

李久娣, 孙莉, 魏水建, 等. 东海海域深层 HG 组低渗储层“甜点”预测方法及应用[J]. 石油物探, 2019, 58(5): 758-765

LI Jiudi, SUN Li, WEI Shuijian, et al. “Sweet Spot” prediction and its application in the low permeability reservoir of the deep HG formation in the East China Sea[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2019, 58(5): 758-765

东海海域深层 HG 组低渗储层“甜点”预测方法及应用

李久娣¹, 孙莉¹, 魏水建², 贾跃玮²

(1. 中国石油化工股份有限公司上海海洋油气分公司, 上海 200120; 2. 中国石油化工股份有限公司石油勘探开发研究院, 北京 100083)

摘要: 东海深层 HG 组目的层埋藏深(>3500 m), 储层具有低孔低渗特征, 但局部发育“甜点”储层。由于“甜点”储层界限模糊, 且与差储层及致密层地球物理响应差异小, 因而预测难度大。为此, 首先从井出发, 在“甜点”储层主控因素分析的基础上, 结合动态分析测试成果, 建立分类储层综合评价标准, 定义“甜点”储层界限; 然后开展分类储层岩石物理分析, 研究储层岩相及“甜点”储层弹性参数敏感性, 通过叠前同时反演确定储层岩相及优质储层展布; 最后, 采用叠前 AVO 敏感属性流体检测技术预测含气富集区带, 有效刻画“甜点”储层展布。实际应用结果表明, 这种方法极大提高了研究区“甜点”储层预测的精度, 为落实分级储层规模、部署开发井位和优化调整方案提供了科学的地质依据, 在相似气田开发中有一定的借鉴意义。

关键词: 海域; 深层; 低渗气藏; “甜点”储层; 岩相; 优质储层; 流体检测

中图分类号: P631

文献标识码: A

文章编号: 1000-1441(2019)05-0758-08

DOI: 10.3969/j.issn.1000-1441.2019.05.015

“Sweet Spot” prediction and its application in the low permeability reservoir of the deep HG formation in the East China Sea

LI Jiudi¹, SUN Li¹, WEI Shuijian², JIA Yuewei²

(1. Sinopec Institute of Shanghai Offshore Petroleum Company, Shanghai 200120, China; 2. Sinopec Petroleum Exploration and Production Research Institute, Beijing 100083, China)

Abstract: Although the deep HG formation in the East China Sea is deeply buried, and the reservoir exhibits low porosity and permeability, “sweet spots” have developed locally. The key to oil and gas exploration and development is to find high quality “sweet spot” reservoirs. Because of the small differences in the physical response between “sweet spot” reservoirs and bad reservoirs or tight layers, it is difficult to predict “sweet spot” reservoirs using seismic data. To effectively depict the distribution of “sweet spot” reservoirs, “sweet spot” prediction technology has been developed based on geophysics. First, the controlling factors analysis of the “sweet spot” reservoir combined with the dynamic analysis of the test results is used to establish the evaluation standard of the reservoir, thereby determining the definition of the “sweet spot.” the evaluation standard for reservoirs is established based on factors controlling “sweet spot” reservoirs and a dynamic analysis of the test results. The definition of a “sweet spot” reservoir is determined. Then sensitive elastic parameters used to identify litho-facies and “sweet spots” are extracted using petro-physics analysis. Reservoir litho-facies and good reservoir distributions can be predicted by simultaneous inversion using pre-stack gathers, and gas enrichment zones can be predicted using pre-stack AVO technology. Finally, “sweet spot” reservoirs can be revealed by the combination of inversion results and the recognition of gas. The exploration and production application demonstrated that this

收稿日期: 2019-01-14; **改回日期:** 2019-04-02。

作者简介: 李久娣(1970—), 女, 高级工程师, 硕士, 长期从事海上油气田开发方面工作。Email: lij.d.shhy@sinopec.com

基金项目: 国家科技重大专项“低丰度致密低渗油气藏开发关键技术”(2016ZX05048)、中国石化科技攻关项目“东海深层低渗气藏开发关键技术”(P15124)共同资助。

This research is financially supported by the National Science and Technology Major Project of China (Grant No.2016ZX05048) and the Sinopec Science and Technology Key Project (Grant No.P15124).

method was able to achieve favorable results in the prediction of the low permeability “sweet spot” sandstone reservoirs in the deep Huagang Formation in the sea and can thus provide a reference for other tight sand “sweet spot” reservoir predictions.

Keywords: sea area, deep formation, low permeability gas reservoir, “sweet spots” reservoir, litho-facies, high quality reservoir, fluid prediction

东海海域深层 HG 组埋深大于 3500 m, 发育三角洲沉积体系, 储层为典型的低孔低渗砂岩储层^[1-2], 局部发育“甜点”储层。相对陆上低渗气藏开发, 海上低渗气藏开发成本高、工艺技术限制多, 有效落实“甜点”储层分布, 合理部署开发方案, 在低渗气藏经济高效开发方面显得尤为关键。由于传统的“甜点”储层定义界限不明确, 与差储层及致密层地球物理响应差异小, 单一参数或方法敏感性差, 预测精度低, 因而“甜点”储层表征困难。

世界上低孔低渗油气田资源丰富, 分布广泛, 在油气资源中占有重要地位。我国近些年发现的低孔低渗油气田越来越多, 低渗透储量在已发现储量中占比大于 30%^[3-4]。因此, 低渗气藏在油气勘探开发中占有十分重要的地位, 在低孔低渗储层中寻找相对优质“甜点”储层是低渗致密气藏勘探开发的重点和难点^[5-6]。近年来拟阻抗反演技术、叠前反演技术在常规储层及孔隙度等预测方面取得了较好的效果^[7-9], 利用叠前反演技术得到的扩展弹性阻抗、泊松阻抗以及泊松阻尼因子等属性在常规储层的流体检测方面也取得了一定成效^[10-12], 但目前对于深层低孔低渗储层中“甜点”储层的预测方法技术相对较少^[13-16], 且应用局限性明显, “甜点”储层地质意义不明确, 优质储层多以单一孔隙度指标进行划分, 未考虑不同岩相孔渗关系的差异性, 岩相和分类储层预测参数相同, 因而预测方法精度不高, 多解性较强。

本文针对东海深层 HG 组的地质特点, 在“甜点”储层主控因素分析的基础上, 结合动态分析测试成果, 建立分类储层评价标准, 定义“甜点”储层界限。在研究过程中按照“控岩相、定优储、寻甜点”逐级控制的思路和方法开展“甜点”储层地震预测: 首先开展储层岩石物理分析, 研究储层岩相及“甜点”储层弹性参数敏感性, 在多个弹性参数中找出 v_p/v_s 岩相敏感参数、纵波阻抗和体积模量优质储层敏感参数; 然后通过叠前 v_p/v_s 反演落实储层岩相展布, 并对纵波阻抗及体积模量进行岩相过滤进而确定优质储层展布; 最后采用叠前 AVO 敏感属性流体检测技术预测含气富集区带, 有效刻画“甜点”储层的展布, 取得了较好的效果。

1 储层特征及“甜点”储层主控因素

1.1 储层特征

岩心观察和岩石薄片鉴定结果表明, 深层 HG 组储层岩性以细砂岩为主, 其次为砂砾岩, 含部分粉砂岩。岩石类型以岩屑长石砂岩为主, 其次为长石岩屑砂岩。储层空间类型主要是粒间溶孔, 其次为铸模孔及粒内溶孔, 少量原生粒间孔。根据实测样品的统计分析, 储层孔隙度一般为 2%~17%, 平均为 7.85%; 渗透率为 0.2~10.0 mD, 平均为 3.65 mD ($1 \text{ mD} \approx 0.987 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$), 以低孔-特低孔-低渗为主, 局部发育“甜点”储层。

1.2 “甜点”储层主控因素

综合分析沉积相、岩相和孔隙结构等地质因素认为本工区 HG 组沉积相、岩性、孔隙结构对储层物性的控制作用明显。

1) 沉积微相控制着有利储层发育与分布: 厚层分流河道为有利微相, 其它微相物性相对较差, 同一分流河道微相中下部储层物性好于中上部。

2) 岩性控制着储集岩的物性: 分选好的中细粒砂岩、含砾砂岩物性好, 分选较差的砂砾岩及粒度较小的粉砂岩物性较差。

3) 孔隙结构控制着储集岩的渗透率: 孔隙结构受岩性、成岩作用等控制, 对产能控制作用明显, 中小孔-中粗喉为高产的有利孔喉配置组合。

1.3 “甜点”储层的界定

根据东海海上气藏开发经验, 测试无阻流量小于 $1.0 \times 10^4 \text{ m}^3$ 的储层一般难以获得自然产能, 测试无阻流量介于 $(1 \sim 50) \times 10^4 \text{ m}^3$ 的储层可获得自然产能, 测试无阻流量介于 $(50 \sim 100) \times 10^4 \text{ m}^3$ 的为好储层, 测试无阻流量大于 $100 \times 10^4 \text{ m}^3$ 的为优质储层。以 HG 组实际测试层段试气结果为约束, 根据测试结果差异所反映的地质及岩电参数界限, 建立地质-产能相结合的储层综合评价标准, 将目的层储层划分为 4 种类型(表 1), 确定一、二类储层为研究区优质储层, “甜点”储层为优质储层中的高丰度含气层段, 主要位于主分流河道, 岩性以中细砂岩为主, 具有高孔($>9\%$)、高渗($>1.0 \text{ mD}$)、大吼道半径($>0.7 \mu\text{m}$)和高产特性(无阻流量 $>50 \times 10^4 \text{ m}^3$)。

表 1 深层 HG 组储层综合评价结果

类别	沉积相带	岩性	电性			物性		孔隙结构		含气性		自然产能
			自然伽马/API	声波时差/ $(\mu\text{s}\cdot\text{ft}^{-1})$	密度/ $(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	$\varphi, \%$	k/mD	喉道半径/ μm	$S_g, \%$	密度与中子孔隙度差, %	声波与中子孔隙度差, %	无阻流量/ $(\times 10^4\text{ m}^3)$
一类储层	分流河道	中-细砂岩	45~70	>70.0	<2.47	≥ 12.0	>5.0	>1.5	≥ 50	>8	>0	>100
二类储层	分流河道	中-细砂岩 含砾砂岩	25~70	>67.5	<2.49	>9.0	>1.0	>0.7	≥ 45	>8	>0	>50
三类储层 A	分流河道	中-细砂岩 含砾砂岩 砂砾岩	25~70	>65.0	<2.53	>7.6	>0.5	>0.5	≥ 40	>0	>0	1~5
三类储层 B	分流河道 溢岸砂坝	粉砂岩 中-细砂岩 含砾砂岩 砂砾岩	28~80	>63.0	<2.58	≥ 6	>0.2	>0.3	35~45	>0	>0	<1

注: φ 为孔隙度, k 为渗透率, S_g 为含气饱和度。1 ft $\approx$ 0.3048 m, 1 mD $\approx$ 0.987 $\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$ 。

2 “甜点”储层地震预测

2.1 岩相敏感参数分析及预测

测井响应特征分析的结果表明, HG 组储层岩性主要为砂岩, 相对泥岩层表现为低密度、低声波时差、低伽马、相对高阻抗、低 v_p/v_s 特征。在测井响应特征分析的基础上, 采用直方图统计方法对砂泥岩测井

参数的敏感性进行了分析。砂泥岩阻抗值分布范围差异小, 不同岩性在阻抗属性上叠置严重, 难以有效区分。相对阻抗属性来说, v_p/v_s 属性对不同岩性的分异性相对明显, 泥岩、砂岩和砂砾岩在 v_p/v_s 直方图上具有不同的峰值范围, 具有较好的分异性(图 1)。一般泥岩岩性对应的 v_p/v_s 大于 1.65, 砂岩岩性对应的 v_p/v_s 为 1.58~1.65, 砂砾岩岩性对应的 v_p/v_s 小于 1.58。

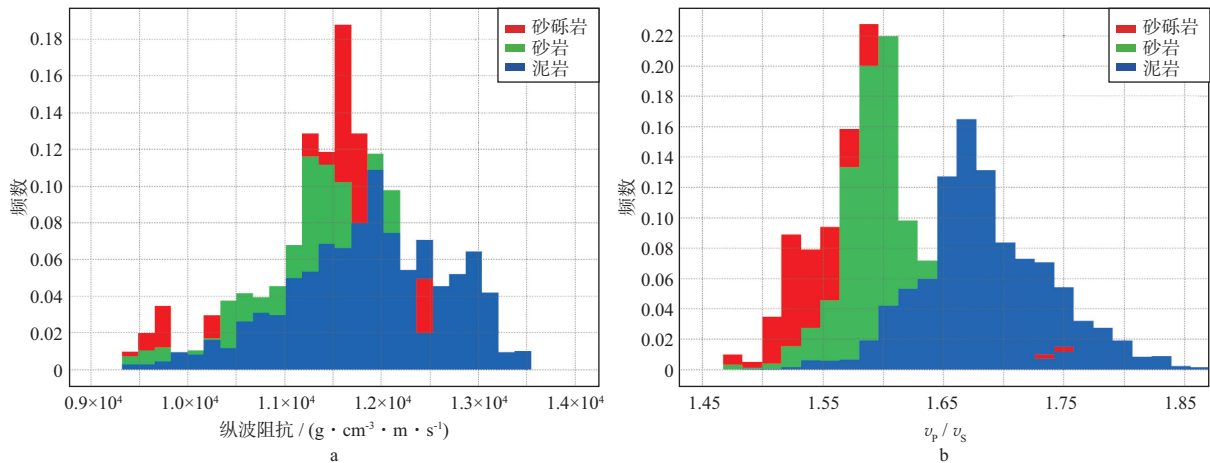


图 1 深层 HG 组不同岩性的纵波阻抗(a)和 v_p/v_s (b)直方图

2.2 优质储层反演预测

研究区储层非均质性强, 既有测试无阻流量大于 $50\times 10^4\text{ m}^3$ 的“甜点”储层, 也有测试难以获得产能的低渗储层。产能较好的“甜点”储层是物性相对好的优质储层, 因此, 寻找优质储层是研究“甜点”储层的基础。

对众多弹性参数进行岩石物理分析, 发现纵波阻

抗和体积模量属性对优质储层反映较敏感, 综合利用这两种属性能较好地识别优质储层。从不同类型储层的纵波阻抗和体积模量的交会图(图 2)可以看出, 不同类型储层分异明显, 深层优质储层具有低阻抗和小体积模量特征, 优质储层纵波阻抗值一般小于 $11400\text{ g/cm}^3\cdot\text{m/s}$, 体积模量一般小于 28 GPa。因此通过叠前弹性参数反演, 利用体积模量参数, 结合

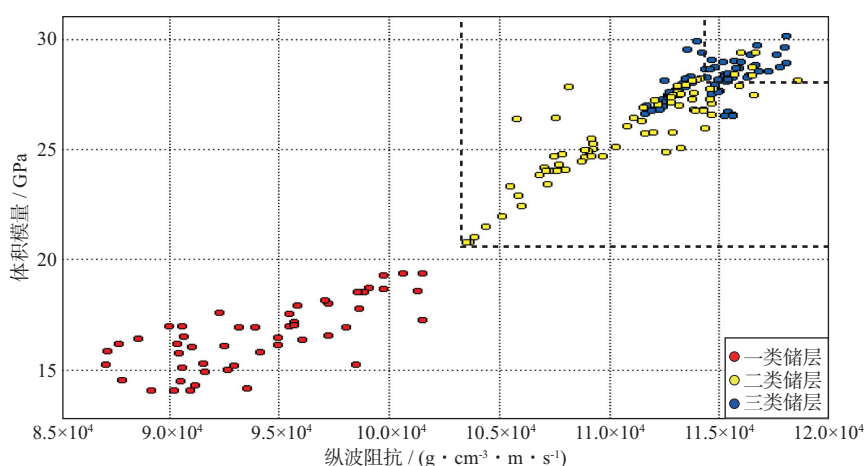


图2 深层HG组不同类型储层纵波阻抗和体积模量交会结果

纵波阻抗属性能较好地表征优质储层的分布。常规方法先通过叠后波阻抗反演预测岩性,再通过纵波阻抗和物性之间的关系反演求取物性参数数据体,进而进行优质储层刻画。而本文方法能够减少多次反演过程中引入的近似误差,极大提高了预测的精度,且回避了单一参数表征优质储层的不合理性。

2.3 叠前 AVO 敏感属性含气性检测

AVO 技术是通过研究地震反射振幅随炮检距(或入射角)变化而变化的规律,预测地层岩性和含油气情况的一种方法,是开展流体信息分析的有效手段^[17-19]。传统 AVO 属性包括截距 P 和梯度 G ,以及由 P 和 G 组合而成的多种属性,其只适用于响应特征单一的区域,对非均质性较强的多 AVO 响应类型区域难以取得理想预测效果。AVO 技术经过几十年的发展,特别是近年来诸如伪横波反射系数、拟泊松比等衍生 AVO 属性的发展和应用,使得该技术在油气勘探开发中处于不可替代的地位。

2.3.1 叠前 AVO 响应分析

研究区目的层储层埋藏深,物性相对致密,流体地震响应敏感性弱,在开展 AVO 属性分析之前,需要对含气储层 AVO 响应类型做出判断,从而优选相应的属性进行分析。

通过时深精细标定,确定含气储层段对应的地震反射同相轴,研究叠前偏移距道集的横向变化规律。A 井 2700 ms 气层段顶面井旁地震道为波峰反射同相轴(图 3a),随入射角的增加振幅能量减弱,为 I 类 AVO 响应特征(图 3b);B 井 2840 ms 含气水层段井旁地震道为波谷反射同相轴(图 3c),具有随着入射角的增加振幅能量逐渐增强的特征,为 III 类 AVO 响应特征(图 3d);A 井 2980 ms 气层段顶面井旁地震道为波峰反射同相轴(图 3e),随入射角的增加振幅能量减弱,到远入射角极性反转,为 II 类 AVO 响应

特征(图 3f)。

上述研究表明,研究区储层段 AVO 响应特征复杂,发育多种 AVO 响应类型气藏,使得 AVO 截距与梯度含气响应在储层段同时具有正、负两种异常特征,依靠传统截距、梯度的 AVO 属性分析方法结果多解性较强,难以获得准确的含气性预测结果。

AVO 流体因子属性是一种基于岩层背景趋势线偏移度判别含气性特征的方法,可有效规避传统 AVO 属性的多解性问题。该属性基于纵波与横波速度的线性关系为:

$$v_p = b + av_s \quad (1)$$

式中: v_p 为纵波速度; v_s 为横波速度; b 为纵波速度与横波速度线性关系式的截距; a 为纵波速度与横波速度线性关系式的斜率。利用纵波、横波通过含流体储层时的速度变化差异来判别含油气的情况。对公式(1)求微分并除以 v_p 可得到流体因子 ΔF :

$$\Delta F = \frac{\Delta v_p}{v_p} - b \frac{v_s}{v_p} \frac{\Delta v_s}{v_s} \quad (2)$$

式中: Δv_p 为纵波速度变化率; Δv_s 为横波速度变化率。公式(2)右端第 1 项为纵波速度的实际变化率,第 2 项为横波速度对纵波速度比值与横波速度变化率的乘积。由于纵波速度随流体性质差异而变化,而横波速度在流体中不发生变化,当地震波穿过含气储层时,由于纵波速度下降,而横波速度不变,此时 ΔF 明显偏离不含气地层。

2.3.2 叠前 AVO 属性含气性检测

通过叠前反演,得到研究区 AVO 流体因子属性,对比实钻井情况,两口实钻井的主力含气层段与属性异常有良好的对应关系(图 4),气层顶界具有强负流体因子属性。A 井主力气层呈明显的低值流体因子属性异常。B 井钻遇的两套气水同层和水层对应属性的较大值(黄色和绿色条带),显示与钻遇气层

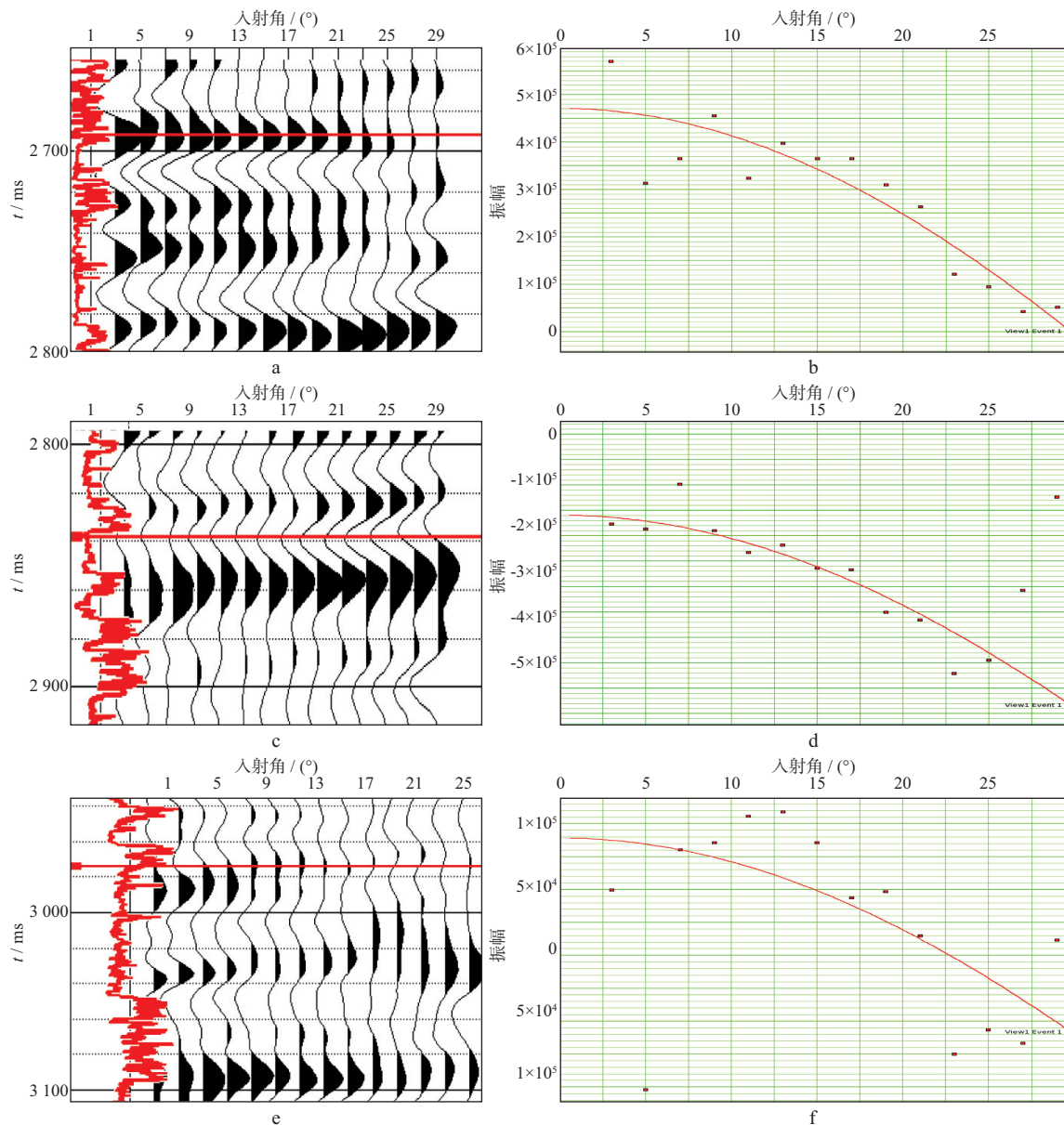


图 3 AVO 响应特征

a A 井井旁地震道集 1; b A 井 I 类 AVO 特征; c B 井井旁地震道集; d B 井 III 类 AVO 特征; e A 井井旁地震道集 2; f A 井 II 类 AVO 特征

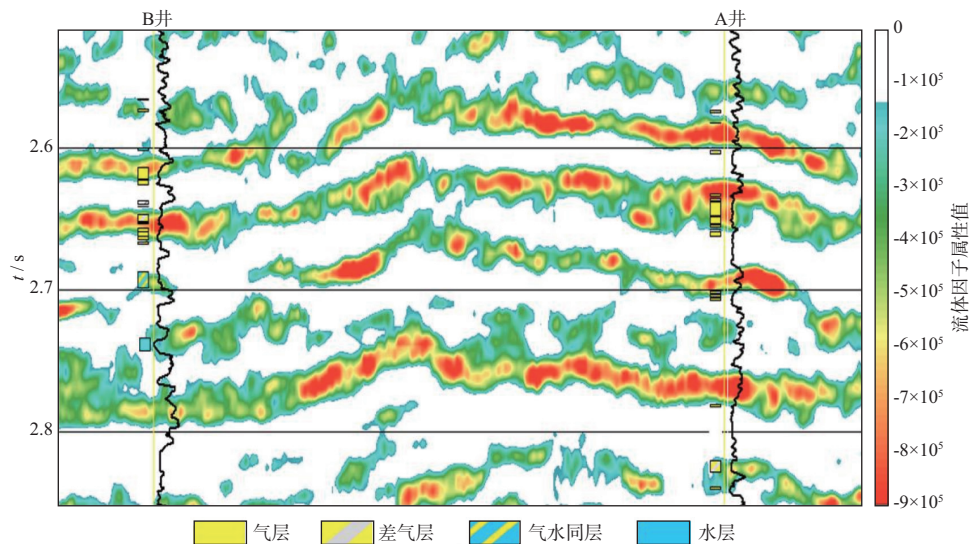


图 4 叠前 AVO 流体因子属性剖面

的属性差异明显,反映流体因子属性能够满足研究区含气性的识别。

考虑到流体因子属性预测方法无井资料的约束,存在一定的多解性,结合气层和水层与流体因子属性值较好的相关关系,通过 AVO 流体因子与含气饱和度交会分析,辅助界定气水的分异门槛值,进一步开展属性分析,从而刻画含气储层边界。研究区含气饱和度低于 40% 储层段对应着流体因子大于 -4×10^5 的高值区域;含气饱和度大于 40% 时,流体因子属性异常值均小于 -4×10^5 ,且随着含气饱和度的增加,属性值越来越小。据此可设定气水分异门槛值为 -4×10^5 (图 5)。以目的层 Y 顶底界为时窗,以气水流体因子属性门槛值为依据可圈定含气区带范围 (图 6)。

对照目的层实钻井信息验证发现,A 井目的层钻

遇气层,B 井钻遇为水层,预测结果与实钻情况一致。

3 应用效果

根据深层 X 气藏“甜点”储层的界定,优质储层主要以主分流河道砂岩相为主,物性较好,具有一定的产能,综合前文所述方法预测结果,采用岩相预测-优质储层预测-含气性预测-“甜点”储层刻画逐级控制的研究思路,圈定 X 气藏目的层 Y 的“甜点”储层分布范围 (图 7,图 8,图 9)。通过开展叠前纵波阻抗及体积模量参数反演,并应用叠前反演 v_p/v_s 弹性参数体对纵波阻抗和体积模量进行岩性过滤 (按 v_p/v_s 取值 1.58 进行岩性过滤),可得到优质储层预测成果 (图 7,图 8),剖面中井曲线为伽马测井曲线,红色虚线标注层段为目的层 Y。以目的层 Y 顶底界面为时窗,以储层岩石物理量板为依据提取优质储层平面展布如图 9 所示。图 9 中,红色区域为一类储层分布

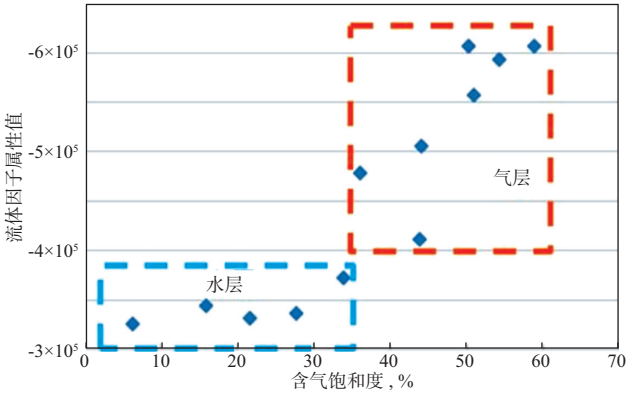


图 5 流体因子属性与含气饱和度交会结果

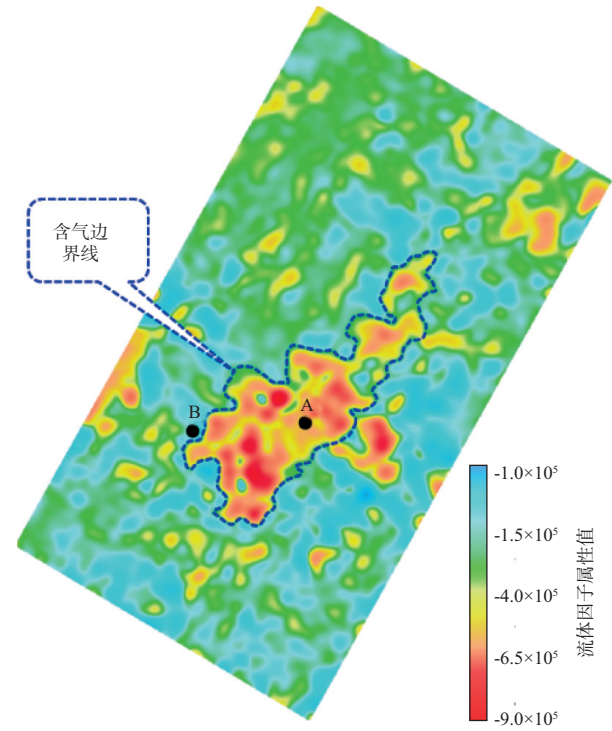


图 6 流体因子属性预测有利富集区

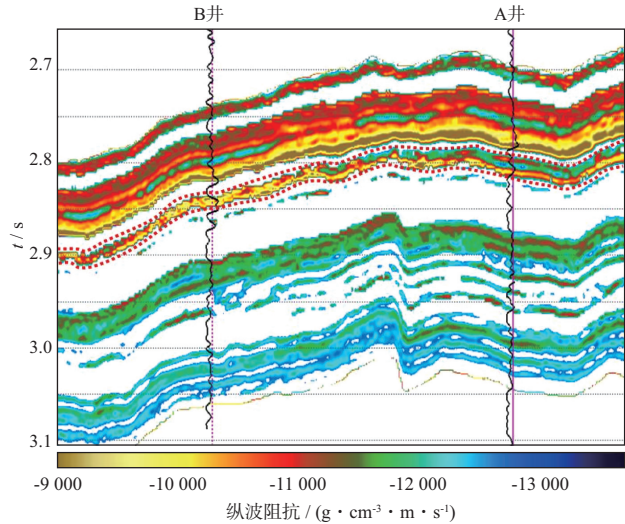


图 7 叠前同时反演纵波阻抗反演剖面 (岩相过滤)

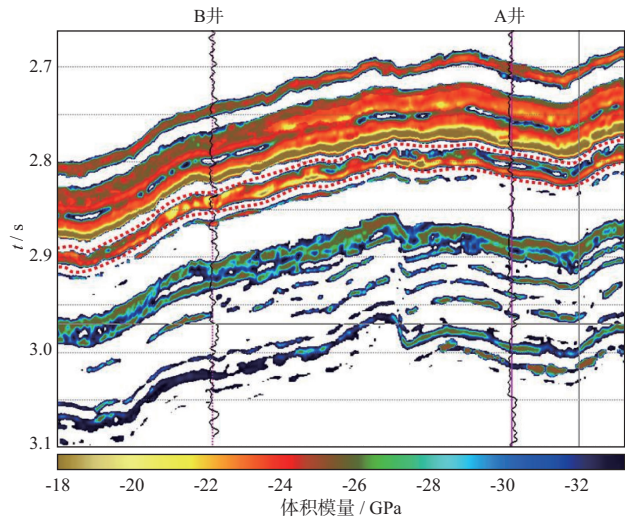


图 8 叠前同时反演体积模量反演剖面 (岩相过滤)

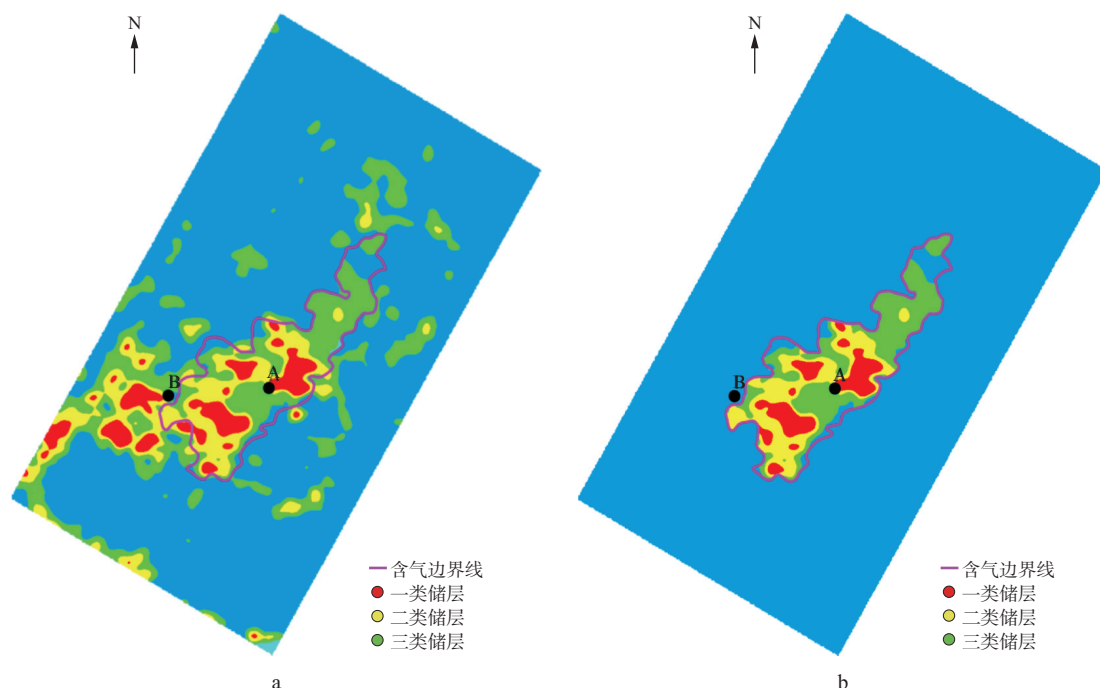


图 9 “甜点”储层预测分布展示

a 储层平面分布; b 有效储层平面分布

区,黄色区域为二类储层分布区,实线圈定的范围为有利含气区,其中图 9a 中 B 井以西地区储层物性相对较好,但含气性检测为水层,揭示为非“甜点”区。预测结果显示该气藏“甜点”储层主要分布在粉色线条圈定的红、黄条带分布区域。

实钻井资料揭示,A 井在目的层显示为一套厚度大于 20 m、孔隙度为 9.1% 的气层,B 井在目的层显示为一套厚度大于 30 m、孔隙度为 8.6% 的水层,与预测结果吻合(表 2)。

表 2 实钻井目的层储层物性参数

井名	储层物性			
	厚度/m	孔隙度, %	渗透率/ ($10^{-3} \mu\text{m}^{-2}$)	含气饱和度, %
A 井	24	9.1	1.2	46
B 井	32	8.6	0.9	32

4 结论

1) 东海海域深层“甜点”储层的分布受岩相控制作用明显,不同岩相储层孔渗关系复杂。通过建立优质储层与弹性参数之间的相关关系,实现叠前纵波阻抗及体积模量双参数对优质储层的直接识别与预测,消除了传统的通过单参数阻抗反演结合阻抗和孔隙度关系式反演物性参数预测优质储层分布的复杂性和不确定性,提高了优质储层识别精度。

2) 以地质分析为指导,结合动态测试结果,动静结合建立储层分类标准,采用“控岩相、定优储、寻甜点”逐级控制的思路和方法,提高了东海海域深层“甜点”储层预测的合理性和可靠性,为科学高效开发低渗气藏奠定了基础,也为类似地区低渗储层“甜点”预测提供了借鉴。

参 考 文 献

- [1] 高伟中,孙鹏,赵洪,等.西湖凹陷花港组深部储层特征及控制因素[J].成都理工大学学报(自然科学版),2016,43(4):396-404
GAO W Z,SUN P,ZHAO H,et al.Study of deep reservoirs characters and main control factors of Huagang Formation in Xihu sag,East China Sea[J].Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition),2016,43(4):396-404
- [2] 王岭,王修平,余学兵.西湖凹陷深层储层特征及控制因素研究[J].海洋石油,2015,35(3):20-26
WANG L,WANG X P,YU X B.Study about reservoir characteristics and the Controlling factors on the deep tight gas reservoir in Xihu Sag[J].Offshore Oil,2015,35(3):20-26
- [3] 李建忠,郭彬程,郑民,等.中国致密砂岩气主要类型、地质特征与资源潜力[J].天然气地球科学,2012,23(4):607-614
LI J Z,GUO B C,ZHENG M,et al.Maintypes,geological features and resource potential of tight sandstone gas in China[J].Nature Gas Geoscience,2012,23(4):607-614
- [4] 刘吉余,马志欣,孙淑艳,等.致密含气砂岩研究现状及

- 发展展望[J].天然气地球科学,2008,19(3):316-319
- LIU J Y, MA Z X, SUNS Y. Present research situation and prospects of tight gas sands[J]. Nature Gas Geoscience, 2008, 19(3): 316-319
- [5] 张静, 张虎权, 李延丽, 等. 蜀南地区须家河组致密砂岩含气性综合预测[J]. 天然气工业, 2009, 29(1): 45-48
- ZHANG J, ZHANG H Q, LI Y L, et al. Gas-bearing prediction on tight sandstone gas reservoirs of Xujiahe Formation in south Sichuan basin[J]. Natural Gas Industry, 2009, 29(1): 45-48
- [6] 董宁, 刘振峰, 周小鹰. 鄂尔多斯盆地致密碎屑岩储层地震识别及预测[J]. 石油与天然气地质, 2008, 29(5): 668-675
- DONG N, LIU Z F, ZHOU X Y. Seismic detection and prediction of tight gas reservoirs in the Ordos basin[J]. Oil and Gas Geology, 2008, 29(5): 668-675
- [7] 王军, 周东红, 张中巧, 等. 叠前弹性波阻抗反演技术在流体检测中的应用——以渤海海域 QHD29-2 区块为例[J]. 石油物探, 2011, 50(5): 475-481
- WANG J, ZHOU D H, ZHANG Z Q, et al. Application of prrstack elastic wave impedance inversion technique in the fluid detection of QHD29-2 area in Bohai Sea[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2011, 50(5): 475-480
- [8] 姜勇, 张雷, 邹玮, 等. 西湖凹陷 B 构造水下分流河道预测技术及应用[J]. 海洋石油, 2015, 35(2): 35-39
- JIANG Y, ZHANG L, ZOU W, et al. Technology for prediction of underwater distributary channel reservoir and application in B structure, Xihu sag[J]. Offshore Oil, 2015, 35(2): 35-39
- [9] 秦德文, 侯志强, 姜勇, 等. 泊松阻尼因子在预测高孔隙度砂岩中的应用[J]. 工程地球物理学报, 2015, 12(2): 190-193
- QIN D W, HOU Z Q, JIANG Y, et al. The application of Poisson dampening factor to inspection of high porosity sandstone[J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 2015, 12(2): 190-193
- [10] 刘卫华, 高建虎, 陈启艳, 等. 苏里格气田某工区储层预测可行性研究[J]. 岩性油气藏, 2009, 21(2): 94-98
- LIU W H, GAO J H, CHENG Q Y, et al. Feasibility analysis of reservoir prediction in Sulige Gasfield[J]. Lithologic Reservoirs, 2009, 21(2): 94-98
- [11] 刘晓鹏, 欧阳诚, 彭宇, 等. 岩石物理参数分析在苏 59 区块的应用[J]. 岩性油气藏, 2012, 24(4): 80-84
- LIU X P, OU Y C, PENG Y, et al. Application of rock physical parameters in block Su59[J]. Lithologic Reservoirs, 2012, 24(4): 80-84
- [12] 高伟义, 林桂康, 李城堡, 等. 泊松阻尼因子在平湖地区储层流体检测中的应用[J]. 中国石油勘探, 2013, 18(2): 50-53
- GAO W Y, LIN G K, LI C B, et al. Application of Poisson dampening factor for inspection of reservoir fluid in Pinghuarea[J]. Exploration Techniques, 2013, 18(2): 50-53
- [13] 秦德文, 姜勇, 侯志强, 等. 叠前同步反演技术在西湖凹陷低孔渗储层“甜点”预测中的应用[J]. 油气藏评价与开发, 2015, 5(6): 12-15
- QIN D W, JIANG Y, HOU Z Q, et al. Application of prestack synchronous inversion technology in “sweet spot” prediction of low porosity and permeability reservoir in Xihu sag[J]. Reservoir Evaluation and Development, 2015, 5(6): 12-15
- [14] 张水山, 刘勇江, 刘贤红. 建南地区须六段致密砂岩优质储层预测技术[J]. 岩性油气藏, 2015, 27(3): 98-102
- ZHANG S S, LIU Y J, LIU Y H. Prediction technique of high-quality reservoir in tight reservoir of the sixth member of Xujiahe Formation in Jiannan area[J]. Lithologic Reservoirs, 2015, 27(3): 98-102
- [15] 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): 432-438
- LIU L H, LI J H, LIU Y X. Seismic reservoir property facies analysis and sweet spot prediction[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2013, 52(4): 432-437
- [16] 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]. 沉积学报, 2018, 36(1): 188-197
- CAO B, QIN D W, CHEN J F. The Key Technique Research and Application of “Sweet Spots” Prediction in the Xihu Depression of Low Permeability and Porosity Reservoir: A case study from the Huangyan-A Gas Field[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2018, 36(1): 188-197
- [17] 郭旭升, 凡睿. AVO 技术在普光气田鲃滩储层预测中的应用[J]. 石油与天然气地质, 2007, 28(2): 198-202
- GUO X S, FAN R. Application of AVO techniques to reservoirs prediction of oolitic beach facies in Puguang gas field[J]. Oil and Gas Geology, 2007, 28(2): 198-202
- [18] 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
- [19] 张益明, 牛聪, 韩利, 等. 频散 AVO 分析技术及其在南海深水区的应用[J]. 中国海上油气, 2016, 28(6): 21-27
- ZHANG Y M, NIU C, HAN L, et al. A method of frequency dispersion AVO analysis and its application in deep water area of South China Sea[J]. China Offshore Oil and Gas, 2016, 28(6): 21-27

(编辑: 顾石庆)