

碳酸盐岩串珠状地震相储层自身要素研究 及高效井轨迹优化

——以塔里木盆地塔中西部奥陶系为例

王平¹, 胡太平¹, 谢恩¹, 江杰¹, 张敏¹, 丁肇媛¹, 齐凤林²

(1 中国石油塔里木油田公司勘探开发研究院; 2 中国石油塔里木油田公司塔中项目经理部)

摘要 综合利用地震、钻井、测井及开发动态等资料,研究了塔里木盆地塔中西部地区高效井与串珠状地震相储层的关系。提出了峰谷能量指数的概念,指数越大,串珠状地震相储层越发育。若强串珠状地震相发育伴生断裂,则储层发育规模较大;串珠状地震相位于缝洞系统的相对高部位,则一般油柱高度大,有较长的无水采油期。对于强串珠状地震相,水平井水平段轨迹设计在最大波谷处较为合适;对于弱串珠状地震相,水平井水平段轨迹设计在最大波谷之下的零相位之上较为合适。塔中西部实际应用结果表明,具备四项要素(峰谷能量指数大于17000、伴生断裂发育、处于缝洞体系高部位、目的层井轨迹位于储层顶部)的强串珠状地震相储层,钻井易高产稳产。

关键词 塔里木盆地; 碳酸盐岩储层; 地震相; 高效井轨迹

中图分类号: TE122.2

文献标识码: A

1 问题的提出

塔中西部位于塔里木盆地塔中隆起北部斜坡带塔中I号坡折带西段(图1),主要勘探目的层——中奥陶统一间房组发育层间岩溶储层^[1],近东西向展布的中奥陶世逆冲断裂被志留纪—泥盆纪近南北向的走滑断裂分割,对储层和油气有明显的控制作用^[2]。根据地震反射形态的差异,一般把塔中地区碳酸盐岩地震相划分为“串珠状”、“片状”、“杂乱状”三种(图1)。“串珠状”地震相在地震剖面上形似“羊肉串”,横向上长度一般不大,纵向上至少有一强波谷和一强波峰,与层状反射的“片状”地震相以及弱反射或杂乱弱反射的“杂乱状”地震相易于区别。对于串珠状反射的成因,前人研究中的大多数认为碳酸盐岩溶洞与地层的强波阻抗界面会形成多次绕射波,对其进行叠前偏移成像,垂向上可形成多个强能量团,即“串珠”^[3-4]。

根据塔中地区油田开发的经济评价,对于碳酸盐岩产油气井,单井累积油气当量大于 5×10^4 t的直

井或大于 6.4×10^4 t的水平井为高效井;小于 2.51×10^4 t的直井或小于 3.2×10^4 t的水平井为低效井;两者之间的则为有效井。W15井区(位置参见图1)以串珠状地震相为勘探目标的井超过70%,虽然高效井的比例小于40%,但高效井的油气总产量却占区块总产量的50%以上,因此,高效井直接影响了区块的开发效益。

前人研究表明,高效井与串珠状储层具有密切的关系:串珠状反射特征是判断溶洞型储层分布的必要条件^[5];串珠状反射第一个波谷纵向比较厚,横向延续距离长,储集层最发育,能稳产^[6];利用裂缝综合预测方法可以判别多个“串珠”的连通性,经钻探证实,连通多个“串珠”的油井能高产稳产^[7]。目前研究的重点多集中在裂缝的连通性对油井的高产稳产的影响^[7-8]、断裂系统对油气富集高产的控制^[9-11]以及岩溶储层预测地震技术研究^[5,6,12]等方面,但缺乏对串珠状反射储层自身要素的解剖和分析,对串珠状反射储层与高效井的关系也缺乏细致研究。本文结合塔中西部已钻井资料综合分析,

收稿日期: 2015-08-24; 改回日期: 2015-12-22

本文受国家科技重大专项“塔里木盆地海相碳酸盐岩油气资源潜力、有利区带评价与目标优选”(项目编号: 2011ZX05004004)资助

王平: 1987年生,2014年毕业于中国石油大学(北京),助理工程师,研究方向为油气田开发。通讯地址: 841000 新疆库尔勒中国石油塔里木油田公司勘探开发研究院; E-mail: wp0729@sina.com

利用模型正演、断裂精细解释、储层顶部标定等技术,探讨了碳酸盐岩串珠状地震相储层的自身要素

和高效井的轨迹优化要素,这对碳酸盐岩井位优选具有指导意义。

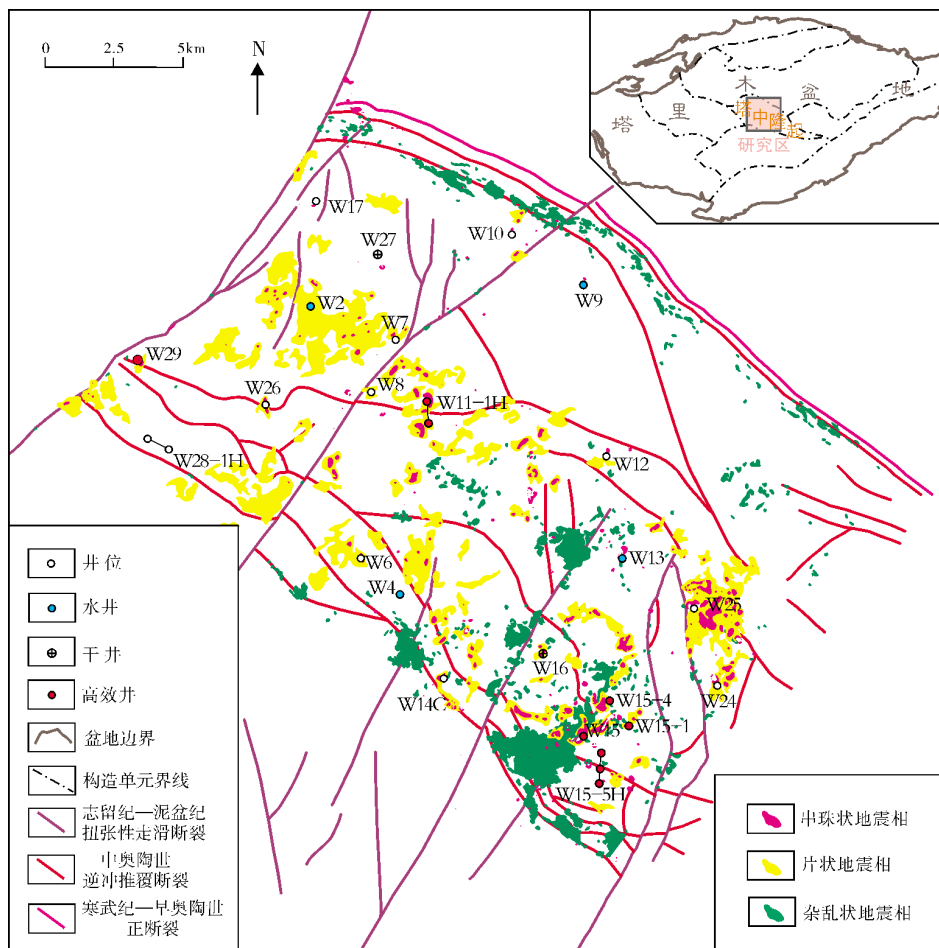


图1 塔中西部断裂分布及中奥陶统一间房组碳酸盐岩地震相分布

2 串珠状地震相储层自身要素

2.1 串珠状地震相峰谷能量指数

碳酸盐岩储层储集空间包括洞穴、孔洞及裂缝,它们可能被泥质完全充填或半充填,使得储层发育好坏参差不齐。储层的发育情况是决定高产高效的重要因素。研究认为串珠状地震相储层的发育程度不仅和串珠反射的总能量正相关,还与其波峰、波谷的强弱组合相关:总能量越强、波峰和波谷振幅的比值越大,储层越发育;波峰和波谷能量都很强时,对应的储层也很发育。为了验证上述观点,本次研究建立二维溶洞模型,进行了模型正演,塔中地区奥陶系碳酸盐岩地层上覆一套稳定的泥岩,基于研究区钻

井的声波曲线统计,设定地震波在泥岩中的传播速度为4 500 m/s,在石灰岩中的传播速度为6 000 m/s,设定溶洞储集体规模10 m×30 m不变,泥质充填程度由0逐渐增大至80%(图2a)。

观察地震响应剖面(图2b)和能量属性图(图2c),可以发现:泥质充填程度越低,其反射能量越强,且储层对应的顶部和底部,反射能量越接近;随着充填程度的逐渐增大,一峰一谷的组合形态逐渐弱化,串珠状反射能量也逐渐变弱,峰谷振幅比值变小,这说明波峰、波谷组合的变化会反映储层顶界在波峰、波谷中位置的变化。

根据正演结果,针对峰谷振幅比值与储层位置的关系,考虑到储层地震相所对应的总体能量的大小,以及波峰、波谷能量的差别,本文提出了峰谷能量指

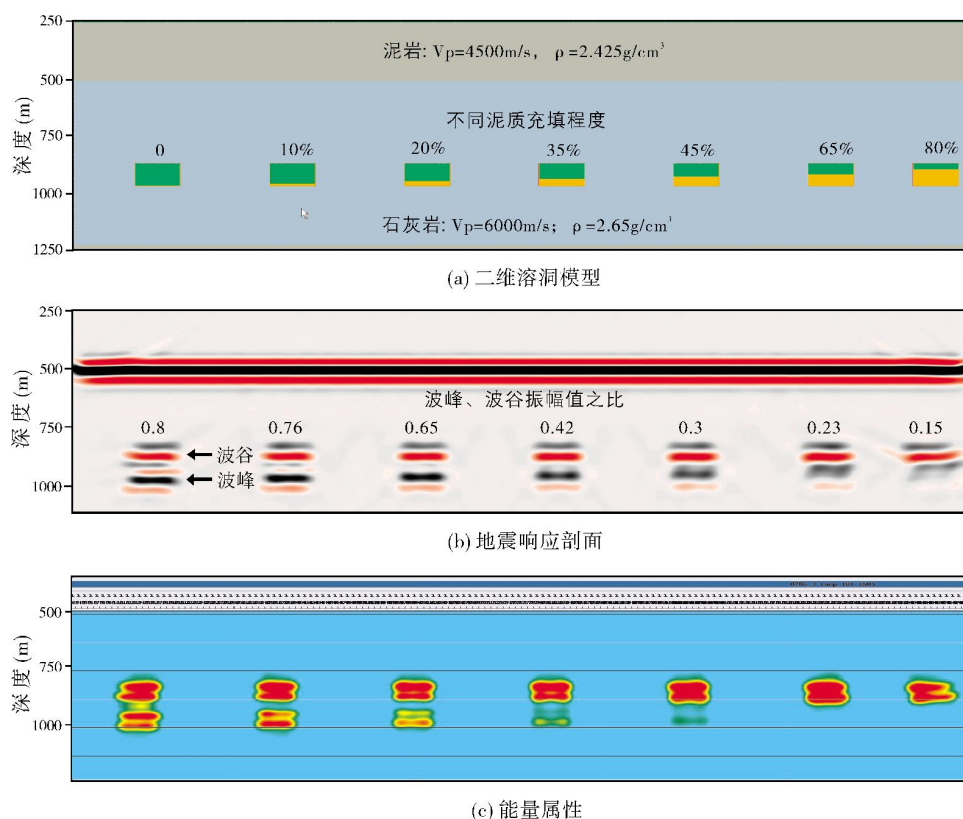


图2 不同充填程度的缝洞体的峰谷形态及能量属性变化

数的概念。峰谷能量指数与波峰振幅值、波谷振幅值有关,且为二者的比值乘以二者的和值,其定义为:

$$R = \left(\frac{P}{T} \right) \times (P+T)$$

式中: R 为峰谷能量指数; P 为波峰振幅值; T 为波谷振幅值。

基于研究区三维地震工区同一批次处理的地震资料,按高效井、有效井、低效井、水井及干井分类,对 52 口井所在井区一间房组串珠状地震相的峰谷能量指数 R 与波谷振幅值 T 进行交会图分析,可分为四个区(图 3)。

I 区: $T > 0.92 \times 10^4$, $R > 1.7 \times 10^4$, 储层发育,高效井主要位于该区,例如高效井 W15 井(图 4a),也有少数水井,与井轨迹、构造位置等其他因素有关。

II 区: $T < 0.92 \times 10^4$, $R > 1.7 \times 10^4$, R 值大但 T 值相对较小,储层完全被泥质充填,以干井 W27 井(图 4b)为代表。

III 区: $1.45 \times 10^4 < R < 1.7 \times 10^4$, 储层以半充填为主,主要评价为低效井,以 W26 井(图 4c)为代表。

IV 区: $0.4 \times 10^4 < R < 1.45 \times 10^4$, 储层不发育或泥质充填程度较高,主要评价为干井,以 W16 井(图 4d)为代表。

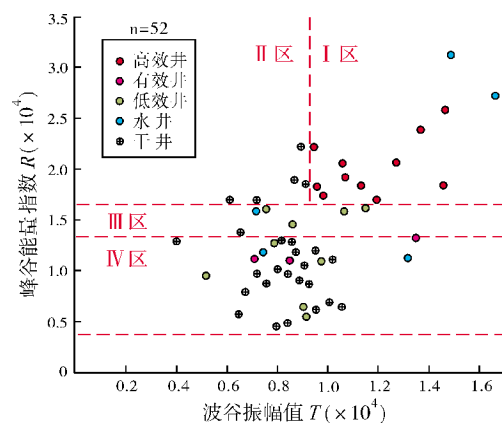
图3 塔中西部一间房组串珠状地震相波谷振幅值(T)与峰谷能量指数(R)交会图

图 4a—4d 是过 4 个分区代表井的地震剖面。图中,紫红色方波曲线为测井解释的储层级别,幅度越大储层越好;蓝色曲线为 GR 曲线,从左至右为 0~100 API,

GR值越大,可半定量地说明储层充填程度越大。

对于串珠状地震相,峰谷能量指数定量表征了

储层的发育程度,再结合振幅值、甜点属性等可有效预测优质储层,从而为优选高效井点奠定基础。

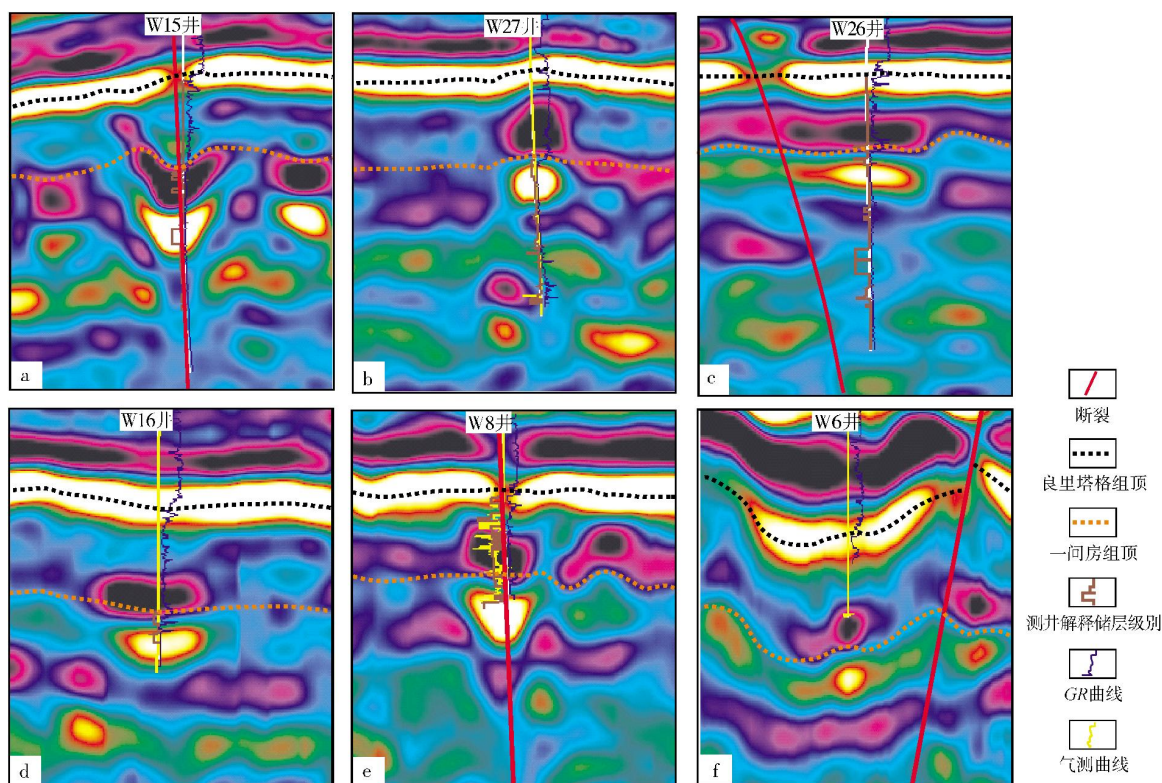


图4 研究区过典型井地震剖面及串珠状地震相储层解释

2.2 串珠状地震相储层发育规模

利用峰谷能量指数一定程度上解决了油气储层好坏的判别问题,但油气储层要达到高产高效,还必须具备一定的储层规模。

串珠状地震相,如果纵向上发育较长串珠,且深部发育断裂或者明显有断裂伴生,它们和周边的异常反射地震相共同构造一个缝洞集合体,那么此类串珠发育规模较大,储集空间较大,供油半径较大,易高产高效。W8井区发育典型的有断裂伴生的串珠(图4e),断裂向上断穿石灰岩顶部,向下延伸很深,串珠周边也有类似串珠的异常反射,该井目前累积油气当量达到 $3.8 \times 10^4 \text{ t}$ 。

没有断裂伴生的串珠往往是比较孤立的小型串珠,发育于地层内部,断裂发育不明显,似孤零零的一串珠子,周边也无其他异常反射衬托,这种串珠储集空间小,油气充注范围有限,形成的油气藏规模小,很难形成高效井。W6井区发育此类串珠(图4f),

串珠发育规模小,累积油气当量仅为 $0.4 \times 10^4 \text{ t}$,产能不足。

由上可见,串珠状地震相附近伴生断裂是否发育,关系到缝洞集合体纵横向的发育规模以及供油半径,这一点对油井高产高效很重要。

3 高效井轨迹优化要素

3.1 串珠状地震相储层的空间位置

缝洞系统,是指同一岩溶背景条件下、受断裂和古水系控制、由孔缝洞构成的缝洞带(体)^[13]。同一缝洞系统内缝洞体的分布特点和走向趋同,地震反射和振幅变化率特征也相似;串珠状地震相分布的部位可能是缝洞发育区;岩溶沟谷部位、振幅变化率边界可作为缝洞系统的边界。如果油井处于缝洞系统的相对高部位,位于油水界面之上,可能获得高产高效;反之,如果油井处于缝洞系统的低部位,位于油水界面之下,则极有可能产水。因此,串珠状地震相

储层能否高产高效, 还与其在整个缝洞系统中的相对空间位置有关。

W15井区的串珠处于所在缝洞系统的高部位(见图5), 累积油气当量已达到近 $20 \times 10^4 \text{ t}$, 不产水。而W15-5H井直井段的串珠处于该缝洞系统低部位(图5), 完钻于该油气藏的油水界面之下, 中途测试日产水 177 m^3 , 不产油气; 后来回填侧钻水平井, 发生井漏, 其水平井的靶点处于缝洞系统的中部, 即处于油藏的中部, 累积油气当量达到近 $7 \times 10^4 \text{ t}$, 初期日产油量近 100 t , 不产水, 属高产高效。因此, 在针对串珠状地震相储层进行钻井设计时, 要考虑靶点在缝洞系统中的构造位置, 避免缝洞系统低部位。

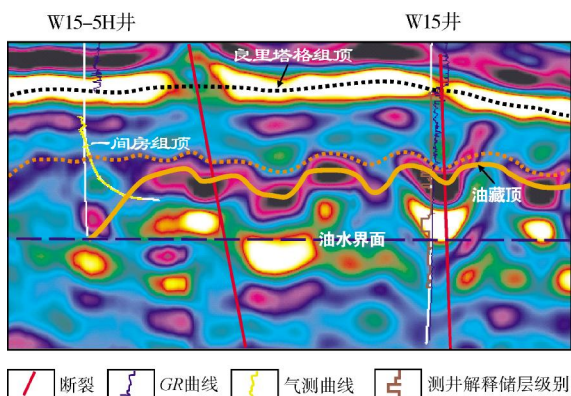


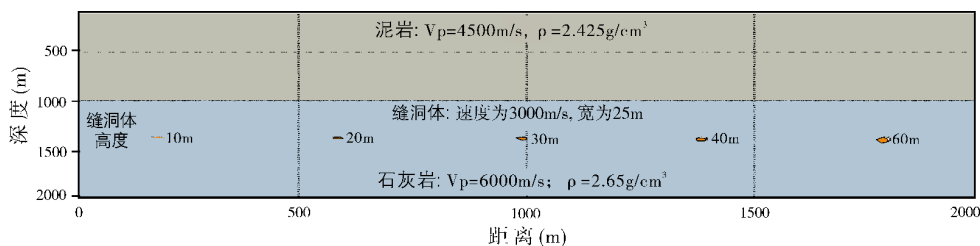
图5 过W15井—W15-5H井地震剖面及一间房组油藏解释

3.2 串珠状地震相储层顶的标定

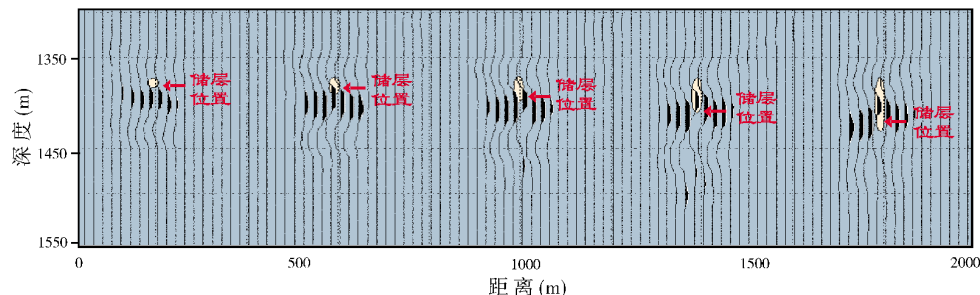
在进行水平井设计时, 准确预测油气藏顶部意义重大: 水平段轨迹设计高了则可能不会钻遇储层; 设计低了则可能钻在油水边界附近, 难以成为高效井。

根据前人的正演模型结果^[5,14], 串珠状地震相储层顶界对应于零相位之上, 随着缝洞体高度的增加, 储层顶部逐渐向最大波谷靠近, 最终位于最大波谷处(图6b中, 白色圈对应储层发育位置)。这跟实际钻探成果基本吻合, 但实际情况还要复杂得多。

W14井完钻于弱串珠的零相位附近(图7), 后期侧钻附近高部位的强串珠, W14C井水平段从波谷中部钻入, 完钻于强串珠的零相位附近(图7)。W14C井钻遇的串珠面积为 0.46 km^2 , 属于比较大的串珠, 该串珠呈台阶状, W14C井轨迹正好从台阶最低处的最大波谷中穿过, 该井气测显示活跃, 说明钻遇了优质储层, 最大波谷附近就是储层顶部, 这与正演模型相符。尽管W14C井初期获得了高产, 但投产不久就因高含水而关井, 说明该井的油柱高度有限, 井底距离油水界面较近。根据地震地质分析, 该油气藏核心部位的顶部比W14C井的靶点高 45 m 左右, 如果从核心部位顶部钻进, 则很有可能成为高效井。因此, 对于强串珠, 水平井的水平段轨迹设计在最大波谷处较为合适, 而对于弱串珠, 水平井的水平段轨迹设计于最大波谷之下和零相位之上比较合适。



(a) 二维溶洞高度变化模型



(b) 模拟叠合偏移剖面

图6 串珠状地震相储层顶标定模型正演(据文献[5]修改)

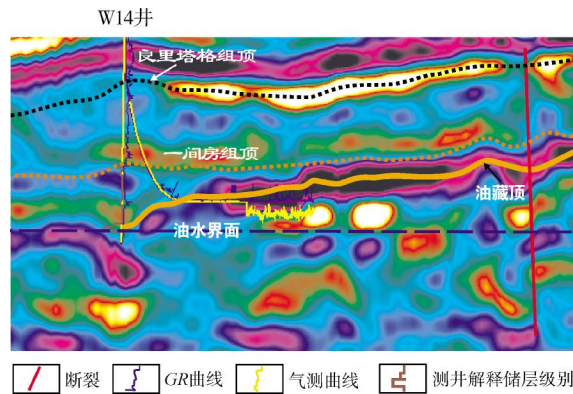


图7 过W14井地震剖面及一间房组油藏解释

4 应用效果

依据串珠状地震相储层要素和高效井轨迹优化

要素,对研究区10口单井进行了统计分析(表1)。

从表中可以看到:

(1)当串珠状地震相储层峰谷能量指数大于17 000、伴生断裂发育、且处于缝洞体系的高部位、井的轨迹位于储层顶部,这四项要素均匹配时,多数单井为高效井,如W15井等;少数为有效井,如W17井。

(2)串珠状地震相储层位于缝洞系统中的相对低部位或井的轨迹位于储层下部时,井底离油水界面较近,油柱高度低,含水上升快,易表现为低效井或水井,如W26井为低效井,W15-5H导眼井为水井。

(3)峰谷能量指数小或伴生断裂不发育时,储层基本不发育或发育规模有限,主要表现为干井,如W16井等。

表1 研究区一间房组串珠状地震相储层要素和高效井轨迹优化要素统计分析

序号	井 名	串珠状地震相储层要素		高效井轨迹优化要素		效益评价
		峰谷能量指数 >17000	伴生断裂发育	空间位置高	储层顶部	
1	W15井	√	√	√	√	高效井
2	W29井	√	√	√	√	
3	W15-5H水平井	√	√	√	√	
4	W17井	√	√	√	√	有效井
5	W15-5H导眼井	√	√	×	√	水井
6	W26井	√	√	×	√	低效井
7	W4井	√	×	√	√	
8	W14C井	√	√	√	×	
9	W16井	×	×	√	√	干井
10	W27井	√	×	√	√	

5 结 论

(1)提出了储层地震相峰谷能量指数的概念,它能够定量表征缝洞型储层的发育程度。波谷振幅值大于9 200、峰谷能量指数大于17 000的串珠状强反射地震相,储层发育,易产生高效井。

(2)断裂是串珠状强反射地震相优质储层发育的重要因素。有断裂伴生的串珠反射,纵横向发育规模大,储集空间较大。

(3)高效井轨迹优化要素有二:一是串珠状强反射地震相储层要位于缝洞系统中的相对高部位;二是对于强串珠,水平井水平段轨迹应设计在最大波谷处,而对于弱串珠,水平井的水平段轨迹应设计在最大波谷之下的零相位之上。

参 考 文 献

[1] 张正红,赵治信,潘文庆,等.塔中北斜坡中奥陶统一间房组划分对比及分布[J].地层学杂志,2015,39(3):274-282.

[2] 韩杰,江杰,潘文庆,等.塔中西部奥陶系桑塔木组底界灰岩

- 段的识别及沉积学意义[J]. 天然气地球科学, 2014, 25(4): 490-497.
- [3] 李凡异, 魏建新, 狄帮让, 等. 溶洞地震波“串珠状”形成机理及识别方法[J]. 中国西部油气地质, 2006, 2 (4): 421-426.
- [4] 李凡异, 魏建新, 狄帮让, 等. 碳酸盐岩溶洞的“串珠”状地震反射特征形成机理研究[J]. 石油地球物理勘探, 2012, 47(3): 385-391.
- [5] 刘鑫, 敬兵, 孙东, 等. 塔中西部碳酸盐岩高效井地震波反射特征[J]. 新疆石油地质, 2011, 32(3): 302-304.
- [6] 杨平, 孙赞东, 梁向豪, 等. 缝洞型碳酸盐岩储集层高效井预测地震技术[J]. 石油勘探与开发, 2013, 40(4): 502-506.
- [7] 邬光辉, 岳国林, 师骏, 等. 塔中奥陶系碳酸盐岩裂缝连通性分析及其意义[J]. 中国西部油气地质, 2006, 2(2): 156-159.
- [8] 韩杰, 江杰, 张敏, 等. 断裂及其裂缝发育带在塔中油气勘探中的意义[J]. 西南石油大学学报: 自然科学版, 2015, 37(2): 11-20.
- [9] Aydin A. Fracture, faults, and hydrocarbon entrapment, migration and flow[J]. Marine and Petroleum Geology, 2000, 17(7): 797-814.
- [10] Perez R J, Boles J R. Mineralization, fluid flow, and properties associated with an active thrust fault: San Joaquin basin, California[J]. AAPG Bulletin, 2004, 88(9): 1295-1314.
- [11] 张保涛, 于炳松, 朱光有, 等. 塔中北斜坡富油气区油气分布规律与富集主控因素研究[J]. 地学前缘, 2015, 22(1): 271-280.
- [12] 李毓丰, 顾乔元, 徐彦龙, 等. 碳酸盐岩洞穴型储层地震综合预测[J]. 海相油气地质, 2015, 20(2): 72-78.
- [13] 鲁新便. 缝洞型碳酸盐岩油藏开发描述及评价[D]. 成都: 成都理工大学, 2004.
- [14] 孙东, 张虎权, 潘文庆, 等. 塔中地区碳酸盐岩洞穴型储集层波动方程正演模拟[J]. 新疆石油地质, 2010, 31(1): 44-46.

编辑: 董庸

Characteristics Study of Moniliform Seismic Facies and Optimization for Efficient Well Trajectory in Carbonate Reservoirs: A Case of Ordovician Reservoirs in the West of Tazhong Uplift, Tarim Basin

Wang Ping, Hu Taiping, Xie En, Jiang Jie, Zhang Min, Ding Zhaoyuan, Qi Fenglin

Abstract: According to seismic, well logging and production data, the relationship between moniliform seismic-facies Ordovician carbonate reservoirs and efficient wells is studied in the west of Tazhong Uplift, Tarim Basin. It is proved that carbonate reservoirs mostly develop in those strong seismic-facies beads that is characterized by the basic factors: (1) peak to trough amplitude index more than 17000, (2) developing associated faults, (3) in relatively high locations of fractured-vuggy system, and (4) the well trajectory of target zone at the tops of reservoirs. These are the important prerequisites for keeping long period of high and stable yield.

Key words: Carbonate reservoir; Seismic facies; Efficient well trajectory; Tarim Basin

Wang Ping; Assistant Engineer. Add: Research Institute of Exploration and Development, PetroChina Tarim Oilfield Company, Korla, Xinjiang, 841000, China