

秦德文, 张岩, 于杰. 东海 M 构造中深层低渗气藏“甜点”预测技术[J]. 海洋地质前沿, 2024, 40(4): 83-91.

QIN Dewen, ZHANG Yan, YU Jie. "Sweet spot" prediction technique for mid-deep low permeability gas reservoirs in M Structure of East China Sea[J]. Marine Geology Frontiers, 2024, 40(4): 83-91.

东海 M 构造中深层低渗气藏“甜点”预测技术

秦德文, 张岩, 于杰

(中海石油(中国)有限公司上海分公司, 上海 200335)

摘要:近年来, 构造-岩性复合型油气藏已逐渐成为东海“扩储增产”的重要领域, 提高“甜点”储层钻遇率对于勘探开发一体化设计的部署与落实具有重要意义。研究区低渗气藏储层厚、埋深大, 内部非均质性强, 孔渗关系复杂, 地球物理响应特征差异小, 亟待开展低渗气藏“甜点”储层的精细表征研究。以地震岩石物理为驱动, 利用杨氏阻抗 $E\rho$ 区分碎屑岩储层与非储层, 通过分类寻优认为, 剪切模量 μ 为洁净、粗粒、高渗透率优质储层的综合敏感弹性因子。为了削弱岩石骨架孔隙度的影响, 采用高灵敏烃检因子 $F\rho$ 开展烃类检测, 最终结合岩性、“甜点”和烃检属性体以精细表征优质“甜点”储层富集区。应用效果证实: 该方法的“甜点”预测吻合度达到 86.07%, 为井位部署和轨迹优化提供了重要依据, 可推广至类似区块以供借鉴。

关键词:低渗气藏; 地震岩石物理; 保幅去噪; 叠前反演; “甜点”预测

中图分类号: P744.4; P618.13

文献标识码: A

DOI: 10.16028/j.1009-2722.2023.138

0 引言

随着海洋油气资源勘探战略部署的不断深化, 非常规油气在未来“扩储增产”上的重要性日益凸显^[1]。目前非常规油气正处于起步阶段, 资源勘探潜力巨大, 但预测评价技术体系尚不完善, 亟待攻关研究^[2], 其中, 以致密储层“甜点”预测最为聚焦。“甜点”这个地质概念广泛应用于页岩气等非常规油气领域及致密砂岩储层, 由于不同油气田的地质概况、工艺技术以及经济性等因素存在差异, “甜点”划分标准不尽相同。东海油气资源主要富集在中深层致密砂岩储层内, 低孔渗天然气探明储量占探明储量的 80% 以上, 而“甜点”储层精细评价是东海未来油气“扩储增产”及高质量发展的重要源动力。东海 M 构造的主力气层——渐新统花港组为辫状三角洲沉积体系, 砂体厚度大, 局部发育粗粒沉积, 储层内部物性非均质性强。主力层埋藏深、

岩石物理特征叠置严重, 利用常规叠后地震以及模型驱动的叠前反演方法识别“甜点”储层分布范围精度低、不确定性强。已钻井揭示, 储层“甜点”对油气产能控制作用明显, 亟需开展厚储层内部“甜点”预测及精细表征研究。

优势储层地球物理预测研究始终是国内外专家学者热衷的课题。OSTRANDER^[3] 研究发现不同流体性质的 AVO 响应特征差别迥异, 拉开了叠前地震流体识别的序幕; CHIBURIS^[4] 采用振幅比值方法成功实现了浅层烃类检测; SMITH 和 GIDLOW^[5] 首次提出“流体因子”的概念, 借助纵横波反射率地质叠加压制背景; GOODWAY 等^[6] 认为拉梅参数更能表现出孔隙流体的弹性变化; HEDLIN 等^[7] 推导出孔隙空间模量间接映射流体模量信息; BATZLE 等^[8] 发现体积模量与剪切模量作差的方法可进一步提升流体区分度; RUSSELL 等^[9] 从纵波阻抗中消除骨架的影响, 构建了高灵敏流体因子; MARK 等^[10] 利用阻抗域坐标旋转压制背景突出流体效应; 王栋等^[11] 对比分析了不同次幂流体因子的识别能力和抗噪性; 印兴耀等^[12] 利用叠前弹性阻抗反演提取 RUSSELL 流体因子, 提高了中深部致密储层烃类检测的可靠性; 刘力辉等^[13] 探讨了结合地震物相分类方案实现“甜点”储层预

收稿日期: 2023-05-23

资助项目: 中海油有限公司重大科技专项课题“东海西湖凹陷大中型气田勘探方向及关键技术研究”(24E-Y423RY05.06)

第一作者: 秦德文(1984—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事油藏地球物理方面的工作。E-mail: qindw@cnoc.com.cn

测的新思路;许翠霞等^[14]探讨了多种致密砂岩含气性敏感参数的识别能力;李春宁^[15]替换了 RUSSELL 流体因子中的骨架项,提高了流体敏感性;陈祖庆等^[16]基于叠前弹性反演技术,尝试开展了粗相带岩性和含气性预测;徐玥等^[17]引入 RUSSELL 流体因子,在致密砂岩气甜点预测中取得较好效果;张林清等^[18]将叠前同时反演与地震属性相结合,降低了单一方法预测“甜点”的多解性;曹冰等^[19]开展多级相控-叠前敏感参数反演,优选储层改造“甜点”有利区,但反演结果在少井区易受低频模型影响;李九娣等^[20]通过建立优势储层与岩石物理参数的关系,利用双参数反演降低了优势储层预测的不确定性;王迪等^[21]借助正演模拟建立 AVO 定量解释量版,实现了“甜点”储层孔隙度和厚度的半定量评价;韩刚等^[22]采用叠前 AVO 三参数直接反演开展泊松比和密度的定量解析,提高了“甜点”储层钻遇率。张岩等^[23]以地震岩相-物相-流相逐级相控思想为指导,有效刻画了碎屑岩“甜点”储层展布规律,从而实现了高孔高气饱优质储层的准确描述。

针对研究区低渗气藏储层“甜点”预测所面临的难点问题,以地震岩石物理分析为驱动,明确 E_p 可有效区分砂泥岩,优选剪切模量 μ 为洁净、粗粒和物性好储层的综合敏感参数,并引入高灵敏烃检因子 $F\rho$ 进行流体识别。最终通过地震敏感属性体定量解释,明确“甜点”储层展布规律。

1 地质概况及“甜点”划分

东海 M 构造位于某凹陷西次凹中北部,为早期断层控制的低幅背斜-断背斜构造(图 1)。研究区发育西侧和轴向物源的辫状河三角洲沉积体系,储层类型以辫状河三角洲平原分流河道砂体为主,具有厚度大、粒度粗、纵向多期叠置的特征,沉积微相主要发育心滩和辫状河道,间夹泛滥平原,天然堤、决口扇不发育。主力层 H3 埋深为 4 200~4 500 m,岩芯和壁芯物性分析表明,储层总体属于特低孔-低孔、低渗储层,同孔不同渗。H3 层物性纵向非均质性较强,孔隙度和渗透率随深度增加而减小,物性受压实作用影响明显。H3 储层孔隙度为 7.0%~11.7%,平均值 8.2%,中值 8.1%;渗透率为 $(0.2\sim44.1)\times10^{-3}\mu\text{m}^2$,平均值 $2.6\times10^{-3}\mu\text{m}^2$,中值 $1.5\times10^{-3}\mu\text{m}^2$,整体为特低孔低渗储层,局部发育低孔低渗储层。实测 A 井岩芯及测录井分析显示,主力层 H3 储层

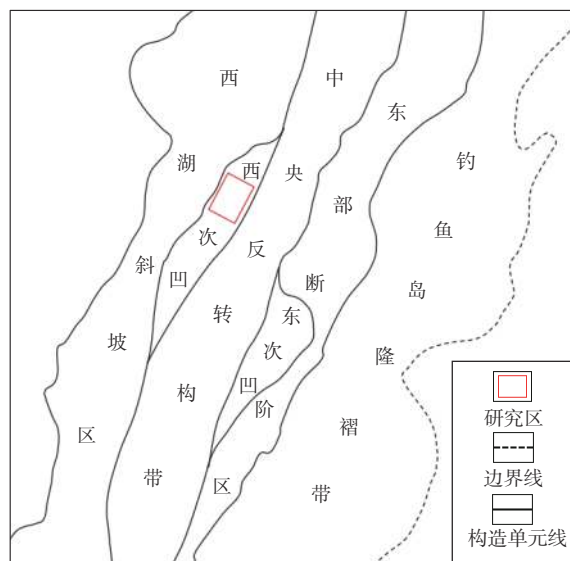


图 1 研究区位置和构造背景

Fig.1 The location and tectonic background of the study area

物性受控于粗粒相带,上段为细砂岩,下段为含砾中粗砂岩、砂砾岩,底部见冲刷充填构造,渗透率可达 $44\times10^{-3}\mu\text{m}^2$ 。相比于细砂岩,粗粒砂岩虽然厚度小,但是往往物性更好,是潜在的优质储层^[24]。强水动力条件下的辫状化河道带主体发育区(洁净、粗相带)是“甜点”储层预测的重要方向。

根据前人对储层岩性、物性、孔隙结构、电性特征以及沉积相的分析结果,结合测试产能情况,同时参考海上石油天然气储量计算规范中的储层物性划分标准,将 M 构造 H3 层储层按照测井尺度划分为如下类型(表 1)。为了开展“甜点”储层地震预测,进一步对测井储层划分成果进行粗化,主要划分为“甜点”(渗透率 $>1\times10^{-3}\mu\text{m}^2$ 、粒度较大、气饱较高)、非“甜点”(渗透率 $<1\times10^{-3}\mu\text{m}^2$)和泥岩。其中,“甜点”包括:Ⅰ类气层,渗透率 $>10\times10^{-3}\mu\text{m}^2$,气饱和度(S_g) $>55\%$,中粗砂岩;Ⅱ类气层,渗透率 $>1\times10^{-3}\mu\text{m}^2$, $S_g >45\%$,中砂岩;Ⅲ类气层,渗透率 $>1\times10^{-3}\mu\text{m}^2$, $S_g >40\%$,细砂岩;气水同层,渗透率 $>1\times10^{-3}\mu\text{m}^2$, $S_g >20\%$,细砂岩。以此为基础开展地震岩石物理“甜点”敏感参数优选。

2 技术方法

2.1 基本原理

以 Boit-Gassmann 多孔介质模型理论为指导, RUSSELL 等^[9]从纵波阻抗中剥离岩石骨架的影响,

表 1 H3 层储层“甜点”类型划分标准

Table 1 Classification criteria of reservoir sweet spot in H3 layer

储层类别	岩性		物性		含流体性
	岩性	泥质含量/%	孔隙度/%	渗透率 $K/(10^{-3} \mu\text{m}^2)$	气饱和度 $S_g/\%$
I 类“甜点”	中砂岩、粗砂岩	≤ 35	≥ 7	≥ 10	> 55
II 类“甜点”	中砂岩	≤ 35	≥ 7	$1 \leq K \leq 10$	≥ 45
III 类“甜点”	细砂岩	≤ 35	≥ 7	≥ 0.5	≥ 40
IV 类“甜点”	细砂岩	≤ 35	≥ 7	$0.2 \leq K \leq 0.5$	≥ 35
气水同层	细砂岩	≤ 35	≥ 7	≥ 0.2	$20 \leq S_g \leq 35$
含气水层	细砂岩	≤ 35	≥ 7	≥ 0.2	$10 \leq S_g < 20$
干层	细砂岩	≤ 35	≥ 7	< 0.2	干层

构建流体因子 ρf 表征流体效应的变化, 形式如下:

$$\rho f = I_p^2 - c I_s^2 = \rho(f + s - c\mu) \quad (1)$$

式中: f 为流体项;

s 为骨架项;

μ 为剪切模量;

I_p 和 I_s 分别为纵波、横波阻抗;

ρ 为密度;

c 为解耦因子, $c = (V_p/V_s)^2_{\text{dry}}$, 流体因子 ρf 的识别能力对其依赖程度较高, 但该参数的准确选取通常存在较大困难。

RUSSELL 等^[25] 研究发现消除密度项后, 利用流体项 f 直接开展流体识别, 表现出更强的稳定性和抗噪性, 并推导出包含流体项 f 、剪切模量 μ 和密度 ρ 的三项 AVO 近似公式, 形式如下:

$$R_{pp}(\theta) = \left[\left(\frac{1}{4} - \frac{\gamma_{\text{dry}}^2}{4\gamma^2} \right) \sec^2 \theta \right] \frac{\Delta f}{f} + \left[\frac{\gamma_{\text{dry}}^2}{4\gamma^2} \sec^2 \theta - \frac{2}{\gamma^2} \sin^2 \theta \right] \frac{\Delta \mu}{\mu} + \left(\frac{1}{2} - \frac{\sec^2 \theta}{4} \right) \frac{\Delta \rho}{\rho} \quad (2)$$

式中: $R_{pp}(\theta)$ 表示反射系数;

γ_{dry} 表示干岩石纵横波速度比;

γ 表述饱和岩石纵横波速度比;

θ 表示入射角。

李春宁^[15] 在 RUSSELL 等^[25] 研究基础上, 引入能够更优表征骨架项的岩性指示因子 $E\rho$ 。利用变化的纵横波速度比替代解耦因子 c , 构建出灵敏度更高的流体指示因子 $F\rho$ 。形式如下:

$$F\rho = I_p^2 - \frac{3\gamma^2 - 4}{\gamma^2 - 1} I_s^2 \quad (3)$$

式中: $(3\gamma^2 - 4)/(\gamma^2 - 1)$ 为调节因子, 其随地层时空变

化, 具有更高适用性。并推导出包含岩性指示因子 $E\rho$ 、流体指示因子 $F\rho$ 和密度 ρ 的三项 AVO 近似公式, 形式如下:

$$R_{pp}(\theta) = \frac{\Delta E\rho}{E\rho} \left[\frac{1}{4\cos^2 \theta} \frac{(3\gamma^2 - 4)}{\gamma^2(\gamma^2 - 1)} - 4\sin^2 \theta \frac{(3\gamma^2 - 4)}{(6\gamma^2 - 4)(\gamma^2 - 1)} \right] + \frac{\Delta F\rho}{F\rho} \left[\frac{1}{4\cos^2 \theta} \frac{(\gamma^2 - 2)^2}{\gamma^2(\gamma^2 - 1)} + 4\sin^2 \theta \frac{(\gamma^2 - 2)}{\gamma^2(6\gamma^2 - 4)(\gamma^2 - 1)} \right] + \frac{\Delta \rho}{\rho} \left[\frac{1}{2} + 2\sin^2 \theta \frac{1}{\gamma^2} - \frac{1}{2\cos^2 \theta} \right] \quad (4)$$

式中: $E\rho$ 表示杨氏阻抗;

$F\rho$ 表示烃检因子。

结合文献[12]中建立的双层砂岩模型弹性参数, 开展了 $F\rho$ 近似式、Aki-Richards 方程和佐普利兹方程精确解的反射系数精度对比分析。从图 2 中可以看到, $F\rho$ 近似式模拟结果与 Aki-Richards 方

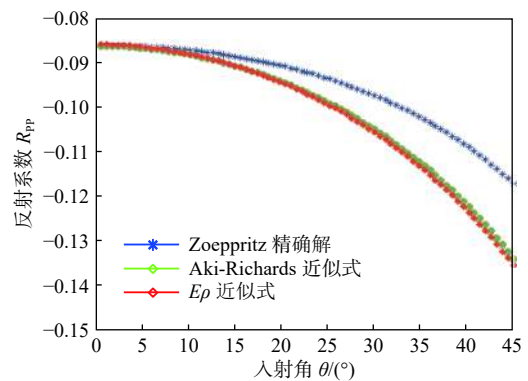


图 2 不同反射系数方程精度对比

Fig.2 Comparison in precision of different reflection coefficient equations

程整体相似度较高。当入射角 $<20^\circ$,两者与佐普利兹方程精确解的误差均较小;当入射角 $>20^\circ$,相对误差均逐渐增大。总体而言,利用 $F\rho$ 近似式具有较高精度,可以满足中深层地震反演需求。

以优化处理的高质量叠前道集数据作为输入,分别得到岩性、物性和含流体性敏感 AVO 属性,进而结合诸如递归反演等方法实现地震反射率到层间弹性数据体的转换。本研究采用叠后有色反演,其基本原理是分别在时间-频率域建立测井弹性参数与地震信息的匹配映射关系,借助有色反演算子直接实现地震反射率向层间弹性参数体的转换^[26]。该方法不仅能够限制反演结果在测井数据的量纲范围内,而且可更好地展示地震数据的细节特征,主要步骤为:①在目的层段分别抽取井旁道测井数据与地震数据进行振幅谱统计分析;②借助最小二乘拟合算法,构建频率域匹配算子建立频率域测井与地震的对应关系,通过转换映射得到相位旋转 -90° 的时间域有色反演算子;③结合有色反演算子将 AVO 反射率体直接转换为相对弹性数据体,开展无井反演;④通过频率域融合等算法,在低频模型约束下,开展有井反演获得三维层间绝对弹性数据体(图 3)。

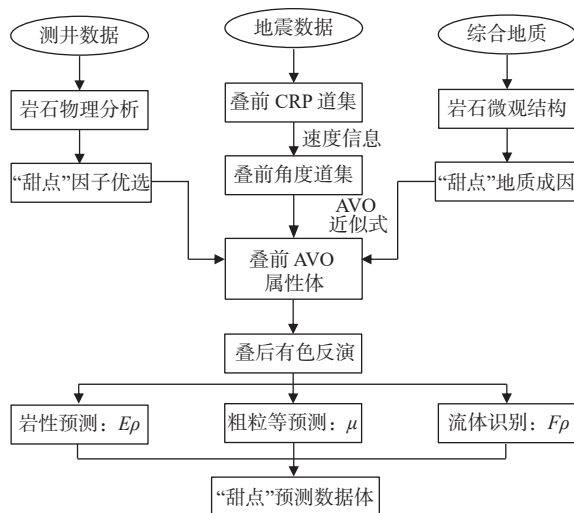


图 3 甜点储层地震预测流程

Fig.3 Flow chart of seismic prediction for sweet spot reservoir

2.2 “甜点”地震岩石物理分析

储层是“甜点”有利岩相发育的主要载体。主力层 H3 层埋深大,砂泥岩阻抗差异小识别困难,杨氏阻抗可有效区分储层($GR < 70$)与非储层(图 4a)。结合测井解释成果和薄片分析化验数据,综合优选

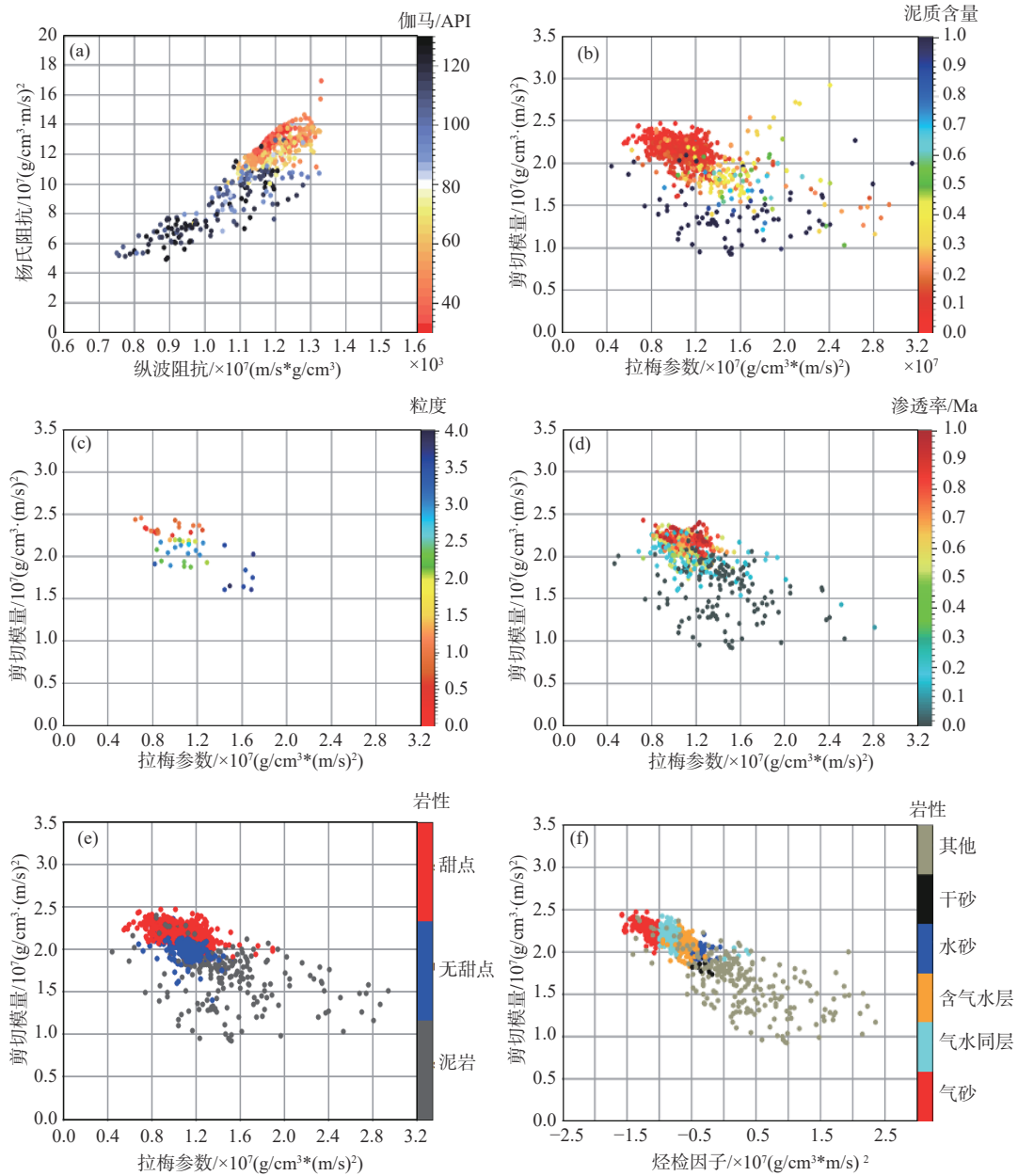
剪切模量 μ 作为洁净、粗粒以及高渗透率“甜点”储层的敏感属性(图 4b—e)。低孔低渗储层流体弹性差异微弱,传统方法烃检精度受制于骨架孔隙等因素^[26],李春宁^[27]引入杨氏阻抗,最大限度地消除 RUSSELL 流体项中固体骨架的影响,突出表征流体性质的变化(图 4f)。结合研究区实测井数据,通过岩石物理流体替换计算了 10 种不同弹性参数的流体敏感性(图 5)。综合显示烃检因子 $F\rho$ 具有更高流体识别能力,为“甜点”储层精细描述提供坚实的岩石物理支撑。

2.3 地震资料优化处理

M 构造主要目的层花港组 H3 层埋深 $>4\,200\text{ m}$,地震有效信号弱,受噪声干扰严重。原始叠前角道集分析显示近中远振幅杂乱、地震同相轴未拉平以及 AVO 特征存在严重畸变(图 6a),A 井主要目的层 H3 层大厚砂体(厚度为 158 m)顶底面地震响应不明确,AVO 特征模糊(红方框处)。高质量的叠前地震信息是实现“甜点”储层精细刻画的重要基础保障^[28],针对噪音干扰等问题,开展了以叠前保幅去噪为核心的道集优化处理流程,改善目标层成像质量,在叠前 Q 补偿、剩余时差校正、压噪流程优化处理后,叠前角道集分辨率改善,AVO 特征恢复,信噪比提升(图 6b)。

3 应用效果

研究区 M 构造主要目的层 H3 物源充足,主要由西北向和轴向双向供给。根据区域地质沉积研究可知,储层类型以辫状河三角洲平原分流河道砂体为主,具有厚度大、粒度粗、纵向多期叠置的特征。将前期优化处理的高品质地震资料作为输入,通过叠前反演分别获得杨氏阻抗 $E\rho$ 岩性、剪切模量 μ 甜点以及流体因子 $F\rho$ 烃检地震敏感属性体。杨氏阻抗 $E\rho$ 岩性预测结果准确刻画出了厚储层内幕砂体纵向发育期次和展布规律(图 7a)。前人综合地质成因和测井解释成果分析认为,研究区 5 口已钻井主力层 H3 “甜点”发育优劣顺序为 A、E、B、D 和 C 井,H3 层砂体整体下部物性好于上部,本次剪切模量 μ “甜点”预测结果清晰展现出这一现象(图 7b),数值越高越“甜”,具有较高置信度。在此基础上开展的烃类检测结果显示流体因子 $F\rho$ 与砂体、“甜点”展布耦合关系较好,并与测井解释成果高度匹配(图 7c),从而证实本次预测精度较高(表 2),



(a) 纵波阻抗 AI 与杨氏阻抗 E_p 的岩性交会; (b) 拉梅参数 λ 与剪切模量 μ 的泥质含量交会; (c) 拉梅参数 λ 与剪切模量 μ 的砂岩粒度交会; (d) 拉梅参数 λ 与剪切模量 μ 的渗透率交会; (e) 拉梅参数 λ 与剪切模量 μ 的甜点交会; (f) 烃检因子 F_p 与剪切模量 μ 的流体识别交会

图 4 地震敏感属性岩石物理分析

Fig.4 Litho-physical analysis of seismic sensitive attributes

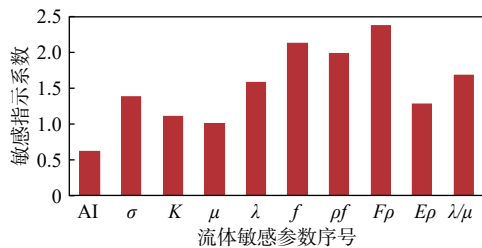


图 5 不同弹性参数的流体敏感性定量分析

AI -纵波阻抗; σ -泊松比; K -体积模量; μ -剪切模量; λ -拉梅参数; f -流体项; ρf -流体阻抗; F_p -烃检因子; E_p -杨氏阻抗; λ/μ -拉梅参数比值

Fig.5 Quantitative analysis of fluid sensitivity of different elastic parameters

能够满足“甜点”储层精细描述需求。

沉积微相主要发育心滩和辫状河道, 间夹泛滥平原, 天然堤、决口扇不发育(图 8a), “甜点”分布控制作用明显。主井区 A 井、B 井和 E 井位于多期叠置连片的分流河道主体部位, 多心滩发育, 砂体厚度大、物性好, D 井和 C 井位于辫状河边缘部位, 沉积微相存在差别。本次预测结果显示, 砂体广泛发育, 厚砂体主要位于主井区附近及北部, 向南逐渐减薄(图 8b), 沿本区 F1 大断层溶蚀改造强度大, 物性好的优质储层聚集分布, 为油气运移

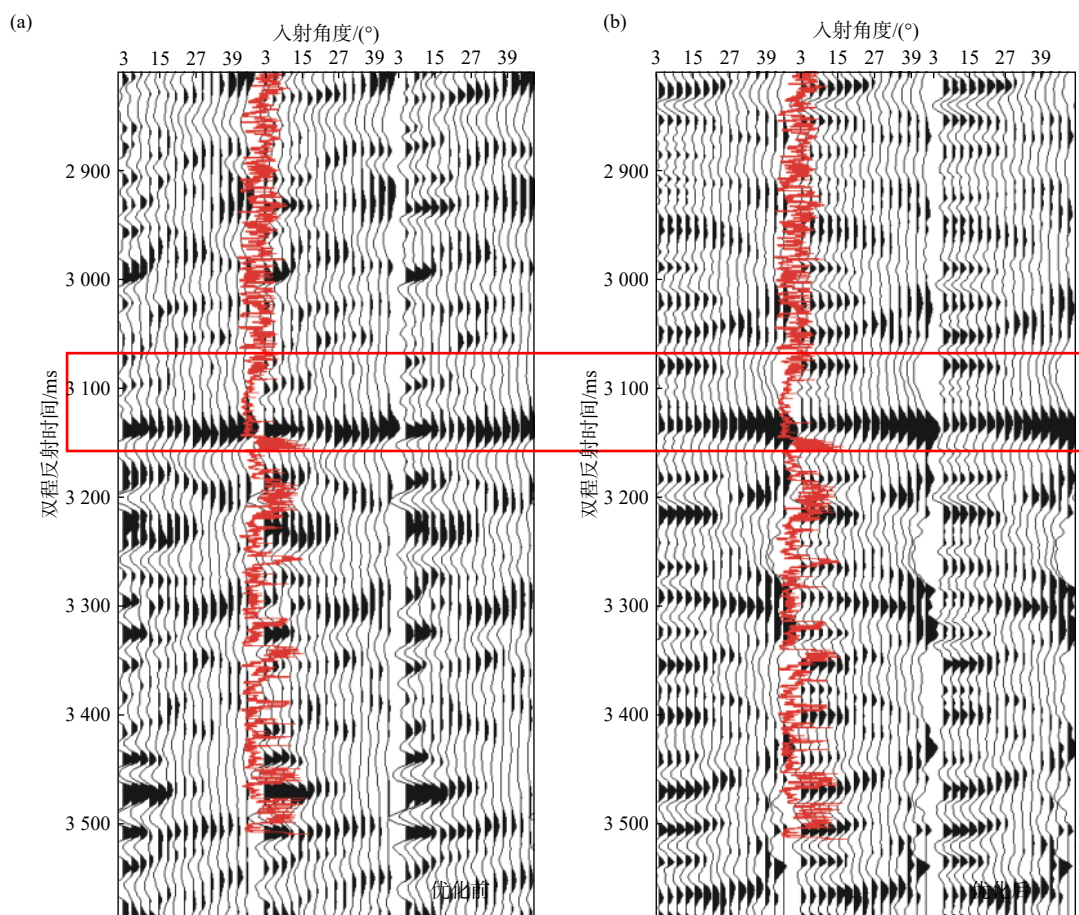
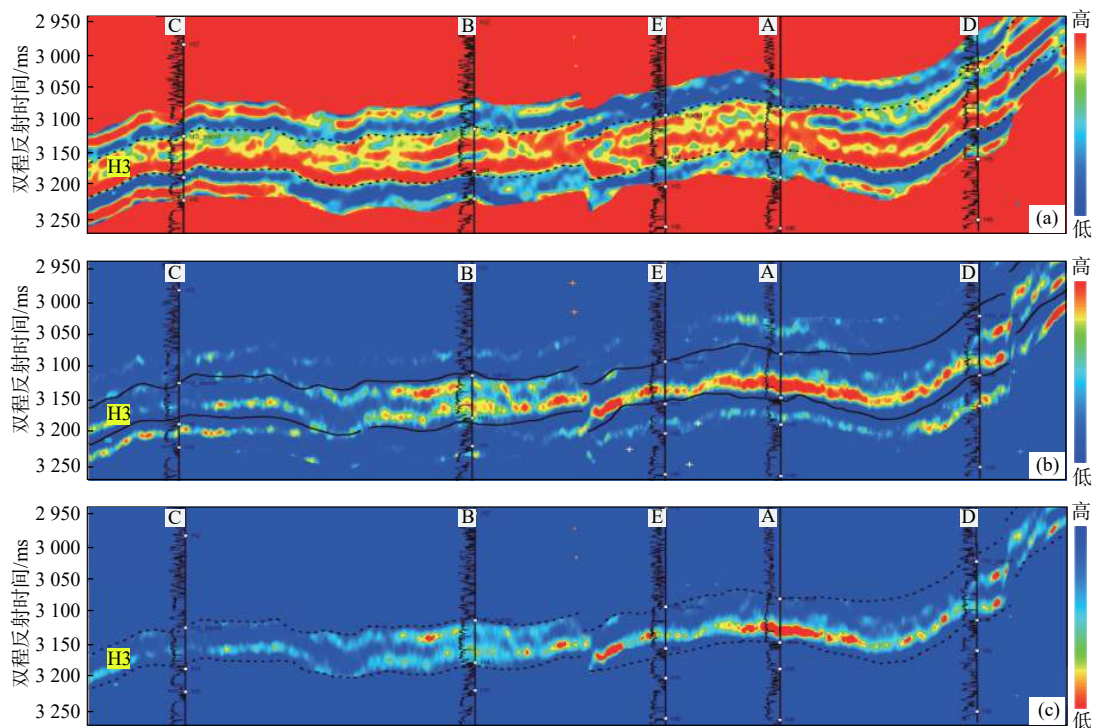


图 6 原始叠前角道集 (a) 及优化处理后叠前角道集 (b)

Fig.6 The primal set (a) and optimized set (b) of pre-stack angles



(a) 杨氏阻抗 E_p 叠前反演剖面; (b) 剪切模量 μ 反演剖面; (c) 烃检因子 F_p 反演剖面

图 7 研究区储层反演结果

Fig.7 The data inversion results of reservoirs in the study area

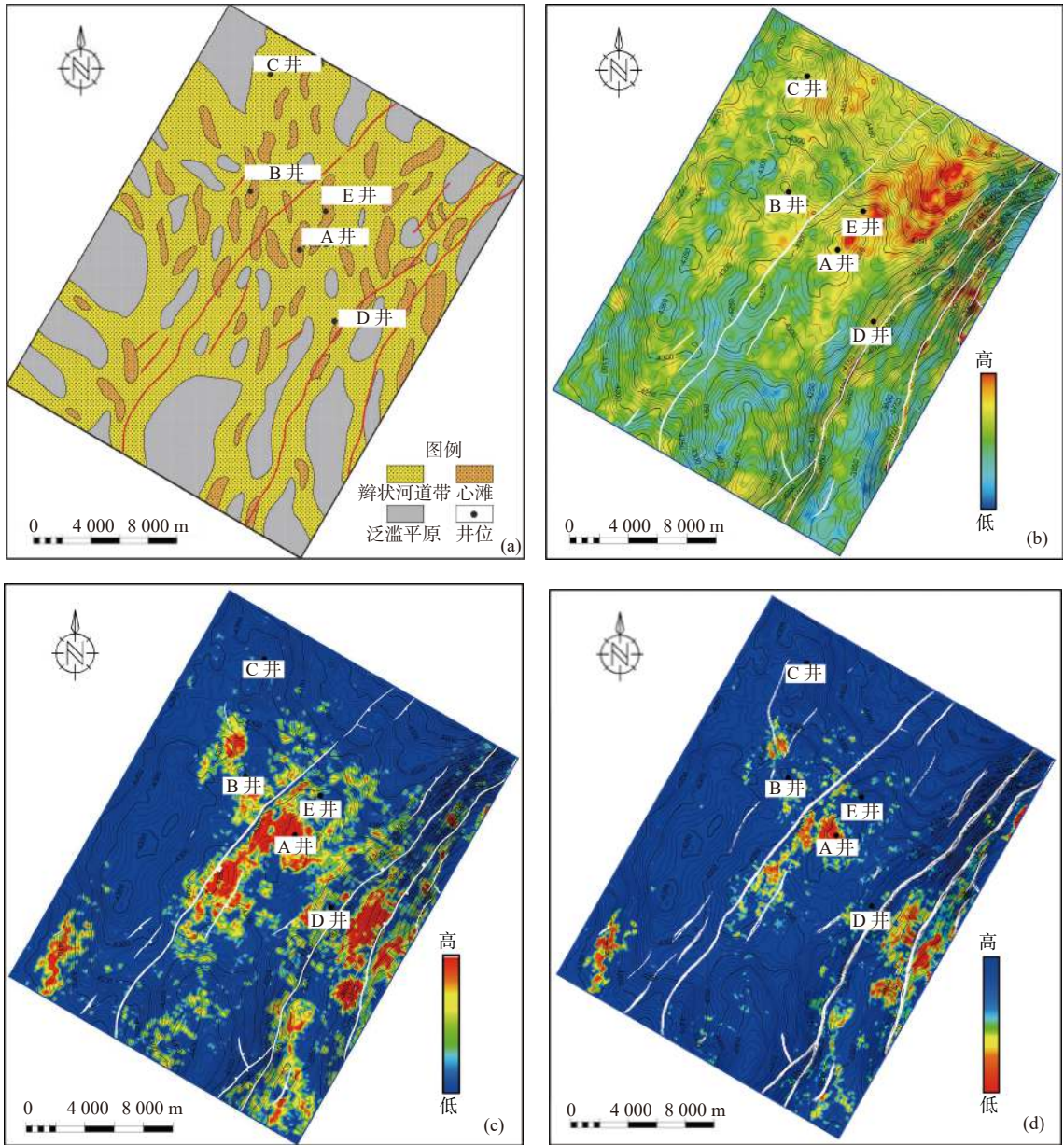
表 2 H3 储层“甜点”预测吻合度统计

Table 2 The coincidence statistics of H3 reservoir "sweet spot" prediction

地层	井名	地层厚度/m	井上“甜点”厚度/m	预测“甜点”厚度/m	相对误差	厚度符合率/%	符合率均值/%
H3	A	158.75	43.3	46.5	3.2	93.1	86.07
	B	155.95	46.6	38.2	9.4	78.01	
	C	154.80	0.0	0.0	0.0	100	
	D	164.36	13.0	18.0	5.0	72.22	
	E	158.00	41.8	37.0	4.8	87.02	

提供良好通道(图 8c)。烃类检测结果与测井解释成果高度匹配,进一步落实了含气“甜点”储层展布规律(图 8d),优势储层发育区位于主井区 A 井

周边及南部,为典型的构造-岩性复合型气藏;东南部优势区埋藏浅,断裂发育,已有井位通过目标审查入库,为了充分盘活研究区勘探开发潜力,现



(a) 沉积微相图; (b) 砂体厚度平面分布; (c) 甜点厚度平面分布; (d) 烃类检测平面分布

图 8 研究区主力层 H3 “甜点”预测结果

Fig.8 Horizontal distribution of sweet prediction at the main layer H3 in the study area

已设计部署了2口开发评价井。本研究成果为该区域油气增储扩产和实现新领域勘探突破提供了重要的动力源泉。

4 结论与认识

东海M构造主力层H3储集体内幕非均质性强、横向物性变化快、孔渗关系复杂,具有低孔低渗的特点。笔者针对该区岩石物理特征叠置严重的问题,通过分类寻优发现杨氏阻抗 $E\rho$ 可以有效识别储集体;剪切模量 μ 是反映洁净、粗粒以及高渗透性优势储层的综合敏感因子;烃检因子 $F\rho$ 能够进一步描述含气“甜点”储层富集区。针对稀井区利用常规反演方法刻画厚储层非均质性精度低的问题,在层递式相控思想指导下,采用基于有色反演的叠前直接预测技术清晰地刻画了厚储层内部“甜点”储层展布规律。该成果更符合研究区地质沉积规律,具有较高预测精度。对于类似地质背景地区有广泛应用前景和借鉴意义。

参考文献:

- [1] 谢玉洪. 中国海油“十三五”油气勘探重大成果与“十四五”前景展望[J]. 中国石油勘探, 2021, 26(1): 43-54.
- [2] 杨勤勇, 杨江峰, 王咸彬, 等. 中国石化物探技术新进展及发展方向思考[J]. 中国石油勘探, 2021, 26(1): 121-130.
- [3] OSTRANDER W J. Plane-wave reflection coefficients for gas sands at nonnormal angles of incidence[J]. *Geophysics*, 1984, 49: 1637-1648.
- [4] CHIBURIS E F. Analysis of amplitude versus offset to detected gas/oil contacts in the Arabian Gulf[C]//54th Ann. Internat. Mtg., Soc. Expl. Geophys., Expanded Abstracts, 1984: 669-670.
- [5] SMITH G C, GIDLOW P M. Weighted stacking for rock property estimation and detection of gas[J]. *Geophysical Prospecting*, 1987, 35(9): 993-1014.
- [6] GOODWAY B, CHEN T, DOWNTON J. Improved AVO fluid detection and lithology discrimination using Lamé petrophysical parameters[C]. SEG Technical Program Expanded Abstracts, 1997, 16: 183-186.
- [7] HEDLIN K. Pore space modulus and extraction using AVO[C]. SEG Technical Program Expanded Abstracts, 2000, 19: 170-173.
- [8] BATZLE M L. Optimal hydrocarbon indicators[J]. SEG Technical Program Expanded Abstracts, 2001, 20: 1697-1700.
- [9] RUSSELL B H, Hedlin K, Hilterman F J, et al. Fluid-property discrimination with AVO: a Biot-Gassmann perspective[J]. *Geophysics*, 2003, 68(1): 29-39.
- [10] MARK Q, BRUCE S, CHRIS T. Poisson impedance[J]. *The Leading Edge*, 2006, 45(3): 239-242.
- [11] 王栋, 何振华, 黄德济. 新流体识别因子的构建与应用分析[J]. 石油物探, 2009, 48(2): 141-148.
- [12] 印兴耀, 张世鑫, 张锋. 针对深层流体识别的两项弹性阻抗反演与Russell流体因子直接估算方法研究[J]. 地球物理学报, 2013, 56(7): 2378-2390.
- [13] 刘力辉, 李建海, 刘玉霞. 地震物相分析方法与“甜点”预测[J]. 石油物探, 2013, 52(4): 432-437.
- [14] 许翠霞, 马鹏善, 赖令彬, 等. 致密砂岩含气性敏感参数: 以松辽盆地英台气田营城组为例[J]. 石油勘探与开发, 2014, 41(6): 712-716.
- [15] 李春宁. 多波联合AVA属性提取与油气预测[D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2014.
- [16] 陈祖庆, 杨鸿飞, 王静波. 基于叠前反映的致密砂岩含气储层识别技术研究[J]. 天然气技术与经济, 2015, 9(4): 18-22.
- [17] 徐玥, 张林清. 利用Russell流体因子进行致密砂岩气“甜点”预测[J]. 西部探矿工程, 2016, 12(2): 20-23.
- [18] 张林清, 张会星, 姜效典, 等. 弹性参数反演与属性融合技术在“甜点”预测中的应用[J]. 天然气地球科学, 2017, 28(4): 582-589.
- [19] 曹冰, 秦德文, 陈践发. 西湖凹陷低渗储层“甜点”预测关键技术研究与应用: 以黄岩A气田为例[J]. 石油学报, 2018, 36(1): 188-197.
- [20] 李久娣. 东海西湖N区块致密砂岩气藏甜点预测研究[J]. *石油物探*, 2019, 58(3): 444-452.
- [21] 王迪, 张益明, 刘志斌, 等. AVO定量解释模板在LX地区致密气“甜点”预测中的应用[J]. 石油物探, 2020, 59(6): 936-948.
- [22] 韩刚, 高红艳, 龙凡, 等. 叠前反演在西湖凹陷致密砂岩储层“甜点”预测中的应用[J]. 石油物探, 2021, 60(3): 471-478.
- [23] 张岩, 秦德文. 东海古近系致密碎屑岩“甜点”地震预测方法及应用[J]. 海洋地质前沿, 2023, 39(5): 51-58.
- [24] 尤丽, 张迎朝, 李才, 等. 基于沉积成岩-储集相分析确定文昌9区低渗储层“甜点”分布[J]. 吉林大学学报, 2014, 44(5): 1432-1440.
- [25] RUSSELL B H, GRAY D, HAMPSON D P, et al. Linearized AVO and poroelasticity[J]. *Geophysics*, 2011, 76(1): 19-29.
- [26] 张岩, 李键, 侯志强. 基于叠前弹性信息直接提取的高灵敏烃类检测方法[J]. 地球物理学进展, 2021, 36(3): 1187-1195.
- [27] 李春宁, 杜启振, 陈刚. 一种新的流体指示因子[C]//中国地球物理学会第二十九届年会, 2013.
- [28] 刘力辉, 杨晓, 丁燕. 基于岩性预测的CRP道集优化处理[J]. 石油物探, 2013, 52(5): 482-488.

“Sweet spot” prediction technique for mid-deep low permeability gas reservoirs in M Structure of East China Sea

QIN Dewen, ZHANG Yan, YU Jie

(Shanghai Branch of CNOOC (China) Ltd., Shanghai 200335, China)

Abstract: In recent years, structural-lithological complex reservoirs have gradually become the key in reservoir expansion and production in the East China Sea. The low permeability gas reservoir in the middle and deep low-permeability gas reservoir in the M Structure of the East China Sea was studied. The study area has large burial depth, strong internal heterogeneity, and complex porosity-permeability relationship, but little difference in geophysical response characteristics. It is urgent to study the fine characterization of sweet spot reservoir in the reservoir. Seismic rock physics were analyzed, in which the Young's impedance was used to distinguish clastic rock reservoir from non-reservoir. By classifying and optimizing parameters in seismological profiling, shear modulus was found and used as a comprehensive sensitive elastic factor, and combined with a high sensitivity hydrocarbon detection factor, clear clean, coarse-grained, and high-permeability high quality reservoirs could be detected. In addition, to reduce the influence of rock skeleton porosity, a highly sensitive fluid factor was used to detect hydrocarbons. Finally, combined with lithology and attributes of hydrocarbon detection, good sweet spot reservoir areas were finely characterized. Results show that the sweet spot prediction using this method reached a high successful prediction rate of 86.07%, which provided an important basis for well deployment and trajectory optimization and a reference for working on similar blocks.

Key words: low-permeability gas reservoir; seismic rock physics; amplitude preserving denoising; pre-stack inversion; sweet spot prediction