密度曲线为明显低值;声波时差测井值增大明显,可达331 μs/m;中子测井曲线起伏明显,最大可达30%。但是,由于充填物质及充填程度的影响,部分充填和全充填溶洞的双侧向电阻率、密度、声波时差、中子等常规测井曲线没有明确的门槛值,因此必须结合钻录井及成像测井响应特征进行进一步识别区分,比如未充填型溶洞放空、漏失现象严重,部分充填型溶洞仅存在轻微漏失现象,全充填型溶洞无放空漏失现象;不同类型溶洞段井径扩径程度有明显差别,未充填型溶洞段扩径最为明显;未充填型溶洞成像测井响应以大段深色图像为主,部分充填型溶洞的成像测井图像中有明显的淡色基岩显示,全充填型溶洞则表现为全深色或部分深色图像。

表1 塔河油田溶洞型储集体响应特征

Table 1 Cave reservoir response characteristics of Tahe Oilfield

溶洞型 储层类型	钻井 显示	岩心 显示	井径 特征	自然伽 马/API	无铀伽 马/API	深侧向电阻 率/(Ω·m)	密度 ρ/ (g·cm ⁻³)	声波时差/ (μs·m ⁻¹)	中子/ %	FMI 成 像测井
未充填型	放空漏失,钻时小于5 min/m	—	扩径明显	<20	<20	<100	<2.4	>164	3~10	整段明显深色图像
部分 充填型	轻微漏失,钻时为5~10 min/m	—	扩径较明显	20~60	明显小于自然伽马	<20	2.4~2.65	164~331	3~12	洞内有明显淡色基岩图像
全充 填型	无放空漏失,钻时大于10 min/m	可见充填物性质	轻微扩径	>60	接近自然伽马	<20	2.4~2.65	164~331	15~30	洞内全深色或部分深色图像

1.2 井孔溶洞识别的基本原则

根据井孔储集体响应特征,结合塔河油田600余口井的实际资料,总结出井孔识别溶洞储层发育段的基本原则:①钻井、录井过程中出现严重井漏、放空和钻时降至极低等现象是大型溶洞的直接证据;②较大型溶洞在成像测井、常规测井响应上有明显识别标志;③产液剖面解释的有规模的产液段是溶洞层段;④酸压后投产的井(没有测产液剖面),酸压段中测井解释为有效储层段可视为溶洞储集体的一部分,溶洞厚度可依据产量和邻井情况确定。

依据以上原则对塔河四区75口井进行了单井溶洞识别,在其中62口井中识别出132个溶洞,并依据上述响应特征进行充填类型分类,分出未充填溶洞92个、部分充填溶洞15个、全充填溶洞25个,距奥陶系顶(T₇⁴)风化面0~60m内的溶洞

最发育。

2 溶洞储集体井间预测

采用各类地震属性预测溶洞型碳酸盐岩储层已取得了一定效果^[6-12],但由于塔河溶洞储集体较强的各向异性,单类地震属性分析预测的储层目标钻井成功率较低。采用多属性地震联合预测能在一定程度上克服井间预测多解性,由此用两种方法进行溶洞储集体预测:一是将地震反射剖面 and 波阻抗反演剖面相结合;二是优选地震属性,建立地震融合数据体,定量预测储集体三维展布。

2.1 地震反射剖面 and 波阻抗反演剖面联合预测

正演模拟表明,碳酸盐岩溶洞储集体的形态、尺度、组合形式、距奥陶系风化面距离,都影响储集体的反射特征^[13]。塔河油田溶洞型储层地震反射以串珠

状特征为主,可分为 4 类,即整体串珠状反射、表层弱反射+内幕串珠状反射、表层强内幕强反射、表层弱内幕强反射(图 1)。表层(距奥陶系顶风化面 0~60 m)溶洞为表层弱+内幕串珠状反射特征,如 TK467 井;中深部(距奥陶系顶风化面 60~240 m)溶洞主要为整体串珠状反射特征,如 TK234 井(图 2(a));两者在串珠状反射特征上有较明显差异。溶洞的发育致使储集体波阻抗与致密碳酸盐岩围岩有较大区别,在

反演波阻抗剖面上为明显异常(图 2(b))。

从井出发,对比三维地震反射剖面和高精度三维地震波阻抗反演剖面,塔河四区溶洞型储集体的地震响应特征为“串珠状反射+波阻抗异常”(图 2(a)、(b))。联合地震反射剖面 and 波阻抗反演剖面可以较好预测井间溶洞的位置、形态和规模(图 2(c)),而且该方法直观简洁,目前塔河油田通过该方法预测溶洞钻井吻合率达到 90% 以上。

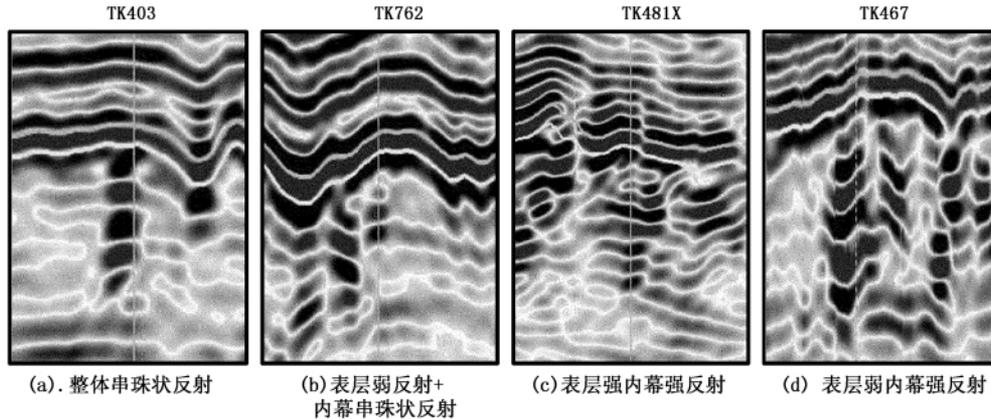


图 1 塔河油田溶洞储集体地震反射特征

Fig. 1 Seismic reflection characteristics of cave in Tahe Oilfield

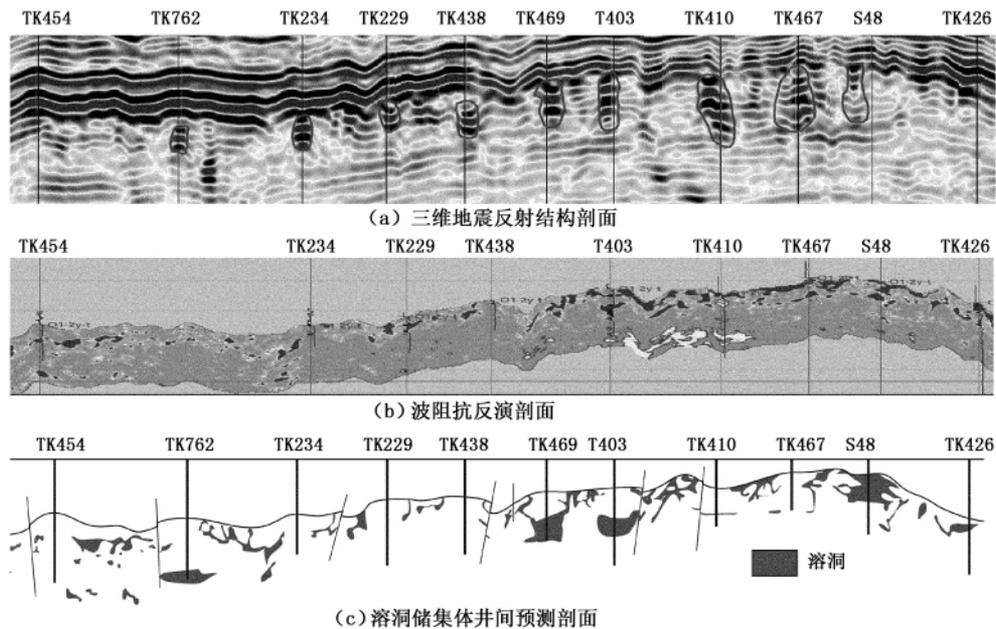


图 2 TK454-TK426 连井剖面井间溶洞储集体预测

Fig. 2 Cave reservoir bodies cross-well prediction of TK454-TK426 connecting-well section

2.2 地震融合体预测井间储集体

优选两种或多种地震属性,经过运算归一到一个无量纲的地震融合数据体,可以更好地克服地震信息的多解性,准确确定储集体边界,提高预测精度。

地震融合体信息包括振幅能量体和不连续性数据体两部分,其中振幅能量属性能较好反映溶洞特

性,不连续性数据体能较好地反映断裂和溶蚀带特性。在融合反射能量体和高精度相干体的融合剖面上(图 3),表层溶洞储集体主要对应弱值区,内幕储层以强反射特征为主,尤其以串珠型反射特征与溶洞对应关系较好。

根据溶洞在融合体上的反射特征,将内幕反射

特征分成杂乱型、串珠型、串珠+杂乱型和低值型 4 种类型(图 4) 统计研究区内钻遇溶洞的井,表层钻遇溶洞 48 个,占总数的 61.5%,内幕钻遇洞穴 30

个,占总数的 38.5% 溶洞主要分布在表层,以表层弱值为主;内幕溶洞主要对应串珠型、杂乱型及串珠+杂乱型反射特征。

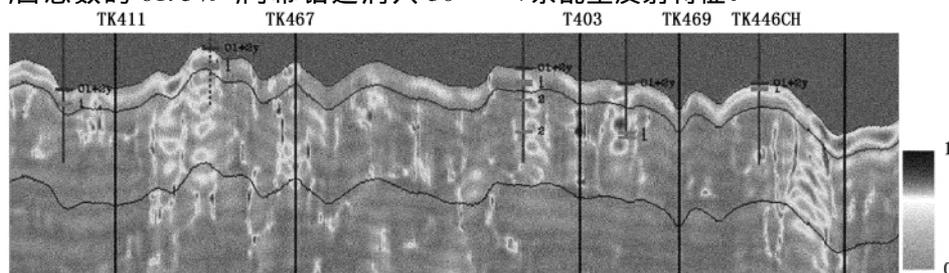
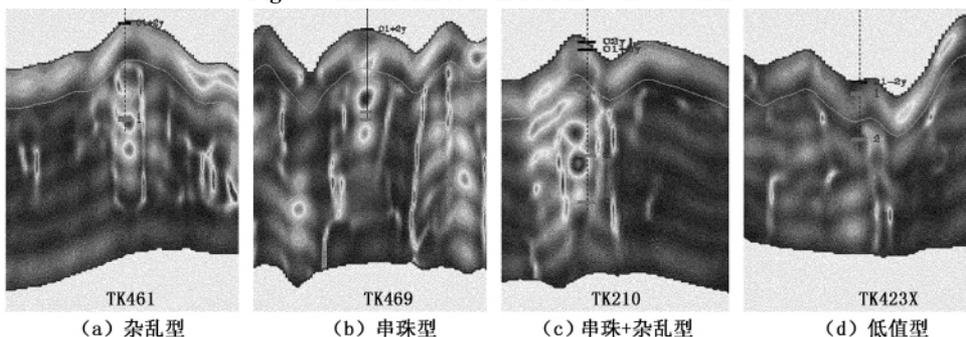


图 3 TK411-TK446CH 融合体剖面

Fig.3 TK411-TK446CH fusion bodies section



(a) 杂乱型 (b) 串珠型 (c) 串珠+杂乱型 (d) 低值型

图 4 融合体内幕反射特征类型

Fig.4 Types of fusion bodies reflection characteristics

表层和内幕溶洞对应融合体数值界限较明显,为溶洞空间雕刻提供了基础依据。在古地貌、古水系对表层岩溶发育控制作用等相关研究基础上,借助于三维地震可视化空间雕刻技术,利用地震融合体定量描述溶洞储集体几何形态。从 S48 缝洞单元奥陶系顶部储集体预测结果(图 5)可以看出,融合体数据反映内幕溶洞的条带性较清楚,洞与洞之间裂缝发育,规律性好。

3 缝洞单元划分及评价

缝洞单元是指由裂缝网络沟通的一个或若干个溶洞所组成的具有统一的压力系统的流体动力单元^[14],是溶洞型油藏的基本开发单元。划分缝洞单元有利于进一步刻画油藏地质模型,针对缝洞单元的差异性进行开发,有利于提高油藏采收率和降低开发井减产率^[15]。

3.1 缝洞单元的划分依据

在井震预测得到井间储集体展布基础上,依据流体动力条件,划分缝洞单元。单元内储集体性质具有关联性,具有统一的压力系统、油水界面和流体性质,而与单元外储集体无关联性。缝洞单元的具体划分依据如下:

(1) 不同缝洞单元具有不同的流体动力系统,

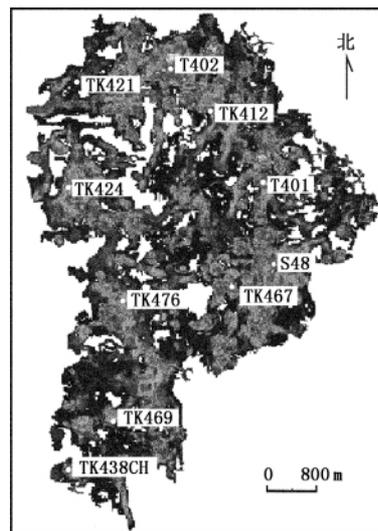


图 5 融合体预测的 S48 缝洞单元储集体平面展布

Fig.5 Reservoir plane distribution of fusion bodies prediction in S48 fracture-cavity unit

缝洞系统内具有同一流体动力特征的储集体即为同一缝洞单元。

(2) 缝洞单元内部与不同缝洞单元之间的连通性有很大差异,在连通性分析研究的基础上,确定缝洞单元的空间分布。

3.2 缝洞单元的划分方法

缝洞单元划分方法包括静态和动态划分法。

(1) 缝洞单元静态划分法主要利用岩溶古地貌、现今构造和地震属性(振幅变化率、分频、波形等)等静态资料划分缝洞单元(表 2)。岩溶低部位往往是古地表水系的主干河道,剥蚀严重,同时裂缝充填,溶洞垮塌充填严重,储层不发育或发育程度差,为缝洞单元的边界;岩溶斜坡部位或局部残丘,裂缝、溶洞型储层遭受破坏的程度较小,充填相对较弱,储集体连通性较好,是缝洞单元的主体。将振幅变化率、分频和波形属性参数进行归一化处理,得到取值为 0~100 的无量纲相对数据,3 种属性的相对数据在量值上没有联系。缝洞单元边界的振幅变化率归一化相对值范围为 40~60,缝洞储集体发育程度与振幅变化率有正相关关系,振幅变化率大,缝洞储集体发育程度好;30 Hz 频率时,缝洞单元边界的分频值范围为 20~40;缝洞单元边界的波形振幅绝对值通常在 20~44

范围,大于边界值的区域为同一个缝洞单元。

表 2 缝洞单元静态划分指标

Table 2 Static division indexes of fracture-cavity unit

缝洞单元划分	岩溶	振幅变化率	分频(频率 = 30 Hz)	波形振幅(绝对值)
缝洞单元边界	沟谷	40~60	20~40	20~44
缝洞单元内部	局部残丘高、斜坡	>60	>20	>44
缝洞单元外部	—	<40	<40	<20

(2) 缝洞单元动态划分法是根据动态资料判断各井之间是否属于同一流体动力系统,并依此划分缝洞单元。主要包括油藏压力降落法、类干扰试井法、流体性质变化法等;也可利用注水、示踪剂检测和生产特征一致性等动态资料研究不同井组的流体连通性、地下流体渗流屏障及空间分布,并依此划分缝洞单元(表 3)。

表 3 缝洞单元动态划分依据

Table 3 Dynamic division indexes of fracture-cavity unit

方法	划分依据
压力降落趋势	相同产层段的相邻井,投产初期地层压力随时间具有较好的一致性变化趋势关系,则属于同一缝洞单元
干扰试井	激动井进行周期性的关井、改变工作制度等激动,邻井的油压、产量、含水出现周期响应,则属于同一缝洞单元
类干扰试井	生产井投产、改变工作制度以及酸压、堵水等对邻井的油压、产量、含水产生干扰,则是同一个缝洞单元
注水	注水井注水后,对其相邻井的油压、产量、含水以及含水上升速度、递减率等产生影响,则为同一个缝洞单元
示踪剂监测	注入水中加入示踪剂,监测到有示踪剂显示的相邻井,为同一个缝洞单元
生产特征	具有相似生产动态特征的相邻井,为同一个缝洞单元

综合运用静、动态缝洞单元划分方法,结合井间连通性分析,在塔河油田四区划分出 21 个缝洞单元(图 6),其中多井控制缝洞单元 5 个,单井控制缝洞单元 16 个,其中 S48、S65 缝洞单元单井产能高,稳产时间长,是区内主要的缝洞单元。

要体现在缝洞单元的储集体规模和天然驱动能量上。因此,以天然能量、储量规模为依据对缝洞单元进行分类评价,可以更有效地指导油田开发。

3.3.1 缝洞单元储量规模评价

根据储量规模将塔河油田四区 21 个缝洞单元划分为 4 类,储量规模高于 500×10^4 t 的 I 类缝洞单元有 3 个,储量之和为 $4\,259 \times 10^4$ t,占区块总储量的 78.02%。不同类别缝洞单元具有不同的生产能力和动态表现(表 4),目前油田生产主要依靠 I、II 类缝洞单元。

表 4 塔河四区缝洞单元储量规模评价结果

Table 4 Evaluation results of fracture-cavity unit reserves scale of Tahe-4 area

分类	储量分类/ 10^4 t	单元数量/ 个	单元占比/ %	单元储量/ 10^4 t	单元储量占 比/%	日油水平/ ($t \cdot d^{-1}$)	含水率/%
I	≥ 500	3	14.3	4 259	78.02	748	47.42
II	100~500	5	23.8	989	18.12	223	59.82
III	10~100	6	28.6	186	3.40	21	91.22
IV	<10	7	33.3	25	0.46	30	83.06

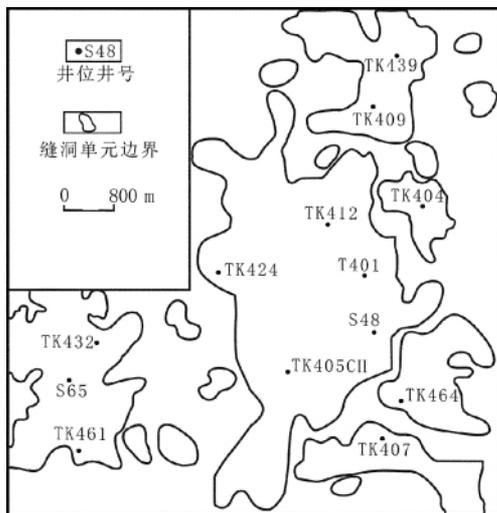


图 6 塔河油田四区缝洞单元分布图

Fig. 6 Fracture-cavity unit distribution of Tahe-4 area

3.3 缝洞单元评价

就油藏开发特征而言,不同缝洞单元的差异主

3.3.2 缝洞单元能量特征评价

油藏天然能量是缝洞单元分类的主要依据,根据每采出 1% 地质储量的平均地层压降 (Δp_{pr}) 和无

因次弹性产量比值(N_{pr})进行评价,也可分出4类(表5)。塔河油田四区主体缝洞单元天然能量较为充足,天然能量较充足单元储量占区块总储量的96.79%。

表5 塔河四区缝洞单元天然能量评价结果

Table 5 Evaluation results of fracture-cavity unit natural energy of Tahe-4 area

分类	级别	划分指标标准		D_{pr}	N_{pr}	单元数量/个	数量占比/%	单元储量/ 10^4 t	单元储量占比/%
I	天然能量充足	$\Delta p_{pr} < 0.2$	$N_{pr} > 30$	—	—	—	—	—	—
II	天然能量较充足	$\Delta p_{pr} = 0.2 \sim 0.8$	$N_{pr} = 8 \sim 30$	0.40	13.10	9	45	5284	96.79
III	具有一定天然能量	$\Delta p_{pr} = 0.8 \sim 2$	$N_{pr} = 2.5 \sim 8$	1.02	4.74	4	20	151	2.77
IV	不足	$\Delta p_{pr} > 2$	$N_{pr} < 2.5$	1.81	2.40	7	35	24	0.44

4 溶洞储集体三维空间展布

在井孔储集体识别、井间预测及缝洞单元划分评价的基础上,建立定量的溶洞三维空间展布模型,该模型是溶洞定量表征的最终结果。考虑到溶洞分布的复杂性和随机性,采取整合井震资料的随机模拟方法。

首先将单井识别的不同类型溶洞(未充填、部分充填、全充填型)层段作为硬数据。通过地震属性优选,认为三维高精度反演波阻抗数据能较好地体现溶洞与围岩以及不同类型溶洞之间的差别。

统计分析目的层段波阻抗数据与对应井点识别的不同类型溶洞的对应关系,建立波阻抗与不同类型溶洞的概率分布关系,寻求溶洞在波阻抗上的可能分布范围。分析表明,塔河四区非储层在反演波阻抗(密度(g/cm^3) \times 速率(m/s))为23000时分布概率最高,从25000之后,分布概率有逐渐升高的趋势;未充填溶洞主要在低值部分分布概率较大,在24000附近有第二个高值区;部分充填溶洞主要分布于大于24000区域,在25000到26000分布概率相对较大;全充填溶洞分布规律性差,有多个小的高峰区域,24500和25000范围相对发育。

建立不同区间的地震波阻抗属性数据所对应不同储层类别出现的概率分布关系,实现了模拟过程中地震资料的约束作用。采用协同序贯指示的模拟方法,建立不同类型溶洞的空间展布模型(图7)。

模拟后的储集体分布比例基本与单井的溶洞类型划分相一致,总体来说浅层储集体发育好,集中于TK471X-T402-T408-S48-TK407一带,深部储集体较为分散和独立。

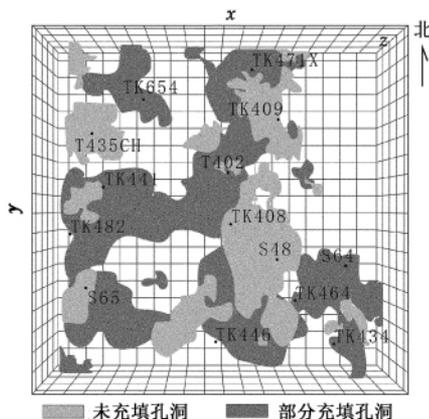


图7 塔河四区的溶洞三维展布模型

Fig. 7 Cave 3D spread model of Tahe-4 area

5 结论

(1) 溶洞型储集体是塔河油田奥陶系碳酸盐岩油藏最主要的储集类型,钻录井过程中出现严重井漏、放空和钻时降至极低是识别大型溶洞的重要标志。

(2) “串珠状反射+波阻抗高异常”为溶洞型储集体的典型地震响应特征。表层主要为表层弱+串珠状反射特征,中深部主要为整体串珠状反射特征。

(3) 采用多属性优选与融合技术,融合反射能量体和高精度相干体能有效预测井间溶洞储集体。

(4) 采用静、动态两类方法在塔河四区划分出21个缝洞单元,并根据缝洞单元储量规模和天然能量实现了分类评价。

(5) 采用协同序贯指示的模拟方法,实现了不同类型溶洞的三维空间展布。

参考文献:

[1] 万云,刘存革,刘洪,等.塔河油田奥陶系多期岩溶作用的识别标志[J].中国石油大学学报:自然科学版,2009,33(5):6-11.

- WAN Yun , LIU CUN-ge , LIU Hong , et al. Identification signs of multiphase karstification of Ordovician reservoir in Tahe Oilfield [J]. Journal of China University of Petroleum(Edition of Natural Science) 2009 33(5) : 6-11.
- [2] 吴欣松, 魏建新, 昌建波, 等. 碳酸盐岩古岩溶储层预测的难点与对策 [J]. 中国石油大学学报: 自然科学版 2009 33(6) : 16-21.
- WU Xin-song , WEI Jian-xin , CHANG Jian-bo , et al. Difficulty and countermeasures in carbonate paleokarst reservoir prediction [J]. Journal of China University of Petroleum(Edition of Natural Science) 2009 33(6) : 16-21.
- [3] 张晓辉. 塔河油田碳酸盐岩岩溶测井响应特征 [J]. 新疆地质 2005 23(4) : 406-409.
- ZHANG Xiao-hui. The characteristics of logging data in dissolved carbonate rocks in Tahe Oilfield [J]. Xinjiang Geology , 2005 23(4) : 406-409.
- [4] 吴昌荣, 伍文明, 李海鹏, 等. 塔河油田四区鹰山组碳酸盐岩储层测井识别 [J]. 新疆地质 2007 25(4) : 405-408.
- WU Chang-rong , WU Wen-ming , LI Hai-peng , et al. Logging identification of carbonate reservoir of Yingshan formation in block 4 of Tahe oilfield [J]. Xinjiang Geology 2007 25(4) : 405-408.
- [5] 伍文明, 康志宏, 赵新法, 等. 塔河油田六区鹰山组缝洞型储层测井识别 [J]. 石油地质与工程 2007 21(5) : 37-39.
- WU Wen-ming , KANG Zhi-hong , ZHAO Xin-fa , et al. Logging identification of Yingshan formation fissure-cave reservoir in the sixth block of Tahe Oilfield [J]. Petroleum Geology and Engineering 2007 21(5) : 37-39.
- [6] 吕景英. 用波形分析法预测塔河油田碳酸盐岩储层 [J]. 勘探地球物理进展 2004 27(2) : 112-116.
- LÜ Jing-ying. Prediction of carbonate reservoirs using waveform analysis in Tahe Oilfield [J]. Progress in Exploration Geophysics 2004 27(2) : 112-116.
- [7] 闫相宾, 管路平, 王世星. 塔里木盆地碳酸盐岩缝洞系统的地震响应特征及预测 [J]. 石油与天然气地质, 2007 28(6) : 828-835.
- YAN Xiang-bin , GUAN Lu-ping , WANG Shi-xing. Seismic response characteristics and prediction of carbonate rock fractured-vuggy systems in the Tarim Basin [J]. Oil & Gas Geology 2007 28(6) : 828-835.
- [8] 许杰, 赵永勤, 杨子川. 应用波形分析技术预测塔河油田缝洞型储集层 [J]. 新疆石油地质 2007 28(6) : 756-760.
- XU Jie , ZHAO Yong-qin , YANG Zi-chuan. Waveform analysis technique and fissure-cavity reservoir prediction in Tahe Oilfield [J]. Xinjiang Petroleum Geology , 2007 28(6) : 756-760.
- [9] 杨林, 顾汉明, 李宗杰, 等. 基于时频分析技术预测碳酸盐岩缝洞储层 [J]. 天然气工业 2008 28(6) : 37-39.
- YANG Lin , GU Han-ming , LI Zong-jie , et al. The prediction of carbonate rock reservoir with crack-vug by the reflection time-frequency analysis [J]. Natural Gas Industry 2008 28(6) : 37-39.
- [10] 王光付. 碳酸盐岩溶洞型储层综合识别及预测方法 [J]. 石油学报 2008 29(1) : 47-51.
- WANG Guang-fu. Integrative identification and prediction methods for carbonate rock cave reservoir [J]. Acta Petrolei Sinica 2008 29(1) : 47-51.
- [11] 董宁, 杨立强. 基于小波变换的吸收衰减技术在塔河油田储层预测中的应用研究 [J]. 地球物理学进展, 2008 23(2) : 533-538.
- DONG Ning , YANG Li-qiang. Application of absorption and attenuation based on wavelet transform for prediction of reservoir in Tahe Oilfield [J]. Progress in Geophysics , 2008 23(2) : 533-538.
- [12] 林昌荣, 王尚旭, 张勇. 应用地震数据体结构特征法预测油层分布规律 [J]. 中国石油大学学报: 自然科学版 2008 32(2) : 39-43.
- LIN Chang-rong , WANG Shang-xu , ZHANG Yong. Predicting reservoir distribution by applying method of seismic data structure characteristic [J]. Journal of China University of Petroleum 2008 32(2) : 39-43.
- [13] 黄捍东, 张如伟, 赵迪, 等. 塔河奥陶系碳酸盐岩缝洞预测 [J]. 石油地球物理勘探 2009 44(2) : 213-218.
- HUANG Han-dong , ZHANG Ru-wei , ZHAO Di , et al. Prediction of Ordovician carbonate fracture and cavern in Tahe area [J]. Oil Geophysical Prospecting , 2009 44(2) : 213-218.
- [14] 朱蓉, 楼章华, 鲁新便, 等. 塔河油田缝洞单元地下水化学特征及开发动态 [J]. 石油学报 2008 29(4) : 567-572.
- ZHU Rong , LOU Zhang-hua , LU Xin-bian , et al. Chemical characteristics of underground water and development performance of fracture-cave units in Tahe Oilfield [J]. Acta Petrolei Sinica 2008 29(4) : 567-572.
- [15] 张希明, 朱建国, 李宗宇, 等. 塔河油田碳酸盐岩缝洞型油气藏的特征及缝洞单元划分 [J]. 海相油气地质 2007 12(1) : 21-24.
- ZHANG Xi-ming , ZHU Jian-guo , LI Zong-yu , et al. Ordovician carbonate fractured-vuggy reservoir in Tahe Oilfield , Tarim Basin: characteristics and subdivision of fracture-vug units [J]. Marine Origin Petroleum Geology 2007 12(1) : 21-24.

(编辑 刘为清)