

四川盆地致密砂岩地震岩石物理分析及储层预测方法优选

纪 智

(大庆油田有限责任公司勘探开发研究院, 大庆 163712)

摘要: 四川盆地 HC 区块须家河组二段岩性是以岩屑长石砂岩和长石岩屑砂岩为主, 具有低孔低渗的致密砂岩储层特征, 储层物性变化大, 纵波阻抗叠置, 基于叠后反演方法进行储层预测多解性强。为降低勘探风险, 提高井位部署成功率, 利用地震岩石物理分析技术, 优选 Raymer 层状模型建立地震岩石物理解释图版, 采用 Gassmann 方程进行孔隙流体置换, 并利用置换后的结果做 AVO 正演属性分析。通过以上详实分析, 须二段含气储层顶面 AVO 类型为 IV 类 AVO, 孔隙流体变化不会引起 AVO 类型改变; 同时明确了纵横波速度比和纵波阻抗双参数为储层敏感弹性参数, 优选了储层预测方法。笔者的研究成果预测了四川盆地 HC 区块须二段致密砂岩含气储层厚度分布, 并提交了两口井位, 预测结果与实钻数据吻合较好, 目前该方法已经在相似地质条件的致密砂岩储层中广泛应用。

关键词: 四川盆地; 岩石物理分析; 储层预测; Raymer 层状模型; 流体置换; AVO 属性
中图分类号: P631.4 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-1749.2024.05.02

0 引言

随着油气勘探进程的逐步深入, 勘探方向从构造油气藏向岩性油气藏和非常规油气藏转变。近几年, 以致密砂岩油气和页岩油气为代表的非常规油气藏的规模勘探, 加速了国内非常规油气的勘探进程。目前, 国内外针对非常规油气藏的精细开发主要是采用大面积水平井部署的方法, 这对非常规储层预测方法选择和预测精度提出了更高的要求^[1]。

地震岩石物理是建立地下地层中岩石赋存状态与地震弹性特征参数的确定性关系, 为从地震弹性参数中提取岩石岩性及流体特征奠定基础。特别是在非常规勘探中, 地震岩石物理分析已经成为该领

域储层预测的基础, 地震岩石物理建模又是岩石物理分析的核心工作。SINGLETON S 等^[2]通过岩石物理分析, 确定泥质含量会引起弹性参数异常, 同时也证明了将岩石物理融合到储层预测中的必要性; ACEVEDO H 等^[3]利用纵横波速度比与岩性的关系预测了储层分布情况; DAVID 等^[4]利用 AVO 反演技术描述了致密砂岩储层特征; 边婧^[5]针对松辽盆地北部的非常规致密砂岩给出了岩石物理特征分析方法。对于非常规致密砂岩和页岩油气藏, 具有矿物种类多、孔隙度低等储层特征, 岩性、物性和孔隙流体的变化会导致地震岩石物理规律更加的复杂, 无法采用常规岩石物理分析方法进行“甜点”储层预测, 必须针对特定地质条件下的实际数据开展详细研究。

收稿日期: 2023-06-06

基金项目: 中央引导地方科技发展专项“黑龙江省陆相页岩油重点实验室”(ZY20B13)

作者简介: 纪智(1989—), 男, 硕士, 工程师, 主要从事地震资料解释、储层预测和岩石物理分析工作, E-mail: jizhidq@pet-rochina.com.cn。

四川盆地 HC 区块上三叠统须家河组为内陆湖交替的陆源碎屑岩沉积,是含油气层的主要储集层段。HC 区块须家河组纵向上自下而上划分为六段,须二段岩性以灰色中粒、中~细粒岩屑长石砂岩、长石岩屑砂岩、岩屑石英砂岩为主(图 1),目前是开发的主力产层。HC 工区须二段埋深在 1 700 m~1 900 m,厚度在 80.2 m~138.5 m 之间,单砂层厚度为 1 m~5 m,砂岩总厚度在 10 m~30 m 之间。储层孔隙度主要集中分布在 8%~12%之间,平均总孔隙度为 10%。储层渗透率主要集中在 0.01 mD~0.16 mD,属于典型的低孔低渗致密砂岩储层^[6-8]。

本研究区工作开展前,该区块共钻遇目的层 8

口井,所有井均可钻遇砂岩,但 6 口井钻遇含气砂岩,2 口井未钻遇气层,主要是由于储层属于低孔低渗,物性差异变化大,成藏条件复杂,利用叠后反演储层预测的方法可以区分,渗透性砂岩和泥岩,但含气砂岩和含水砂岩均具有低纵波阻抗的特点,单独依靠叠后反演的方法无法有效划分“甜点”储层(图 2)。因此,储层预测的重心,应该从岩性预测向含气有效储层预测转移。笔者通过地震岩石物理技术,将地震反射信息与岩性、物性、含油气性等地质油藏参数相结合,通过建立地震岩石物理解释图版,对须二段储层顶面 AVO(Amplitude Versus Offset)响应特征和含油气性进行详细分析,最终确定该研究区储层预测方法,降低勘探风险,提高井位部署成功率。

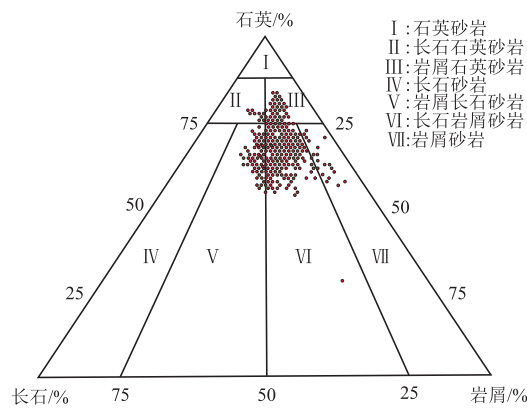


图 1 须二段气藏储集岩成因类型三角图

Fig. 1 Triangular map of reservoir rock genetic type of the second member of Xujiahe gas reservoir

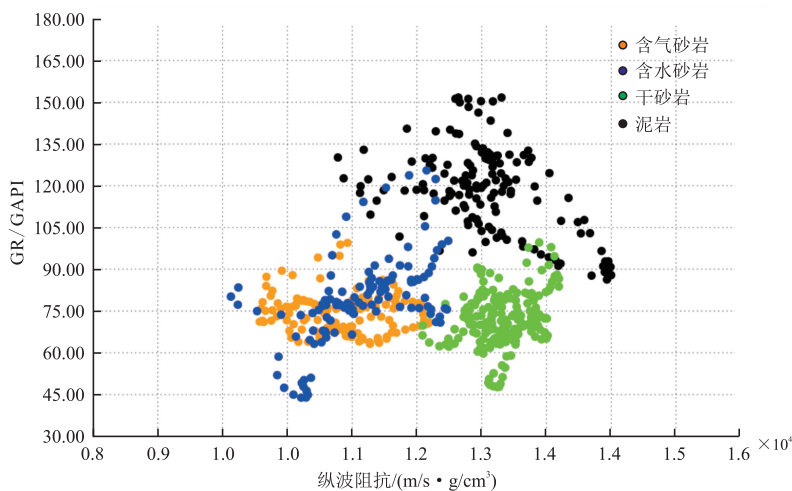


图 2 GR-纵波阻抗交会图

Fig. 2 GR-P-wave impedance crossplot

1 地震岩石物理分析

1.1 地震岩石物理模型优选

地震岩石物理分析一般采用地震岩石物理模型法进行理论研究,该方法是将地下地层中的岩石通过物理学公式进行数字模拟,建立弹性参数与岩石的通用关系。通常将岩石分为岩石骨架、孔隙及孔隙流体三部分,通过孔隙形状、岩石骨架颗粒之间的接触关系、岩石骨架颗粒的排列方式的不同,将地震岩石物理模型可以分为四类:层状模型、球形孔隙度模型、包含体模型和接触模型^[9-11]。

层状模型是在各项同性的基础上,岩石骨架由不同的均匀弹性矿物组成,岩石各矿物组分呈层状排列,层状模型适合于计算满足相应模型条件的岩石骨架弹性参数。球形孔隙度模型是将岩石分为岩石矿物组分、孔隙和孔隙流体三部分,所有孔隙之间均为连通孔,孔隙中饱含流体,球形孔隙度模型主要是用于计算孔隙中饱含流体的岩石弹性参数。包含体模型是岩石由岩石骨架颗粒、包含体和孔隙流体组成,所有包含体均是独立的,呈球形或椭球形,同时整个模型具有和等效介质相同的弹性参数性质,这类模型适合计算饱含流体的岩石速度和地震速度。接触模型是将岩石骨架颗粒是由很多相似的球体组成,主要是为了研究不同弹性颗粒物质的等效特性,这种模型适合为非固结储层估算地震速度,接触模型在实际岩石物理分析中很少使用。

四川盆地 HC 区块须二段埋深在 1 700 m 以上,受胶结和压实作用的影响,研究区目的层段砂岩已固结成岩,岩石分选磨圆较好,各矿物组分之间呈层状分布,具有低孔低渗的物性特征,为更好地分析研究区

内岩石物理特征,对比分析不同类型岩石物理模型,优选 Raymer 层状模型^[12]进行岩石物理分析。

Raymer 层状模型适用于岩石为流体饱和,在足够高的有效压力下具有“端点速度”,通常在 30 MPa 的量级上,大部分岩石速度与压力呈正相关关系,这是由于孔隙中柔软的和裂缝状的部分逐步闭合造成的,所有裂缝状孔隙空间已闭合,因为孔隙空间的柔性部分会对速度产生很大的影响,该模型适合矿物呈层状排列的低—中孔隙度固结的岩石,与本研究区的岩石物理特征基本一致,因此,也最适合做本次研究的岩石物理理论模型。

Raymer 层状模型是在 Wyllie 经验速度—传播时间经验公式^[13-15]的基础上进行改进,公式如下:

$$V = (1 - \phi)^2 V_0 + \phi V_{fl}, \phi < 37\% \quad (1)$$

$$\frac{1}{\rho V^2} = \frac{\phi}{\rho_{fl} V_{fl}^2} + \frac{1 - \phi}{\rho_0 V_0^2}, \phi > 47\% \quad (2)$$

其中, V 、 V_{fl} 和 V_0 分别是岩石、孔隙流体和矿物的速度, ρ 、 ρ_{fl} 和 ρ_0 分别为岩石、流体和矿物的密度。

通过公式(1)和公式(2)进行简单的内插得到三个模型公式:

$$\frac{1}{V} = \frac{0.47 - \phi}{0.10} \frac{1}{V_{37}} + \frac{\phi - 0.37}{0.10} \frac{1}{V_{47}} \quad (3)$$

其中, V_{37} 是用低—中孔隙度公式在 $\phi = 0.37$ 时计算的岩石速度, V_{47} 是用高孔隙度公式在 $\phi = 0.47$ 时计算的岩石速度。

1.2 地震岩石物理分析应用

基于地震岩石物理模型优选成果,把实际地下储层的岩石矿物组分、孔隙度、孔隙流体饱和度等参数输入,然后选用 Raymer 层状模型在改变储层参数条件下进行弹性参数计算,通过调整骨架参数,让模型数据和实际数据达相关性最大值,所获得的骨架

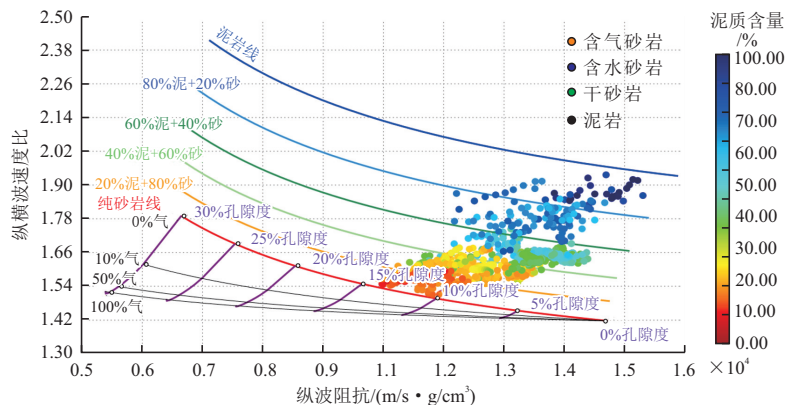


图3 地震岩石物理解释图版

Fig. 3 Seismic rock physics interpretation chart

参数就是最优化骨架参数。实际上,地震岩石物理解释图版建立,是根据地下地层中流体温度、压力等基础参数,给定储层实测的泥质含量、孔隙度、含气饱和度,通过正演计算得到岩石弹性参数响应^[16]。

图 3 为四川盆地 HC 区块须二段纵波阻抗与纵横波速度比的地震岩石物理解释图版,图版中线条为利用 Raymer 层状模型建立的理论线,散点为工区中重点井资料交会点。利用工区中实测横波重点井资料,对地震岩石物理解释图版进行标定,两者的一致性较好,说明该图版准确可行。

应用图 3 中所建立的地震岩石物理解释图版对实际井资料进行定量解释分析,通过综合解释结论将须二段岩性划分为砂岩和泥岩,其中砂岩细分为干砂岩和渗透性砂岩。如图 4 所示,该区块泥岩具

有纵横波速度比大于 1.72、纵波阻抗大于 $12\ 400\ \text{m/s} \cdot \text{g/cm}^3$ 的弹性特征,划分符合率为 80%;砂岩纵横波速度比小于 1.72,纵波阻抗分布范围较广,从 $11\ 000\ \text{m/s} \cdot \text{g/cm}^3$ 至 $15\ 800\ \text{m/s} \cdot \text{g/cm}^3$;通过总孔隙度和纵波阻抗的变化可以区分干砂岩和渗透性砂岩,干砂岩具有总孔隙度介于 $0\sim 6\%$ 、纵波阻抗大于 $13\ 200\ \text{m/s} \cdot \text{g/cm}^3$,划分符合率 90%;渗透性砂岩总孔隙度介于 $6\%\sim 12\%$ 之间,纵波阻抗小于 $13\ 200\ \text{m/s} \cdot \text{g/cm}^3$,划分符合率为 80%。渗透性砂岩分为含气砂岩和含水砂岩两部分,含气砂岩和含水砂岩纵波阻抗叠置,纵横波速度比含水砂岩略大于含气砂岩。下文中将针对实际井资料进行 AVO 正演属性分析,明确目标区储层中不同孔隙流体的 AVO 属性类型。

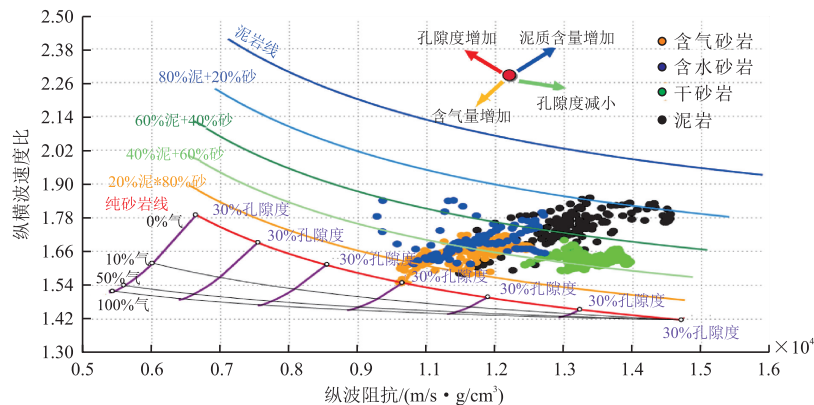


图 4 地震岩石物理解释图版定量解释分析

Fig. 4 Quantitative interpretation and analysis of seismic rock physics interpretation chart

2 AVO 正演属性分析

2.1 AVO 正演属性分析原理

在沉积岩储层中最常用判别岩性和孔隙流体的方法是采用 AVO 正演属性分析法,该方法是以弹性波动理论为指导,利用不同岩性和孔隙流体对地震反射振幅能量随偏移距的变化而改变这一特征进行研究^[17-18]。AVO 正演属性分析法分为两部分,首先需要将井数据进行正演,再对正演道集进行 AVO 异常响应特征分析。井数据正演一般是利用 Zoeppritz 方程获得正演道集,该方程详细地阐述了在有地震波阻抗差的界面,入射纵波和横波产生的透射和反射纵波和横波振幅的全部可能性^[19-20]。但 Zoeppritz 方程关系复杂,不利于在实际生产中应用,为了便于应用 Shuey 将 Zoeppritz 方程进行了简化,简化后的公式称为 Shuey 二项式,该二项式为:

$$R(\theta) \approx P + G \sin^2 \theta \quad (4)$$

其中, R 为界面反射系数, P 为纵波反射系数(截距), G 为斜率(梯度), θ 为入射角。

Shuey 二项式适用于地震波入射角度小于 30° 的叠前道集正演分析^[21],四川盆地 HC 区块叠前道集入射角为 28° ,因此笔者直接采用 Shuey 二项式进行 AVO 正演分析。

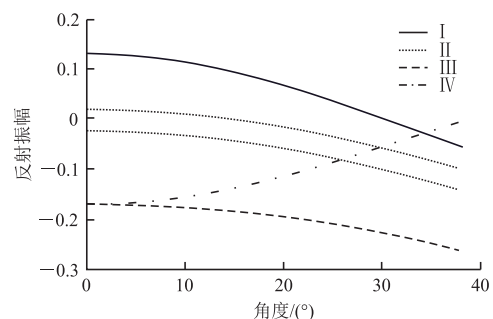


图 5 AVO 特征响应类型

Fig. 5 AVO characteristic response type

井数据正演道集结合目的层储层特征分析不同岩石组分和孔隙流体下的 AVO 异常响应特征,将这些 AVO 异常响应特征进行梳理分类和整合,建立相应的检测标准,有利于实际地震道集直接进行孔隙流体识别。通常我们将 AVO 特征响应划分为四类^[22-23]。

图 5 中 I 类 AVO 类型为零炮检距反射振幅为较大的正值,随着角度/偏移距增大,反射振幅呈减小趋势,当角度/偏移距足够大时,会出现振幅值为负的极性反转现象。II 类 AVO 类型零炮检距反射振幅趋近于零,当零炮检距反射振幅为正值时,反射振幅呈减小趋势,很快会发生极性反转现象,反转后绝对值呈增大趋势;当零炮检距反射振幅为负值时,随着偏移距的增

大,反射振幅绝对值呈增大趋势。III 类 AVO 类型零炮检距反射振幅为很强负极性,反射振幅绝对值呈增大趋势。IV 类 AVO 类型与 III 类 AVO 类型零炮检距反射振幅强度相近,反射振幅绝对值呈减小趋势。

2.2 AVO 正演属性分析应用

四川盆地须家河组二段为陆相沉积,AVO 响应特征为薄互层调谐干涉后的一个综合响应特征。为明确目标层段储层孔隙流体 AVO 特征,首先对目标区内的 8 口含有实测横波井的 13 个储层顶面进行 AVO 正演属性分析。本次研究选用 40 Hz 主频的雷克子波进行 Shuey 二项式进行正演模拟,分写结果见表 1。

表 1 研究区 8 口井 AVO 类型分析

Tab. 1 AVO type analysis of 8 wells in the study area

井号	地层	厚度/m	含气性	AVO 类型
HC1	须二 3 段	7.1	水层	II
	须二 2 段	12.6	气水同层	IV
HC2	须二 1 段	5.6	水层	IV
	须二 2 段	4.7	气层	IV
HC3	须二 1 段	5.8	气水同层	IV
	须二 2 段	8.7	水层	IV
HC4	须二 2 段	4.2	气层	IV
	须二 1 段	5.5	气水同层	IV
HC5	须二 2 段	11.2	气水同层	IV
	须二 1 段	6.2	水层	IV
HC6	须二 2 段	14.2	气层	IV
	须二 2 段	7.9	气层	IV
HC7	须二 2 段	5.3	气水同层	IV
	须二 1 段			

须二段 8 口井 13 个储层中 IV 类 AVO 响应特征为 12 个,II 类 AVO 响应特征为 1 个。9 个含气储层均为 IV 类 AVO 响应特征,4 个水层分别为 3 个 IV 类和 1 个 II 类 AVO 响应特征,为明确储层孔隙流体的改变对 AVO 响应特征类型的影响,笔者采用储层流体置换的方法进行分析。

3 流体置换分析

3.1 流体置换原理

在地震储层预测中,技术人员最为关注储层的岩性、物性、孔隙流体等参数的变化,这些变化会引发弹性参数的改变,从而改变了储层的地震响应特征。只要理解储层参数与地震响应特征的关系,就有利于指导含油气储层的预测。通过改变储层中的孔隙流体性质,来研究四川盆地须二段储层弹性参数及地震响应特征的变化规律。孔隙流体的改变会

引起孔隙刚性的变化,孔隙刚性会直接影响地震弹性参数。体积模量一般受岩石骨架和孔隙流体的影响,剪切模量一般只受岩石骨架的影响,因此,孔隙流体置换会影响岩石的体积模量,对剪切模量的影响可以忽略^[24]。

孔隙流体置换分析以地震岩石物理理论模型为基础,通常与地震正演方法相结合,通过比较不同孔隙流体对地震响应特征的影响,从而定量地解释了地下储层中的孔隙流体性质。目前最常用的流体置换分析方法为 Gassmann 方程法^[25]。该方法完全与孔隙几何形态无关,适用于地震频率小于 100 Hz 的地震资料中,四川盆地地震资料满足 Gassmann 方程所需全部条件。已知实际地下岩石的纵波速度、横波速度和密度三个重要参数,通过地震波在地下弹性介质中传播速度的关系,反算得出地下实际岩石的体积模量和剪切模量,然后改变孔隙流体含量,通过 Gassmann 方程计算

孔隙流体性质改变后新岩石的体积模量和剪切模量,通过转换从而得到新岩石的纵波速度、横波速度和密度。通过流体置换的方法,可以将不同孔隙流体对岩石弹性参数的影响直观的反应出来,进而对储层弹性特征进行评价和分析。实现过程见图 6,图中 K_1 、 K_2 分别是含流体 1 和 2 的岩石体积模量, K_{f1} 、 K_{f2} 分别是流体 1 和 2 的体积模量, ρ_1 、 ρ_2 分别是含流体 1 和 2 的岩石密度, ρ_{f1} 、 ρ_{f2} 分别是流体 1 和 2 的密度, K_{min} 、 ϕ 是矿物的体积模量和孔隙度。

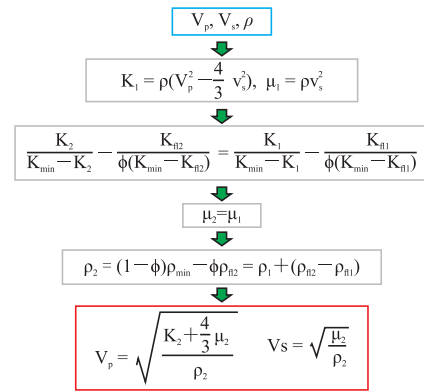


图 6 流体置换流程图

Fig. 6 Fluid displacement flow chart

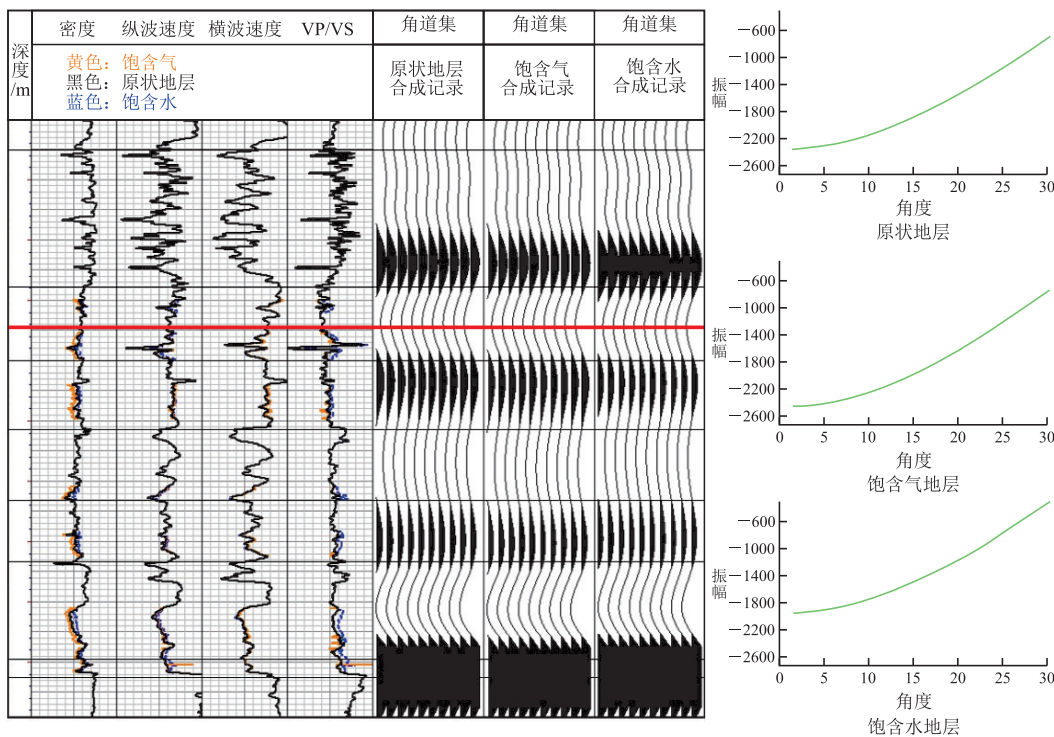


图 7 HC1 井流体替换正演模拟 AVO 属性分析

Fig. 7 AVO attribute analysis of fluid replacement forward modeling in well HC1

3.2 流体置换分析应用

为了明确目标区储层流体变化对 AVO 响应特征的影响,将流体置换和 AVO 正演属性分析相结合。根据实际数据设计正演模型,利用 Gassmann 方程进行孔隙流体置换方法将原状地层替换为饱和气地层和饱和水地层,通过 Shuey 公式计算正演道集,然后提取储层顶面的 AVO 响应特征进行详细分析。

HC1 井在须二 2 段存在一套 12.6 m 厚的含 50% 气的储层,将储层进行流体替换,流体替换正演

结果见图 7。

图 7 中原状地层、饱和气地层和饱和水储层顶面 AVO 响应特征为零炮检距反射振幅为很强负极性,随着偏移距的增加,反射振幅绝对值变小,同一储层顶面不同流体饱和度的 AVO 响应特征均为 IV 类 AVO。当地层饱和水时,反射振幅绝对值远小于含气地层;随着含气量的增加零炮检距反射振幅绝对值小幅增大。

须二段分为三个亚段,下部须二 1、须二 2 亚段的储层物性好于上部须二 3 亚段。表 1 中 II 类

AVO 响应特征在须二 3 段产生, 由于储层流体的改变不会改变 AVO 响应特征, 因此, 该 AVO 响应特征的变化是受物性条件变化所引起的。

4 储层预测方法优选及应用

四川盆地 HC 区块须家河组二段致密气藏储层流体特征, 泥岩和砂岩纵波阻抗叠置, 纵横波速度比可以区分砂泥岩, 纵波阻抗可以区分渗透性砂岩和干砂岩, 含水砂岩纵横波速度比和纵波阻抗略大于含气砂岩, 砂岩含气量随着纵横波速度比和纵波阻抗的降低而增加, AVO 响应特征类型无法区分孔隙流体特性, 振幅绝对值越大含气饱和度越高。根

据以上结论, 目标区在叠后纵波阻抗反演的基础上, 结合叠前弹性参数反演的方法进行“甜点”刻画储层预测。

应用叠后叠前反演结合的方式在目标区进行有利砂岩储层预测, 给出了该区块“甜点”雕刻的纵波阻抗和纵横波速度比的阈值, 得到预测含气砂岩概率剖面图(图 8)和含气概率 50% 以上刻画的含气砂岩储层厚度分布平面图(图 9)。由图中可见, 该区块有利储层具有纵向上多层含气砂岩叠置, 平面上东北部含气砂岩较为发育的特点, 含气砂岩厚度 6 m~16 m 之间。在该区块的东北部部署了 SJ1 井和 SJ2 井, 经钻井验证, 2 口井均获得 $5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 以上的工业气流。

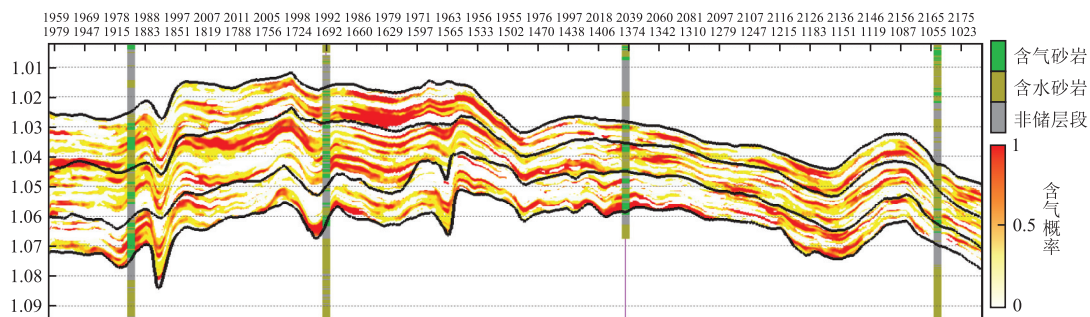


图 8 含气砂岩概率剖面图

Fig. 8 Probability profile of gas-bearing sandstone

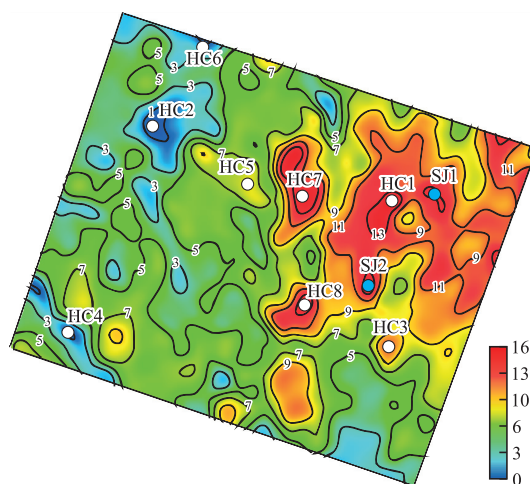


图 9 含气砂岩储层厚度分布平面图

Fig. 9 Thickness distribution plan of gas-bearing sandstone reservoir

5 结论

1) 四川盆地 HC 区块须二 2 和须二 1 亚段渗透性砂岩顶面 AVO 响应特征类型为 IV 类 AVO, 须

二 3 亚段渗透性砂岩顶面 AVO 响应特征类型为 II 类 AVO。

2) 受低孔低渗储层岩性和物性的影响, AVO 响应特征类型不会随着孔隙流体性质的改变而改变, 振幅绝对值可以区分水层和含气层, 振幅绝对值

越大,储层含气饱和度越高。

3)通过地震岩石物理解释图版得出,纵横波速度比和纵波阻抗双参数为敏感弹性参数,纵横波速度比和纵波阻抗越低,储层含气饱和度越高,目标区块采用叠后纵波阻抗反演和叠前弹性参数反演相结合的方法进行储层预测取得了良好的效果,该方法可在相似地质条件地区进行推广。

参考文献:

- [1] 赵海波,唐晓花,李奎周,等. 基于地震岩石物理分析与叠前地质统计学反演技术的齐家地区致密薄储层预测[J]. 石油物探, 2017, 56(6): 853—862.
ZHAO H B, TANG X H, LI K Z, et al. Tight thin-bed reservoir prediction using rock physics analysis and prestack geostatistical inversion in the Qijia area[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2017, 56(6): 853—862. (In Chinese)
- [2] SINGLETON S, KEIRSTEAD R. Calibration of prestack simultaneous impedance inversion using rock physics[J]. The Leading Edge, 2011, 30(1): 70—78.
- [3] ACEVEDO H, PENNINGTON W D. Porosity and lithology prediction at Caballos Formation in the Puerto Colón Oil Field in Putumayo (Colombia) [J]. The Leading Edge, 2003, 22(11): 1135—1141.
- [4] CLOSE D, STIRLING S, CHO D, et al. Tight gas geophysics; AVO inversion for reservoir characterization[J]. CSEG Recorder, 2010, 35(5): 28—35.
- [5] 边婧. 地震岩石物理分析在致密砂岩储层预测中的应用[J]. 东北石油大学学报, 2015, 39(5): 63—70.
BIAN J. Application of rock physics analysis in the prediction of tight sandstone reservoirs[J]. Journal of Northeast Petroleum University, 2015, 39(5): 63—70. (In Chinese)
- [6] 巫芙蓉,李亚林,王聃,等. AVO属性在致密砂岩储层流体检测中的应用[J]. 天然气工业, 2011, 31(5): 55—57.
WU F R, LI Y L, WANG D, et al. Application of AVO attribute to the detection of tight sandstone reservoirs[J]. Natural Gas Industry, 2011, 31(5): 55—57. (In Chinese)
- [7] 巫芙蓉,邓雁,梁虹,等. 川南河包场构造须二段有效储层地震预测[J]. 天然气工业, 2007, 27(6): 52—53.
WU F R, DENG Y, LIANG H, et al. Seismic prediction of effective reservoirs in the second member of Xujiahe Formation ($t_3 x_2$) in hebaochang structure, the southern Sichuan Basin [J]. Natural Gas Industry, 2007, 27(6): 52—53. (In Chinese)
- [8] 魏国齐,杨威,金惠,等. 四川盆地上三叠统有利储层展布与勘探方向[J]. 天然气工业, 2010, 30(1): 11—14.
WEI G Q, YANG W, JIN H, et al. Distribution of favorable reservoirs and exploration targets in the Upper Triassic of the Sichuan Basin [J]. Natural Gas Industry, 2010, 30(1): 11—14. (In Chinese)
- [9] 马淑芳,韩大匡,甘利灯,等. 地震岩石物理模型综述[J]. 地球物理学进展, 2010, 25(2): 460—471.
MA S F, HAN D K, GAN L D, et al. A review of seismic rock physics models [J]. Progress in Geophysics, 2010, 25(2): 460—471. (In Chinese)
- [10] 刘浩杰. 地震岩石物理研究综述[J]. 油气地球物理, 2009, 7(3): 1—8.
LIU H J. Summarization of Seismic Rock Physics Research [J]. Petroleum Geophysics, 2009, 7(3): 1—8. (In Chinese)
- [11] 印兴耀,李龙. 基于岩石物理模型的纵、横波速度反演方法[J]. 石油物探, 2015, 54(3): 249—253.
YIN X Y, LI L. P-wave and S-wave velocities inversion based on rock physics model [J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2015, 54(3): 249—253. (In Chinese)
- [12] RAYMER L, HUNT E, GARDNER J. An improved sonic transit time-to-porosity transform [C]//SPW-LA. 21st Annual Logging Symposium. USA: SPW-LA, 1980: 11—24.
- [13] WYLLIE M R J, GREGORY A R, GARDNER L W. Elastic wave velocities in heterogeneous and porous media [J]. Geophysics, 1956, 21(1): 41—70.
- [14] WYLLIE M R J. An experimental investigation of factors affecting elastic wave velocities in porous media [J]. Geophysics, 1958, 23(3): 459.
- [15] WYLLIE M R J, GARDNER G H F, GREGORY A R. Studies of elastic wave attenuation in porous media [J]. Geophysics, 1962, 27(5): 569—589.
- [16] 姜仁,曾庆才,黄家强,等. 岩石物理分析在叠前储层预测中的应用[J]. 石油地球物理勘探, 2014, 49(2): 322—328.
JIANG R, ZENG Q C, HUANG J Q, et al. Application of rock physics analysis in pre-stack seismic reservoir prediction [J]. Oil Geophysical Prospecting, 2014, 49(2): 322—328. (In Chinese)
- [17] 王金伟. 利用 AVO 技术检测大庆长垣黑帝庙油层浅层气藏[J]. 断块油气田, 2017, 24(5): 632—636.
WANG J W. Detection of shallow gas reservoir in

- Heidimiao oil layer of Daqing Pluto by AVO technology[J]. *Fault-Block Oil & Gas Field*, 2017, 24(5): 632—636. (In Chinese)
- [18] 顾霜霜, 潘仁芳, 周洋. AVO 属性分析在储层厚度预测中的应用[J]. *天然气技术与经济*, 2012, 6(6): 8—10.
GU S S, PAN R F, ZHOU Y. Application of AVO attribute analysis to predicting reservoir thickness[J]. *Natural Gas Technology and Economy*, 2012, 6(6): 8—10. (In Chinese)
- [19] 张学芳, 张金亮, 王金铎. AVO 属性分析技术在垦东北部勘探中的应用[J]. *石油地球物理勘探*, 2009, 44(5): 582—586.
ZHANG X F, ZHANG J L, WANG J D. Application of AVO attribute analysis technique in exploration of Northeast area of Kenli in Shengli Oilfield of Sinopec [J]. *Oil Geophysical Prospecting*, 2009, 44(5): 582—586. (In Chinese)
- [20] 李建华, 刘百红, 张延庆, 等. 叠前 AVO 反演在储层含油气性预测中的应用[J]. *石油地球物理勘探*, 2016, 51(6): 1180—1186.
LI J H, LIU B H, ZHANG Y Q, et al. Oil-bearing reservoir prediction with prestack AVO inversion[J]. *Oil Geophysical Prospecting*, 2016, 51(6): 1180—1186. (In Chinese)
- [21] 陈文雄, 别旭伟, 高磊, 等. AVO 常用近似公式适用条件研究[J]. *中国石油石化*, 2016(23): 42—43.
CHEN W X, BIE X W, GAO L, et al. Study on the applicable conditions of AVO common approximate formulas[J]. *China Petrochem*, 2016(23): 42—43. (In Chinese)
- [22] 刘立彬, 王延光, 孙成禹. 基于正演模型的砂泥岩薄互层 AVO 特征分析[J]. *石油地球物理勘探*, 2019, 54(6): 1246—1253.
LIU L B, WANG Y G, SUN C Y. Thin inter-bed AVO characteristics analysis based on forward model [J]. *Oil Geophysical Prospecting*, 2019, 54(6): 1246—1253. (In Chinese)
- [23] 王若洋, 瞿璇, 冉辉, 等. 苏里格地区含气储层 AVO 特征研究[J]. *石油化工应用*, 2017, 36(11): 107—111.
WANG R F, QU X, RAN H, et al. Researching on AVO characteristics of gas bearing reservoirs in Sulige area [J]. *Petrochemical Industry Application*, 2017, 36(11): 107—111. (In Chinese)
- [24] 印兴耀, 宗兆云, 吴国忱. 岩石物理驱动下地震流体识别研究[J]. *中国科学: 地球科学*, 2015, 45(1): 8—21.
YIN X Y, ZONG Z Y, WU G C. Research on seismic fluid identification driven by rock physics [J]. *Scientia Sinica (Terrae)*, 2015, 45(1): 8—21. (In Chinese)
- [25] GASSMANN F. Elastic waves through a packing of spheres [J]. *Geophysics*, 1951, 16(4): 673.

Seismic rock physics analysis of tight sandstone and optimization of reservoir prediction methods in the Sichuan Basin

JI Zhi

(Exploration and Development Research Institute of Daqing Oilfield Company Limited, Daqing 163712, China)

Abstract: The lithology of the second member of the Xujiahe Formation in the HC block of the Sichuan Basin is mainly composed of lithic feldspar sandstone and feldspar lithic sandstone. It has the characteristics of tight sandstone reservoir with low porosity and low permeability, great changes in reservoir physical properties, and overlaid p-wave impedance. Reservoir prediction based on the post-stack inversion method has strong multi-solution. In order to reduce exploration risks and improve the success rate of well location deployment, seismic rock physics interpretation charts were established using a Raymer layered model based on seismic rock physics analysis techniques. Pore fluid displacement was carried out using the Gassmann equation, and AVO forward attribute analysis was performed using the displacement results. According to the above-detailed analysis, the AVO type of the upper surface of the gas-bearing reservoir of the second member of the Xujiahe Formation is Class IV. Affected by lithology and physical properties, pore fluid changes do not cause the change of AVO type. At the same time, the two parameters of p-wave velocity ratio and p-wave impedance are defined as sensitive elastic parameters of the reservoir, and the reservoir prediction method is optimized. The research results of this paper predict the thickness distribution of tight sandstone gas reservoir in the second member of Xujiahe Formation in the HC block of the Sichuan Basin, and submit two well locations. The predicted results are in good agreement with the actual drilling data. This method has been widely used in tight sandstone reservoirs with similar geological conditions.

Keywords: Sichuan basin; rock physics analysis; reservoir prediction; raymer layered model; fluid displacement; AVO attribute