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): 93-100. ZHANG Yan, QIN Dewen. Method and application of "sweet spot" seismic prediction of the Paleogene low-porosity low-permeability clastic rock in the East China Sea Basin[J]. Marine Geology Frontiers, 2023, 39(5): 93-100.

东海古近系致密碎屑岩"甜点"地震预测方法及应用

张岩,秦德文

(中海石油(中国)有限公司上海分公司,上海 200335)

摘 要:东海Q构造古近系低孔低渗储层普遍发育,砂泥岩阻抗叠置严重,整体非均质性变化 剧烈。落实致密碎屑岩"甜点"分布范围是当前该区勘探开发一体化研究亟需解决的关键问 题。为此,在地震岩性学研究的基础上,提出了一种基于叠前敏感属性反演的地震"甜点"预 测技术。采用振幅随偏移距变化(AVO)截距和梯度合成的扩展弹性阻抗(EEI35°)属性 开展地震岩相预测。利用高孔砂岩储层的低密度特征解决地震物相预测的问题,并结合地震 岩石物理定性和定量判析技术,优选复合属性进行地震流相识别。最终在层递式相控思想指 导下,实现相对高孔高气饱优质储层的准确预测。实例应用表明:本方法能够有效刻画研究 区致密碎屑岩"甜点"展布规律,为后续目标搜索和井位优化提供重要参考,具有较高的可靠 性和推广应用价值。

关键词:地震岩性学;地震岩石物理;叠前 AVO 属性;有色反演;"甜点"预测中图分类号:P736;P744.4 文献标识码:A **DOI**:10.16028/j.1009-2722.2022.211

0 引言

当前国内外经济形势复杂多变,全球能源问题 日益凸显。加大油气资源勘探开发力度,对于维护 国家经济稳定、可持续发展具有重要战略意义。东 海某凹陷作为中国近海富生烃凹陷之一,资源勘探 潜力巨大^[1]。油气主要富集在中深层低孔、低渗储 集体内,致密碎屑岩资源量约占总资源量的 92.4%。 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 是落实勘探开发一体化设计部署的有力支撑。

"甜点"的定义起源于北美非常规油气勘探过 程中,划分标准具有相对性、区域性和独特性等特 点。总体而言,可概括为在低孔、低渗背景下,强非 均质性储集体内幕局部发育相对高孔、高渗且高气 饱富集的有利区带。2011年,中国国家能源局制定 并颁布了致密碎屑岩的行业评判标准^[2],规定储层

收稿日期: 2022-07-27

资助项目:国家科技重大专项课题(KJGG2022-0304)

作者简介: 张岩(1987-), 男, 硕士, 工程师, 主要从事油气地球物理技术 方面的研究工作. E-mail: zy1987555@163.com 孔隙度<10%, 渗透率<1×10⁻³μm² 作为致密碎屑 岩。根据不同油气田的地质概况、工艺技术以及经 济性,"甜点"划分标准差别迥异。东海 Q 构造古 近系储层"甜点"标准定义为:储层孔隙度>10%, 渗透率>0.5×10⁻³μm²且含气饱和度>40%。受埋 深压实作用影响,研究区储集体与围岩的波阻抗叠 置严重,传统叠后地震属性能够较有效的表征地质 体轮廓和内部细节,但对于复杂岩性体的特性描述 存在明显多解性^[3]。

随着岩石物理理论及振幅随偏移距变化(AVO) 技术的深入发展,利用叠前弹性信息进行"甜点"储 层预测已成为地球物理学界研究热点^[4]。印兴耀 等^[5] 在贝叶斯理论框架下,通过 2 项弹性阻抗反演 直接提取 RUSSELL 流体因子开展深层致密储层烃 类检测;刘力辉等^[6-8] 探讨了结合地震物相分类方 案实现"甜点"储层预测的新思路;许翠霞等^[9] 构 建了 RUSSELL 流体因子的拓展属性,提升了致密 砂岩含气性识别精度;张丹妮等^[10] 融合不同叠前 道集分频数据的优势属性,寻找西湖凹陷 N 构造致 密砂岩中的"甜点"发育区,但该方法预测精度较低 仅作宏观定性判识;张林清等^[11] 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,但实现过程较繁琐且具有局限性;曹冰等^[12] 开展多级相控-叠前敏感参数反演,优选黄岩 A 气 田储层改造"甜点"有利区,但反演结果在少井区易 受低频模型影响,储层非均质性刻画精度低;李九 娣等^[13] 以岩石物理为驱动,探索了一种敏感属性 合成的优势储层预测方法;周家雄等^[14] 依托岩石 物理反演直接提取岩性体粘土含量和孔隙度参数, 丰富了致密储层内幕刻画细节;王迪等^[15] 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^[16] 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;肖张波等^[17] 借助 泊松阻抗实现了古近系低渗"甜点"预测由定性到 定量的转变。

针对研究区致密砂岩储层"甜点"识别所面临 的岩性体波阻抗叠置严重、非均质性变化剧烈以及 含气饱和度差异大等问题,本文在地震岩石物理分 析的基础上,引入地震岩相、地震物相和地震流相 逐级预测思想,提出了一种基于叠前敏感属性直接 反演的地震"甜点"预测技术。应用实例证实该方 法对古近系致密砂岩"甜点"储层刻画具有较高精 度和适用性。

1 叠前 AVO 敏感属性直接反演

地震波反射系数的佐普利兹方程精确解及其 近似式是对全弹性波方程的简化,为从叠前 AVO 信息中直接提取能够反映地层岩性、物性以及含流 体性的弹性参数搭建了重要桥梁^[18]。

SHUEY^[19] 在 AKI-RICHARDS^[20] 近似基础上, 提出了反射系数的 AVO 截距和梯度的概念,给出 了小角度入射表示的反射系数近似公式。可表示 如下:

$$R_{\rm PP}(\theta) = P + G \cdot \sin^2 \theta + C \cdot \left(\tan^2 \theta - \sin^2 \theta\right) \quad (1)$$

$$P = \frac{1}{2} \left(\frac{\Delta V_{\rm P}}{V_{\rm P}} + \frac{\Delta \rho}{\rho} \right),$$

$$G = \frac{1}{2} \frac{\Delta V_{\rm P}}{V_{\rm P}} - 2 \frac{\Delta V_{\rm S}^2}{V_{\rm S}^2} \left(\frac{\Delta V_{\rm S}}{V_{\rm S}} + \frac{\Delta \rho}{\rho} \right),$$

$$C = \frac{1}{2} \frac{\Delta V_{\rm P}}{V_{\rm P}}$$
(2)

式中: P 为截距, 反映垂直入射反射振幅; G 为梯度, 反映振幅随入射角的变化率; C 为曲率, 反映振幅随速度的变化率。 RUSSELL^[21] 近似式是基于多孔弹性介质理论, 在 AKI-RICHARDS近似基础上推导了包含流体项 (f)、剪切模量(μ)和密度(ρ)的 AVO 3 项近似公式。 可表示如下:

$$R_{\rm PP}(\theta) = \left[\left(\frac{1}{4} - \frac{\gamma_{\rm dry}^2}{4\gamma_{\rm sat}^2} \right) \sec^2 \theta \right] \frac{\Delta f}{f} + \left[\frac{\gamma_{\rm dry}^2}{4\gamma_{\rm sat}^2} \sec^2 \theta - \frac{2}{\gamma_{\rm sat}^2} \sin^2 \theta \right] \frac{\Delta \mu}{\mu} + \left(\frac{1}{2} - \frac{\sec^2 \theta}{4} \right) \frac{\Delta \rho}{\rho}$$
(3)

式中: Δf 、 $\Delta \mu$ 和 $\Delta \rho$ 分别为反射界面两侧流体项、剪 切模量和密度的差值;

f、μ和ρ分别为反射界面两侧流体项、剪切模 量和密度的均值;

γ_{drv}为干岩石的纵横波速度比;

ysat 为干岩石的纵横波速度比。

本文采用的流体敏感属性 *F* 的构建思想是基于从 RUSSELL 流体因子中尽可能的消除骨架部分的影响^[22], 简要数学推导为:

$$F = \left(I_{\rm P}^2 - CI_{\rm S}^2\right) \cdot \left(\frac{3I_{\rm P}^2 - 4I_{\rm S}^2}{I_{\rm P}^2 - I_{\rm S}^2}\right)^{-1} = \frac{\rho f}{\rho E} = \frac{f}{E} \qquad (4)$$

其地震反射率可由下式变换获得:

$$\frac{\Delta F}{F} = \frac{\Delta \left(\frac{f}{E}\right)}{\left(\frac{f}{E}\right)} = \frac{\Delta f}{f} - \frac{\Delta E}{E} \tag{5}$$

本次反演以高质量的地震叠前全角度道集作 为输入,采用稳健抗噪最小二乘方法获得高信噪比 的弹性参数反射率体,进而结合有色反演等技术实 现叠前 AVO 敏感属性的直接提取^[23],有效规避了 常规通过间接运算求取的误差积累,提高了反演结 果的置信度。

2 研究区地质概况

东海 Q 构造位于某凹陷中央洼陷-反转构造带, 是在中新世晚期 EW 向挤压应力作用下形成的宽 缓低幅背斜构造,属于典型的"洼中隆"。研究区发 育缓坡背景下的河流-三角洲沉积体系,整体以三角 洲平原分流河道砂体为主。受埋深压实作用、成岩 作用和地质沉积环境影响,岩层波阻抗交叠严重, 储集体非均质性特征明显^[3]。主要目的层分布于 3 800~4 100 m。岩芯和壁芯资料表明,储层孔隙 度主要集中在 10% 左右, 10%~12% 的占比 44.3%, 溶蚀现象普遍。渗透率主要集中在 1×10⁻³ µm² 以下, (0.5~1)×10⁻³ µm² 的占比 47.02%。总体为低孔低 渗,局部发育"甜点"(表 1)。实践证明,该区存在 致密背景下"一块多藏、一砂一藏"的复杂岩性油 气藏模式,落实致密碎屑岩储层"甜点"分布范围是 打开该区新领域勘探突破的关键环节。

表 1 研究区储层 "甜点" 类型划分标准 Table 1 Classification criteria of reservoir "sweet spot"

III ule research area			
类别	孔隙度	气饱和度	渗透率/×10 ⁻³ µm ²
I类"甜点"	>0.12	>0.4	>1.0
Ⅱ类 "甜点"	0.10~0.12	>0.4	0.5~1.0
非"甜点"	< 0.10	_	<0.5

3 "甜点" 岩石物理分析

致密储层"甜点"展布规律由地质沉积有利岩



相、物相以及流相共同控制^[24]。寻找优势相带的敏 感弹性属性是利用地震资料开展"甜点"预测的 岩石物理基础^[25]。受地质沉积环境等因素的影 响,储层岩石物理特征呈现出明显的区域性和独特 性。结合研究区实际样本统计分析优选最佳的敏 感属性,即可对地震岩相、物相以及流相开展精细 描述。

3.1 地震岩相敏感属性分析

通过岩性体刻画落实有利沉积相是"甜点"预测的前提。叠前 AVO 截距(P)属性反映的是自激 自收时的界面阻抗差异,当岩层阻抗叠置较小时能 够有效识别岩性。叠前 AVO 梯度(G)属性是纵横 波速度比的变化特征的综合体现,能够较好指示 碎屑岩岩性差异(图 1a)。而由二者通过角度旋转 合成的扩展弹性阻抗(EEI35°)属性具有更强区分 性^[26],可作为地震岩相识别的敏感属性(图 1b)。







3.2 地震物相敏感属性分析

低孔、低渗储集体内相对物性好的优质储层是 烃类的重要富集空间。根据储层评价类别划分标 准,将孔隙度≥0.12,且渗透率≥1×10⁻³μm²的储集 体作为研究区的优质储层。由测井解释成果分析 显示,优质储层整体表现为低密度和低纵波阻抗的 弹性特征(图 2a),并且孔渗关系具有较好的一致性 (图 2b)。受埋深压实作用,纵波阻抗存在一定叠置, 而密度具有较高区分度。因此,可以将密度作为区 分高孔优质储层的敏感属性^[17]。

3.3 地震流相敏感属性分析

相比于岩石固体骨架,孔隙流体所激发的地震

信号微弱。其影响主要体现在岩石纵波速度中,而 横波速度仅反映岩石骨架性质,随含水饱和度的降 低呈现较小的上升趋势^[27]。RUSSELL基于孔隙弹 性介质理论,从各向同性纵波速度中分离出流体项 (f),并将其作为烃检因子表现出较高的灵敏性和稳 定性^[28]。但含烃层与非烃层之间仍存在较强叠置。 研究发现储层含气后杨氏模量(E)呈增大趋势,且 数值越大表征岩石的脆性越好越易造缝。进而,引 入杨氏模量(E)构建了流体敏感复合属性(F)。岩 石物理统计分析显示复合属性(F)叠置区间更小, 地震流相识别能力进一步增强(图 3)。

结合已钻井 B 井完备的高质量实测井曲线及 解释成果,对研究区 12 种弹性参数敏感度进行了 定量统计计算^[3]。图 4 显示常规参数纵、横波阻









Fig.3 Seismological analysis of sensitive attribute in rheology





Fig.4 Quantitative analysis of fluid sensitive of different elastic parameters

抗和体积密度的敏感指示系数最低; 泊松比和弹 性模量及其密度组合等整体敏感指示系数相对较 高, 其中流体项(f)和复合属性(F)的灵敏度最高。 因此, 通过井间岩石物理判析表明复合属性(F) 能够有效满足对致密砂岩储层地震流相识别的精 度要求。

4 实例应用

研究区 Q 构造为弱反转挤压背景下形成的低 幅背斜构造,早期勘探阶段部署了 A、B 和 C 井 3 口 探井。目前已钻井揭示渐新统储层十分发育,纵向 上发育厚达几十米的大型储集体,平面上各层储集 体均有发育,表现为明显的分流河道砂岩特征。研 究区主要目的层为 M1、M2 和 M3 层,其中 M2 层 砂岩更富集,厚度更大,以细砂岩为主,局部发育中 粗砂岩,且厚层稳定分布。岩芯、壁芯物性分析资 料表明,Q构造在 M1 及以上层位主要以常规-低孔 低渗储层为主,进入到 M2 层逐渐过渡到特低孔低 渗储层。通过已钻井资料发现,M2 层整体为多期 分流河道叠置厚砂体,河床底部滞留沉积/冲刷面 附近粗相带为"甜点"发育区。落实古近系"甜点" 储层展布规律是该区实现"扩储增产"的重要源 动力。 本文以高质量地震数据为输入,结合前述地震 岩石物理判析,分别开展地震岩相、地震物相和地 震流相预测,进而实现目的层"甜点"地震精细描述。 为了验证本反演方法的有效性,对比分析了常规基

于模型反演和基于有色反演的地震岩相预测结果。 研究显示,在少井区,前者易受低频模型影响,砂体 横向边界不清晰,纵向分辨率较低,并难以表征储 集体的非均质性(图 5a);而后者不仅与测井泥质含



量(*Vsh*)吻合度高(约 90%)(图 5b),而且有效保持 了振幅空间变化特征,更能客观体现地质沉积规律 (图 6a)。与此同时,利用本反演方法获得的地震物 性(ρ)和地震流相(*F*)数据体清晰刻画了储集体内 幕高孔、高气饱特征的展布规律(图 6b、c),与测井 解释成果匹配度分别达到约86%和82%(图5c、d)。 后续为了评价M2层的产能设计钻探了H井,该井 在水平段前端显示储层物性较差、气饱较低,而在 后端钻遇了相对高孔、含气"甜点"储层。本次成 果准确描述了这一现象,从而证实了该方法的有效性。



(a) EEI35°岩性预测平面属性; (b) ρ物性预测平面属性; (c) F流体预测平面属性; (d) 构造与"甜点"属性叠合图

图 6 研究区主力层 M2 沿层"甜点"平面属性

Fig.6 The horizon attribute of "sweet spot" in the main layer M2 in the research area

构造"甜点"平面叠合属性显示 M2 层发育 3 条 分流河道,已钻井均位于主河道,钻遇较厚储层。 受沉积微相控制,主河道宽部位、孔隙度>0.10 以 及含气饱和度>0.4 的"甜点"优势储层发育区位 于 A 井南部和 C 井北部的构造两翼(图 6d),为典 型的岩性复合型气藏。现已设计了 2 口评价井,以 期打开新领域勘探开发一体化的新局面。本研究 成果为该区潜力目标搜索和井位优化部署提供了 有力的技术保障。

5 结论

东海Q构造主力层呈埋深大、低孔渗特征,储

集体内幕非均质性变化剧烈。本文以地震岩石物 理为驱动,结合敏感弹性属性反演实现了古近系致 密碎屑岩"甜点"地震预测。

(1)在中深层岩性阻抗叠置区,通过角度旋转 合成的扩展弹性阻抗(EEI35°)属性相对于梯度阻抗 (GI)属性能够更好地区分砂泥岩,储层低密度特性 可有效指示相对物性好的储集体发育区,复合属性 (F)具有更加敏感的流体识别能力,为地震岩相、地 震物性及地震流相刻画提供了重要依据。

(2)以高质量的叠前全道集为输入,将稳健抗 噪最小二乘法与有色反演相结合,开展敏感属性的 直接提取,有效规避了间接组合产生的累计误差, 提高了反演置信度。 (3)采用渐进式相控约束思想预测的储层"甜 点"多解性降低,并符合区域地质沉积认识,对于东 海其他类似地质背景地区的"甜点"刻画具有广阔 的应用前景和推广意义。

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] 国家能源局. 致密砂岩气地质评价方法[S]. 北京: 石油工业出版社, 2011.
- [3] 张岩,秦德文,胡伟.基于Russell流体因子的东海古近系烃类检 测方法研究及应用[J].地球物理学进展,2022,37(2):920-927.
- [4] 印兴耀,曹丹平,王保丽,等.基于叠前地震反演的流体识别方 法研究进展[J].石油地球物理勘探,2014,49(1):22-34.
- [5] 印兴耀,张世鑫,张峰.针对深层流体识别的两项弹性阻抗反演 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.
- [6] 刘力辉,陈珊,倪长宽.叠前有色反演技术在地震岩性学研究中的应用[J].石油物探,2013,52(2):171-176.
- [7] 刘力辉,李建海,杨晓,等. 叠前AVO属性的地震岩性学探索与 实践研究[J]. 石油物探, 2013, 52(2): 53-58.
- [8] 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, 171-176.
- [9] 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.
- [10] 张丹妮, 姜效典, 邢军辉, 等. 地震属性预测西湖凹陷N构造 "甜点" [J]. 特种油气藏, 2016, 23(4): 73-76.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 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, 52(2): 171-176.

- [14] 周家雄,马光亮,随波,等.储层参数岩石物理反演在"甜点" 储层预测中的应用研究:以W17油田为例[J].地球物理学进展,2019,34(3):1159-1169.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] 肖张波, 雷永昌, 邱欣卫, 等. 泊松阻抗属性在陆丰南古近系 低渗砂岩储层"甜点"识别中的应用[J]. 海洋地质前沿, 2022, 38(6): 70-77.
- [18] 李红梅.弹性参数直接反演技术在储层流体识别中的应 用[J].物探与化探,2014,38(5):970-975.
- [19] SHUEY R T. A simplication of the Zoeppritz equations[J]. Geophysics, 1985, 50(4): 609-614.
- [20] AKI K, RICHARDS P G. Quantitative seismology: Theory and methods[M]. San Francisco: W.H. Freeman and Co., 2002.
- [21] RUSSELL B, GRAY D, HAMPSON D. Linearized AVO and poroelasticity[J]. Geophysics, 2011, 76(3): 19-29.
- [22] 冷雪梅,杜启振,孟宪军.基于纵横波弹性阻抗联合反演的储 层流体检测方法[J].断块油气田,2019,26(3):319-323.
- [23] YANG J L, ZHANG H, XIE L F, et al. The prediction of Jurassic gas-sand with low water saturation using seismic-derived density property: a case study from Sichuan Basin[J]. SEG Technical Program Expanded Abstracts, 2013: 433-436.
- [24] 尤丽, 张迎朝, 李才, 等. 文昌10区珠海组低渗储层"甜点"控制因素[J]. 东北石油大学学报, 2014, 38(3): 18-24.
- [25] 张建坤,吴吉忠,许文会,等.基于岩石物理的致密砂岩油藏 地堑优势储层预测:以渤海湾盆地南堡凹陷4号构造东营组 二段为例[J].石油学报,2017,38(7):793-803.
- [26] 秦德海,李德郁,蔡纪琰,等.扩展弹性阻抗在低孔、低渗砂砾 岩储层物性预测中的应用[J].地球物理学进展,2018,33(5): 2148-2152.
- [27] 贾凌云,李琳,王千遥,等.基于广义弹性阻抗的流体因子反 演方法研究与应用[J].石油物探,2018,57(2):302-311.
- [28] PAN X P, LI L, ZHANG G Z, et al. Elastic-impedance-based fluid/porosity term and fracture weakness inversion in transversely isotropic media with a tilted axis of symmetry[J]. Geofluids, 2020, 86(1): 1-18.

Method and application of "sweet spot" seismic prediction of the Paleogene low-porosity low-permeability clastic rock in the East China Sea Basin

ZHANG Yan, QIN Dewen

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

Abstract: Low-porosity low-permeability reservoirs are widely developed in the Paleogene Q structure in the East China Sea Basin, and the overall heterogeneity of sand body curtain changes dramatically. The key problem to be solved in the integration research of exploration and development of the Q structure is to delineate the superior reservoir development area of "sweet spot". A prediction method of seismic "sweet spot" was established by sensitive attribute inversion, of which the main idea is to realize the prediction of tight reservoir "sweet spot" by advanced optimization in seismic lithofacies, physical facies, and fluid facies. In this paper, the EEI (extended elastic impedance) attributes combining AVO (amplitude variation offset) intercept and gradient were used to predict lithofacies. The low-density characteristics of high-porosity sandstone reservoir were used to predict physical facies. Combining qualitative and quantitative analysis in rock physics, new composite attributes were optimized to identify fluid facies. Finally, "sweet spot" reservoir could be predicted accurately under the guidance of hierarchical phase control. Application examples showed that this method could be effectively characterize the distribution of tight clastic "sweet spots" in the research area, and provided an important reference for subsequent target search and well-location optimization in high reliability and application value.

Key words: seismic lithology; seismic rock physics; pre-stack AVO attribute; colored inversion; "sweet spot" prediction