

引用格式:管倩倩,蒋龙,程紫燕,等.东营凹陷页岩油岩相要素测井评价新方法及其应用[J].油气藏评价与开发,2024,14(3):435-445.
GUAN Qianqian, JIANG Long, CHENG Ziyang, et al. A new method of shale oil facies element logging evaluation and its application in Dongying Sag[J]. Petroleum Reservoir Evaluation and Development, 2024, 14(3): 435-445.
DOI: 10.13809/j.cnki.cn32-1825/te.2024.03.013

东营凹陷页岩油岩相要素测井评价新方法及其应用

管倩倩¹,蒋龙¹,程紫燕¹,张典栋¹,王云鹤¹,张帆²

(1.中国石化胜利油田分公司勘探开发研究院,山东东营 257000;
2.中海油能源发展股份有限公司工程技术分公司井下技术公司,天津 300452)

摘要:济阳拗陷东营凹陷页岩油岩相具有岩性复杂、非均质性强的特点,区域分布差异显著,目前尚无较好的测井方法能够识别和评价东营凹陷页岩油岩相特征。针对东营凹陷沙四纯上亚段页岩油岩相特点,从岩心刻度测井出发,结合岩心、薄片和实验分析化验等资料,按照“三端元四要素”的页岩岩相分类方案,明晰不同岩相测井响应特征并优选敏感参数测井曲线,建立了适用的页岩油测井岩相划分方法。结果表明:通过“分层+聚类AHC(合成聚类)”法、Fisher判别法、小波提频法、遗传优化神经网络等数学和地球物理方法结合,识别页岩油不同岩相的岩石组分、沉积构造、岩石结构和有机质含量,解决了因岩性复杂、测井分辨率不够、特殊测井资料不全和有机碳含量(TOC)模型精度不够等因素导致的岩相识别不出的问题,通过岩相四特征的识别,形成了东营凹陷页岩油岩相的测井定量识别方法技术,确定岩相集中段,为页岩油大规模的勘探开发提供了重要的地质依据。

关键词:东营凹陷沙四纯上亚段;页岩油岩相;岩石结构;层理构造;有机碳含量;测井评价方法

中图分类号:TE122

文献标识码:A

A new method of shale oil facies element logging evaluation and its application in Dongying Sag

GUAN Qianqian¹, JIANG Long¹, CHENG Ziyang¹, ZHANG Diandong¹, WANG Yunhe¹, ZHANG Fan²

(1. Research Institute of Exploration and Development, Sinopec Shengli Oil Field, Dongying, Shandong 257000, China;
2. Downhole Technology Company, CNOOC EnerTech-Drilling & Production Co., Ltd., Tianjin 300452, China)

Abstract: The lithofacies of shale oil within the Dongying Sag of the Jiyang Depression are distinguished by their complex lithology, strong heterogeneity, and marked regional distribution variances. Current logging methods inadequately identify and evaluate the lithofacial characteristics of shale oil in this region. This study delves into the lithofacies characteristics of the upper submember of Chunhuazhen Formation of the fourth member of the Shahejie Formation in Dongying Sag, employing core calibration logging integrated with core, thin section, experimental analysis, and testing data. Utilizing the “three terminal elements and four elements” shale lithofacies partitioning scheme as a guiding principle, this research selects responsive characteristics of different lithofacies logging and sensitive parameter logging curves to develop an appropriate shale oil logging lithofacies partitioning method. The approach combines stratification, clustering through Agglomerative Hierarchical Clustering(AHC), Fisher discriminant analysis, wavelet frequency extraction, and genetic optimization neural networks to discern the rock composition, sedimentary structure, rock texture, and organic matter content of different lithofacies. This methodology addresses the challenges posed by complex lithology, limited logging resolution, incomplete special logging data, and inadequate Total Organic Carbon (TOC) model accuracy. By identifying the “four characteristics” of lithofacies, the study establishes a quantitative logging identification method and technology for shale oil lithofacies in Dongying Sag, pinpointing concentrated lithofacies segments. The findings provide a critical geological basis for the large-scale exploration and development of shale oil in the region.

Keywords: the upper submember of Chunhuazhen Formation of the fourth member in Dongying Sag; shale oil lithofacies; rock structure; bedding structure; organic carbon content; logging evaluation method

收稿日期:2023-01-09。

第一作者简介:管倩倩(1994—),女,硕士,工程师,从事页岩油测井数据处理与解释方面的研究工作。地址:山东省东营市东营区聊城路胜利油田勘探开发研究院,邮政编码:257000。E-mail:1594759813@qq.com

基金项目:中国石化科技项目“东营凹陷页岩油地质综合评价及甜点预测技术”(P21060-1)。

近年来,随着经济迅速发展和油气需求逐年大幅攀升,页岩油已成为中国最值得期待的接替资源之一,是勘探开发的新重点^[1]。济阳拗陷古近系烃源岩厚度大、分布广、生烃母质好、埋深适中、生烃效率高,为济阳拗陷页岩油规模化勘探奠定了资源基础^[2]。但与国内外页岩油特征对比,还存在着明显差异^[3]。前人对页岩油岩相类型、储层特征、沉积环境做了大量研究^[4],但对页岩油岩相要素预测特别是岩心在时空分布相对有限条件下的研究较少,因此,需要建立能够反映页岩油岩相特征的测井评价方法,为页岩油精细勘探开发提供地质基础。

研究区页岩油储层中相同岩相所反应的测井响应特征不同,常规测井曲线交会图并不适用,由于岩心样本数据不足,以往研究中依靠线性拟合或人工智能所建的岩性模型或识别的岩性并不具有代表性和适用性^[5]。页岩岩相的层理结构,其研究方法多通过FMI(地层微电阻率扫描成像)识别,但测井价格高昂且不利于推广^[6]。针对岩石结构,由于测井分辨率精度不高导致目前暂无识别方法,以往的有机碳含量(TOC)计算中,可通过建立不同测井曲线与有机碳含量之间的关系或者用常规的 $\Delta\log R$ 法计算,但研究区受复杂岩相影响,导致应用效果不好^[7]。研究区岩相测井预测及有利岩相评价技术缺乏,且不同页岩油岩相的开发潜力存在差异,因此,寻找有利的页岩油岩相段是在页岩系统中找到主要勘探开发目的层的关键,对其开展分析研究显得尤为重要^[8]。

针对济阳拗陷东营凹陷页岩油岩相的特点,从岩心刻度测井出发,结合岩心、薄片、实验分析化验以及测录井数据等资料,提出以“三端元四要素”为基础的页岩岩相测井划分方案,通过“分层+聚类AHC”法识别页岩油岩相的岩性;Fisher判别法区分岩石结构;小波提频法划分层理构造;机器学习遗传优化神经网络法预测有机碳含量,解决了因岩性复杂、测井分辨率不够、特殊测井资料不全和有机碳含量模型精度不够等因素导致的岩相识别不出的问题。开展页岩油岩相的测井定量判识研究,明确了不同岩相的测井响应差异,建立了适用于东营凹陷的页岩油测井岩相划分方法,确定了有利岩相集中段,为页岩油规模勘探开发提供了地质依据。

1 沙四纯上亚段页岩油岩相划分及其分布

东营凹陷沙河街组沙四上亚段页岩油岩相主要位于牛庄洼陷,发育厚层湖相泥页岩,沉积厚度可达千米。在横向上,页岩油岩相类型多、环带分布、相变快及展布复杂;纵向上,不同岩相交互出现,不同层段岩相组合特征差异大、非均质性强^[9]。

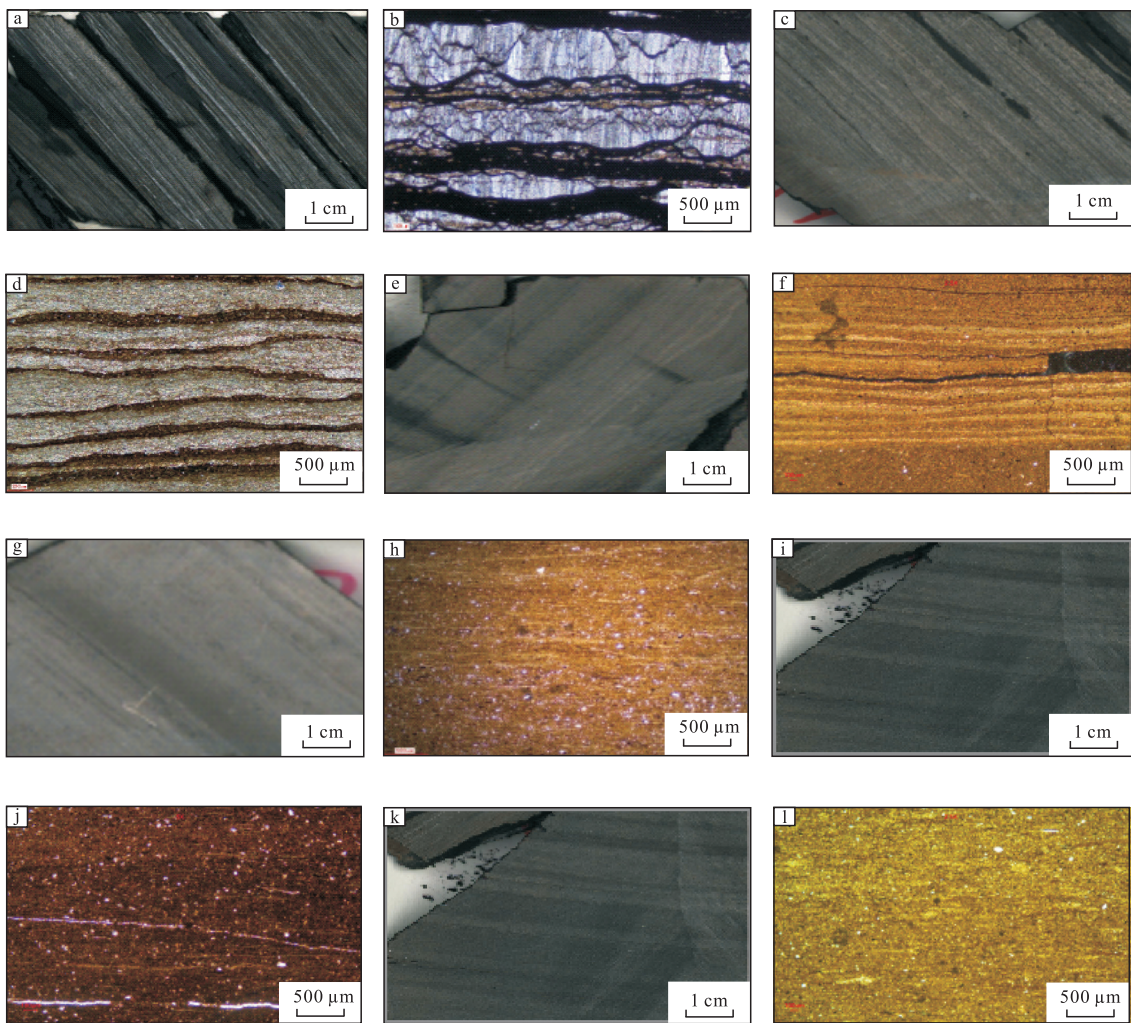
前人多以岩石矿物含量结合有机碳含量进行页岩的综合命名,却忽略了页岩的沉积构造和岩石结构的影响^[10]。沉积构造是沉积环境的表征形式,对页岩储层的物性和可压性起着关键作用;岩石结构决定了孔缝结构、孔隙度及渗透率的大小,东营凹陷沙四纯上亚段页岩层段广泛发育和充填纤维状方解石脉体,而研究方解石脉体的发育情况可以有效表征页岩的沉积特征和成岩特征^[11]。为此,提出陆相页岩“三端元四要素”即页岩岩石组分、沉积构造、岩石结构、有机质含量四要素对页岩岩相进行划分。

东营凹陷沙四纯上亚段页岩油勘探开发研究表明:页岩的岩石组分可分为泥质、砂质以及灰质, $50\% < V_{\text{灰岩}} \leq 75\%$ 、 $V_{\text{泥岩}} \geq 50\%$ 为灰质泥页岩; $50\% < V_{\text{泥岩}} \leq 75\%$ 、 $V_{\text{灰岩}} \geq 50\%$ 为泥质灰页岩; $10\% < V_{\text{灰岩}} \leq 25\%$ 为含灰泥页岩; $10\% < V_{\text{泥岩}} \leq 25\%$ 为含泥灰页岩; $V_{\text{灰岩}} > 75\%$ 为灰岩, $V_{\text{泥岩}} > 75\%$ 为泥岩^[12]。沉积构造分为纹层状、层状、块状;岩石结构分为粗晶、泥晶、隐晶。将 $\omega(\text{TOC}) \geq 2\%$ 定为富含有机质页岩; $1\% < \omega(\text{TOC}) < 2\%$ 为含有机质页岩; $\omega(\text{TOC}) \leq 1\%$ 为贫有机质页岩^[13]。依据“三端元四要素”的岩相划分方案,对具备形成经济开采价值的页岩油岩相进行分类,通过东营凹陷牛庄洼陷5口取心井,对582块岩心进行观察、分析测试,将页岩油岩相细分为16种岩相。

富含有机质纹层状亮晶泥质灰岩(图1a、图1b)、富含有机质纹层状亮晶灰质泥岩、富含有机质纹层状亮晶含灰泥岩、富含有机质纹层状亮晶含泥灰岩:从岩心上观察是富含有机质泥质纹层与灰质纹层互层,镜下观察孔隙类型以碳酸盐矿物粒间孔、溶蚀孔隙,黏土矿物粒间孔、黄铁矿晶间孔等为主,荧光显示含油性好。富含有机质纹层状隐晶泥质灰岩(图1c、图1d)、富含有机质纹层状隐晶含泥灰岩:同样在岩心上观察隐晶方解石纹层与泥质纹层为互层,纹层状层理构造,发育未充填层理缝和半充填高角度构造缝,镜下孔

隙类型以粒间孔、晶间孔为主,孔径介于 $10\text{ nm}\sim 5\text{ }\mu\text{m}$,荧光显示含油性好。富有机质纹层状隐晶灰质泥岩(图1e、图1f)、富有机质纹层状隐晶含灰泥岩:泥质与隐晶方解石互层,黑色有机质与泥质混染条带状分布,见高角度裂缝发育,被沥青质或方解石充填,方解石呈隐晶结构,层理结构为纹层发育,隐晶灰岩与泥岩互层,泥质纹层居多。富有机质层状隐晶泥质灰岩(图1g、图1h):泥质与隐晶方解石较均匀相混,总体呈层状,整段岩心颜色较深,含油性较好富

有机质,隐晶灰质纹层中亚微米—微米级晶间孔、溶蚀孔发育。富有机质层状隐晶灰质泥岩(图1i、图1j):泥质与隐晶方解石较均匀相混,总体呈层状。富有机质层状隐晶泥岩:为隐晶方解石与泥质呈层状结构,微米级黏土矿物片间孔(主要孔缝类型)。含有机质层状隐晶泥质灰岩(图1k、图1l)、含有机质层状隐晶灰质泥岩、含有机质层状隐晶含灰泥岩、含有机质层状隐晶含泥灰岩:岩心颜色较浅、含油性较差、呈层状结构、镜下孔洞不发育。



注:a.富有机质纹层状亮晶泥质灰岩(岩心尺度),N55-X1井,井深3 422 m;b.富有机质纹层状亮晶泥质灰岩(镜下尺度),N55-X1井,井深3 422 m;c.富有机质纹层状隐晶泥质灰岩(岩心尺度),N55-X1井,井深3 441 m;d.富有机质纹层状隐晶泥质灰岩(镜下尺度),N55-X1井,井深3 441 m;e.富有机质纹层状隐晶灰质泥岩(岩心尺度),N55-X1井,井深3 508 m;f.富有机质纹层状隐晶灰质泥岩(镜下尺度),N55-X1井,井深3 508 m;g.富有机质层状隐晶泥质灰岩(岩心尺度),N55-X1井,井深3 564 m;h.富有机质层状隐晶泥质灰岩(镜下尺度),N55-X1井,井深3 564 m;i.富有机质层状隐晶灰质泥岩(岩心尺度),N55-X1井,井深3 491 m;j.富有机质层状隐晶灰质泥岩(镜下尺度),N55-X1井,井深3 491 m;k.含有机质层状隐晶泥质灰岩(岩心尺度),N55-X1井,井深3 634 m;l.含有机质层状隐晶泥质灰岩(镜下尺度),N55-X1井,井深3 634 m。

图1 东营凹陷沙四纯上亚段页岩油岩相主要类型及特征

Fig. 1 Main types and characteristics of shale oil lithofacies in the upper member of Chunhuazhen Formation of the fourth member of Shahejie Formation in Dongying Sag

2 页岩油岩相测井识别方法

东营凹陷页岩油岩相由于不同的沉积环境,导致岩相差异较大,沙三纯下亚段沉积时期处于半咸水环境,岩相大多为富含有机质的暗色泥页岩,沙四纯上亚段为半咸水—咸水、半深水—深水、半湿润—湿润的沉积环境,岩性变化快,非均质性强,导致多种页岩岩相常规测井方法难以识别。

以科学性和实用性为原则,采用宏观构造和岩石类型相结合的方法进行泥页岩岩相划分,将有机质组分含量引入泥页岩的分类命名中,采用了“三端元四要素”的划分原则。运用数学和地球物理方法从岩性、岩石结构、层理构造和有机碳含量4个方面层层递进,对页岩油岩相进行了精细测井识别。

2.1 “分层+聚类AHC”法岩性测井建模

岩石的矿物组成即岩性,是页岩油岩相评价的主要内容之一。常用的岩性识别方法仅停留在对岩性测井响应特征分析上,或者利用单一方法如岩性交汇图、人工智能自动判别等^[14],不适用于东营凹陷页岩油岩性的判别,研究区岩性受沉积环境影响,纵向上差异分布,常规测井响应反应不明显,单一的测井矿物模型无法准确评价整个沙四纯上亚段页岩油储层段,存在很大的不确定性。

在明确页岩岩相的沉积环境和演化规律基础上提出“分层+聚类AHC”法,依据测井响应特征,优选敏感曲线,利用全岩衍射资料和多元回归法对沙四纯上亚段1—4段分层,并对岩石矿物进行建模,得到页岩油储层井段的灰岩矿物含量、砂岩含量及黏土含量的预测曲线。通过分层建模,提高矿物含量的预测精确度,解决了因沉积环境变化导致的相同岩相测井响应特征不一致的情况。

以东营凹陷牛庄洼陷N55-X1井沙四纯上亚段为例,拟合矿物含量线性关系,公式为:

$$A_{\text{碳酸盐岩}} = -0.871B_{\text{GR}} + 52.986C_{\text{DEN}} - 0.616D_{\text{CNL}} \quad (1)$$

$$A_{\text{砂岩含量}} = 0.414B_{\text{GR}} - 0.256E_{\text{AC}} - 0.911C_{\text{DEN}} + 0.809D_{\text{CNL}} \quad (2)$$

$$A_{\text{黏土含量}} = 0.713B_{\text{GR}} + 0.102D_{\text{CNL}} - 13.701C_{\text{DEN}} \quad (3)$$

式(1)—式(3)中: $A_{\text{碳酸盐岩}}$ 为碳酸盐岩含量,%; $A_{\text{砂岩含量}}$ 为砂岩含量,%; $A_{\text{黏土含量}}$ 为黏土含量,%; B_{GR} 为自然伽马,单位API; E_{AC} 为声波时差,单位 $\mu\text{s}/\text{ft}$, $1\text{ft}=0.348\text{m}$; C_{DEN} 为密度,单位 g/cm^3 ; D_{CNL} 为中子。

分层矿物建模仅单纯地计算页岩油岩相的矿物含量,由于岩心样本数量的缺少,区域代表性不够,导致未取心部分精度不高,推广性不好。

因此,在分层建模的基础上利用聚类AHC方法对已经识别的岩性进一步优化识别。

聚类AHC属于层次聚类法,需要提前确定聚类的种类数量。通过对岩性敏感测井曲线进行分析,能识别的岩性为6个,但由于岩性复杂,相同岩相所对应的测井响应特征不同,所以要考虑到聚类出的种类有一定的错误率,在此认为1种岩相有1~2种测井响应特征,6种岩性中排除灰岩和泥岩,这2种测井响应特征非常明显,最终确定最优模型的数量为10个^[15-16]。由于聚类AHC算法尚无法确定每种岩相类别的地质意义,故有必要利用岩心刻度法建立起由聚类AHC算法判别出的矿物含量、岩性和响应特征之间的关系。

运用聚类AHC算法共聚类出10种岩性(表1、图2),但是具有地质意义的只有6种,为了保证岩性识别的准确性,需要将测井曲线响应特征和分层建模求得的矿物含量双重结合,对聚类出来的岩性进行合并和地质识别。如含灰泥岩相对灰质泥岩,GR(自然伽马)、AC(声波时差)相对偏高,其值在85 API左右, R_t (地层真电阻率)相对偏低,约 $3.3\ \Omega\cdot\text{m}$,黏土含量相对偏高;同理,含泥灰岩相对泥质灰岩,GR、AC相对偏低,其值在70 API左右, R_t 相对偏高,在 $6.5\ \Omega\cdot\text{m}$ 左右,碳酸盐岩含量相对偏高。通过合并同类测井响应特征,最终形成6种岩性,其结果与取心资料符合率达92%以上。

在有地质依据的情况下,综合考虑各个层段的岩性差异特征,突出各层段的测井响应特征,再利用聚类方法对岩性进行优选。

2.2 岩石结构测井建模

东营凹陷沙河街组页岩油岩相中的方解石脉体主要发育在富有机质纹层状亮晶灰质泥岩中。研究区的页岩油储层段沙四纯上亚段中下部沉积水体较深,处于还原环境且有一定的埋藏深度,方解石脉体集中发育^[17]。

亮晶方解石与隐晶方解石相比,前者抗压能力更强、储集空间更优越,更易形成微裂缝^[18]。据核磁共振方法试验结果显示不同岩相的岩石结构的有效孔隙度特征不同:亮晶方解石纹层泥页岩孔隙度

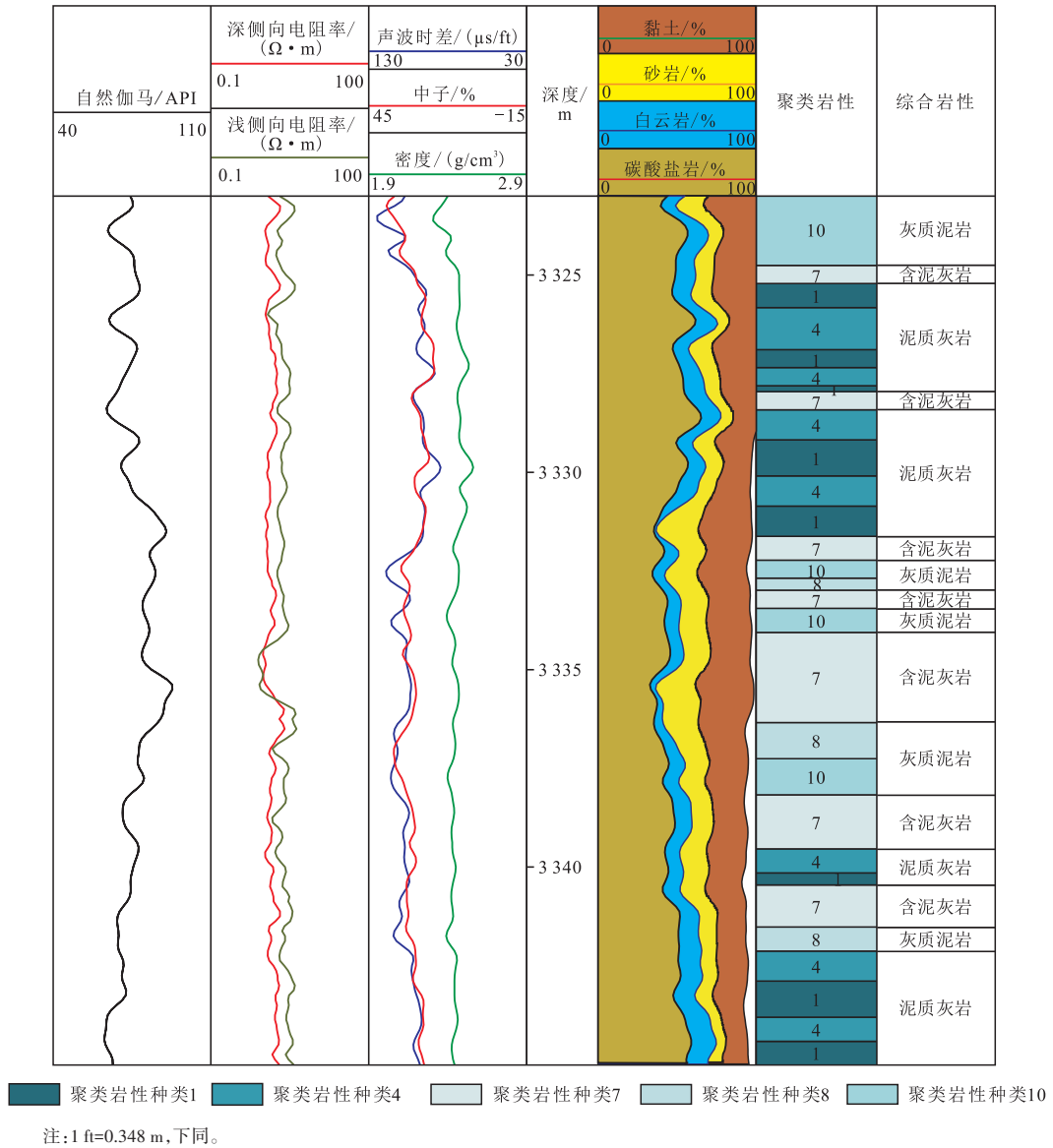


图2 “分层+聚类AHC”法划分岩性

Fig. 2 Stratified + Cluster AHC Method for lithology classification

表1 东营凹陷泥页岩10种岩性的测井响应特征与矿物含量数据统计

Table 1 Logging response characteristics and mineral content data of ten lithology of shale in Dongying Sag

岩性分类/种	数量/个	自然伽马/API	地层真电阻率/($\Omega \cdot m$)	声波时差/($\mu s/ft$)	黏土含量/%	灰岩含量/%	砂岩含量/%	岩性
5	146	83.8	3.63	96.3	57	23	20	含灰泥岩
6	606	82.3	3.11	101.1	63	21	16	含灰泥岩
2	354	70.0	5.21	127.1	18	53	29	含泥灰岩
7	540	72.2	6.87	97.1	23	56	21	含泥灰岩
3	91	62.9	1.31	81.0	14	78	8	灰岩
8	80	78.6	4.65	98.2	59	29	12	灰质泥岩
10	176	79.1	4.57	93.7	57	26	17	灰质泥岩
9	300	90.5	2.56	105.1	82	10	8	泥岩
4	207	78.7	1.20	91.6	26	58	16	泥质灰岩
1	534	75.9	2.07	97.6	28	51	21	泥质灰岩

介于6%~15%;隐晶方解石纹层泥页岩孔隙度介于4%~8%;隐晶方解石层状泥页岩孔隙度介于2%~4%(图3)。这种岩性结构和物性的差异,更需要对页岩油岩相进行岩石结构测井建模。

目前,针对页岩油岩相岩石结构的判别还没有较为成熟的测井识别方法。页岩油岩相的纹层状方解石单层厚度多在1 mm以下,测井分辨率不足(测井的分辨率大于0.125 m),且常规的测井方法难以识别。因此,采用Fisher判别法对岩石结构(亮晶和隐晶岩石结构)进行测井识别,再结合测录井对判别结果进行效果分析,Fisher判别法适用于确定性的分类,应用范围较广,效果较好^[19]。

Fisher判别法是在进行降维的基础上,找到一个最合适的投影轴,使亮晶和隐晶方解石的样本在该轴上投影之间的距离尽可能远,而相同样本之间的投影尽可能紧凑,从而使亮晶与隐晶方解石分类效果达到最佳^[20]。

首先,优选无铀伽马(KTH),AC和DEN为敏感参数。伽马中的铀(U)元素不能进入方解石晶体格架,在其形成时U与不溶物一起富集于缝合线中,导致在亮晶灰岩地层中U元素成无规律富集;AC因为地层富含有机质或油气而增大,而方解石脉体一般都是富含有机质,AC会增大;DEN对矿物成分之间的差异灵敏,会随着碳酸盐岩含量的增多而增大,这是

按识别岩石结构的响应特征来选取,其余曲线测井响应特征极不明显。进而确定亮晶和隐晶纹层泥页岩岩相的样本矩阵,计算2类岩石结构的测井曲线平均值、离差矩阵和总协方差矩阵,求逆矩阵,确定亮晶与隐晶纹层的判别函数,公式如下:

$$F_{\text{亮晶}} = -6.789B_{\text{GR}} + 12.069E_{\text{AC}} + 0.342C_{\text{DEN}} - 491.246 \quad (4)$$

$$F_{\text{隐晶}} = -7.112B_{\text{GR}} + 11.877E_{\text{AC}} - 0.411C_{\text{DEN}} - 471.799 \quad (5)$$

式(4)一式(5)中: $F_{\text{亮晶}}$ 为亮晶判别公式; $F_{\text{隐晶}}$ 为隐晶判别公式。

如图4所示:当 $F_{\text{亮晶}} > F_{\text{隐晶}}$ 为亮晶纹层; $F_{\text{亮晶}} < F_{\text{隐晶}}$ 为隐晶纹层。将Fisher判别法分类的结果与岩心一镜下观察的亮晶、隐晶相对比,正确率可达到90.8%。

2.3 页岩油岩相纹层结构测井建模

灰质纹层与泥质纹层互层是东营凹陷沙河街组油页岩最具特色的岩石结构特征,有利的灰泥层耦合结构形成了良好的源储配置关系。从形成机理上来说,纹层状的页岩岩相是由季节性悬浮(机械作用)和化学作用交替沉积而成,多为静水环境。层状的页岩岩相为机械沉积和化学沉积并举,水体较为动荡,基本不显纹层^[21]。东营凹陷沙四纯上亚段中段的页岩油储层中纹层较为发育,主要为黏土和碳酸盐岩矿物交替出现,由于黏土与碳酸盐岩矿物导

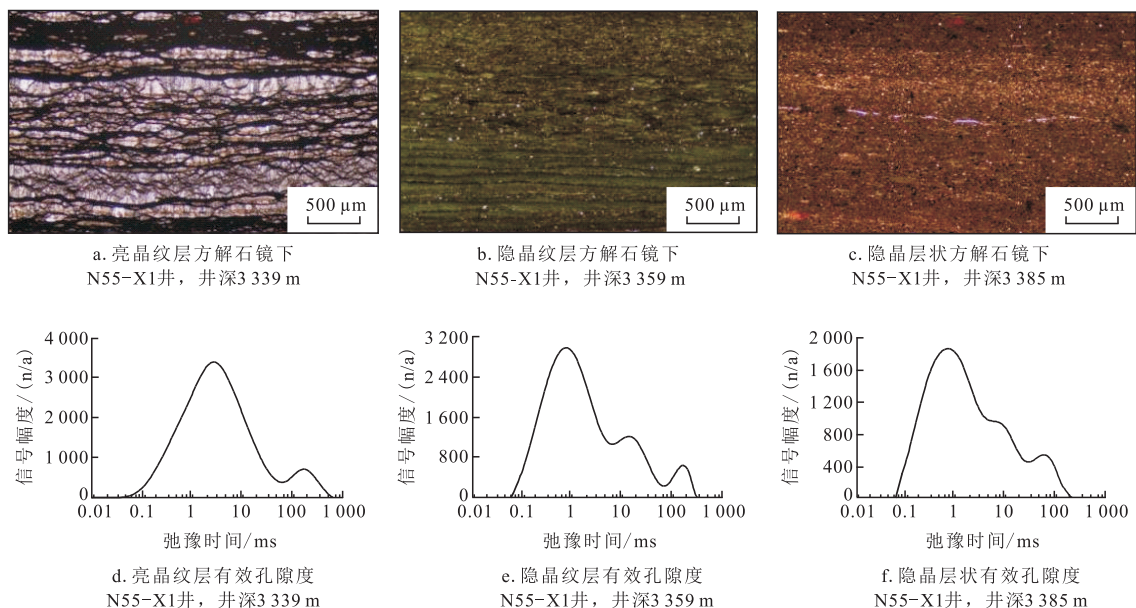


图3 东营凹陷页岩油井不同岩相的岩石结构特征

Fig. 3 Rock structure characteristics of different lithofacies of shale oil wells in Dongying Sag

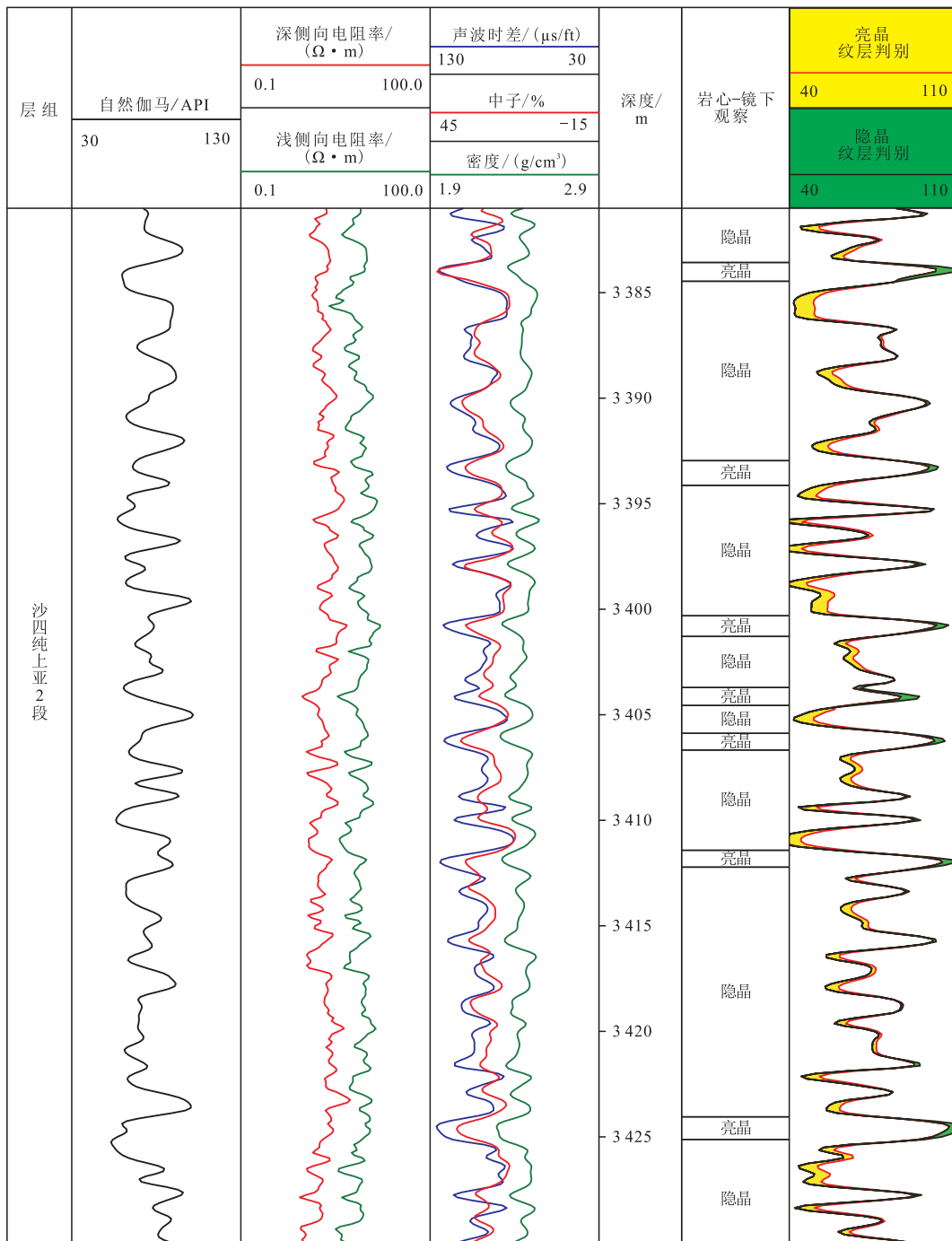


图4 东营凹陷页岩油岩相岩石结构Fisher判别法测井建模

Fig. 4 Fisher discriminant analysis for well logging modeling of shale oil lithofacies rock structures in Dongying Sag

电性的差异,在FMI动态图像上会呈现出明显的亮暗相间的特征,亮色为碳酸盐岩,暗色为黏土。以东营凹陷NY1井为例:井深介于3 326.3~3 326.7 m,电成像显示暗色条带,偏层状泥质;井深介于3 404.2~3 404.8 m,电成像显示亮色条带夹暗色条带,碳酸盐岩含量多,岩相为灰质泥岩相(图5)。

传统的识别页岩油储层纹层结构的方法有纵波速度比以及利用FMI动态图像,但是这2种方法针对研究区的页岩油老井并不适用。很多老井测井曲线不全,没有横波曲线或者FMI动态图像,因此,提出声波锯齿频次识别方法来识别东营凹陷沙河街组页岩油纹层结构,有效解决了老井资料不全的问题。

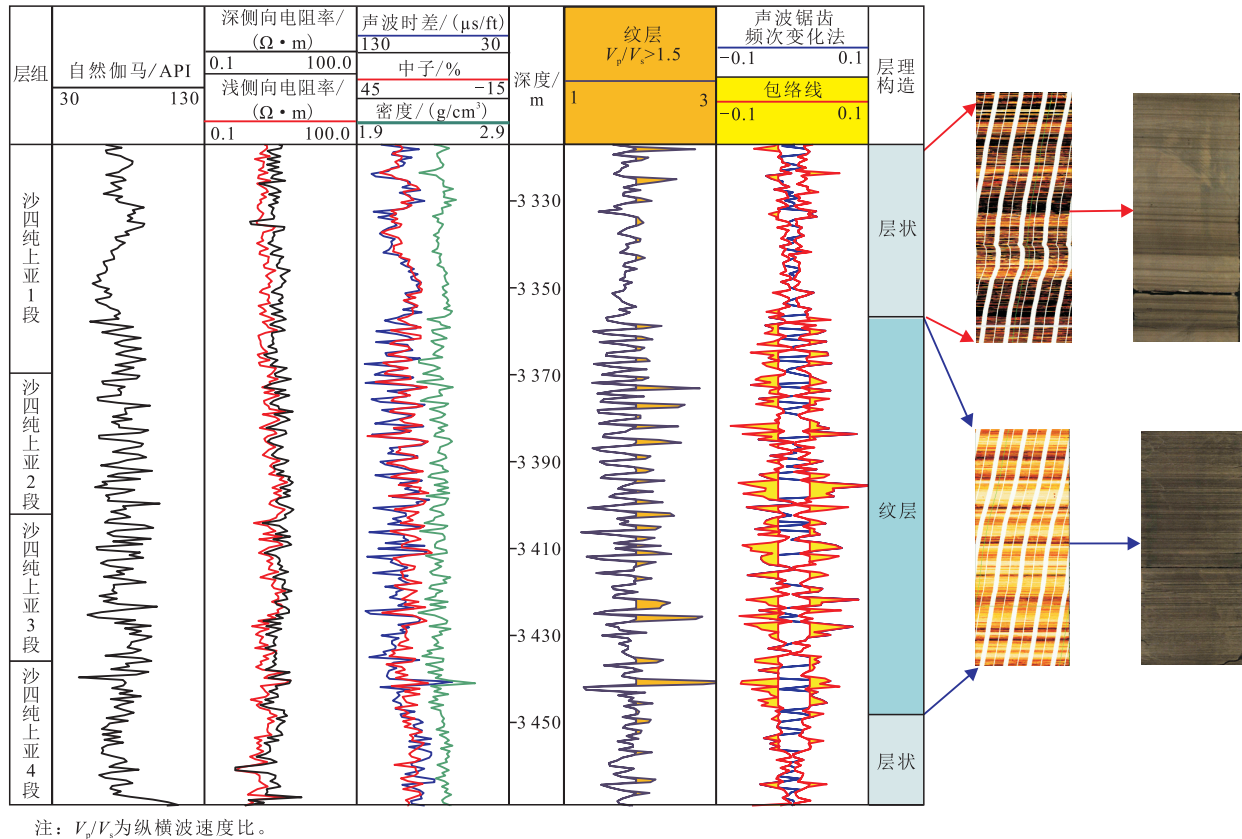


图5 东营凹陷页岩油井沙河街组泥页岩层理构造声波锯齿频次识别方法

Fig. 5 Acoustic sawtooth frequency identification method for shale bedding structure in Shahejie Formation of shale oil wells in Dongying Sag

为落实测井曲线对层理构造的影响,分析声波时差曲线与岩石纹层结构的关系,发现声波测井与纹层结构有良好的关系,同时对低角度裂缝和网状裂缝发育带也有影响。层理构造与裂缝发育都可以为油气提供输送通道,因此纹层和裂缝越发育,声波时差曲线振动的频次越大,反之越小。

将声波时差曲线归一化处理并小波提频,将声波划分成低频到高频4个阶段,选取最高频信号,做声波变化锯齿频次包络线,来反映不同纹层结构。通过与岩心、镜下所观察的岩石纹层结构对比,当声波锯齿频次的包络线介于 $-0.02 \sim 0.02$ 时,认为是纹层状的层理构造;当包络线大于 0.02 或者小于 -0.02 时,认为是层状的层理构造,纹层不发育。

通过纵横波速度比(V_p/V_s)和FMI动态图像以及岩心对比,进一步证明声波锯齿频次识别纹层结构的方法是可靠的,确定NY1井在 $[3\ 313, 3\ 356]$ m及 $[3\ 450, 3\ 468]$ m为层状结构,岩心描述为层状泥质

灰页岩;在 $[3\ 356, 3\ 450]$ m为纹层状结构,岩心描述为纹层状灰质泥页岩。如图5所示:在研究井中,利用纵横波速度比的方法时,纹层指示数值大于 1.5 及声波锯齿频次的包络线值大于 0.05 或者小于 -0.05 时,指示纹层较为发育。通过声波锯齿频次识别方法识别的层理构造、成像方法与岩心照片皆对应,证明验证方法是可靠的。

2.4 页岩油有机碳含量测井建模

一般富有机质烃源岩具有高自然伽马、高声波时差和低密度等测井响应特征。GR值偏高是因为地层中有大量的放射性元素铀(U)、钍(Th)、钾(K),尤其是U元素对有机质有很好的指示作用。有机质密度低,导致烃源岩整体为低密度,有机质会使声速降低且因自身为高电阻率物质,会导致声波时差和电阻率变高^[22]。

研究表明常规计算TOC的方法有: PASSEY等^[23]

提出的 $\Delta\log R$ 方法, $\Delta\log R$ 法受主观因素影响较多;SCHMOKER^[24]利用密度和自然伽马测井资料,回归计算页岩储层中的TOC,但适用性不强。目前,人工智能方法在处理大数据和预测TOC方面表现出优越的性能^[25]。

东营凹陷沙河街组烃源岩的有机碳含量受岩性影响,测井响应特征不明显,导致传统的计算方法如 $\Delta\log R$ 法、多元回归法等不适用。针对研究区老井测井曲线不全,无法找到敏感曲线,多元回归法精度不够的问题,可以采用遗传优化神经(GA-BP)网络法进行页岩有机碳含量的预测来解决适用性及资料不齐等问题。

遗传算法可以优化神经网络的输入数据,克服其原有的BP神经网络算法的缺陷^[26]。遗传算法利用计算机仿真运算,通过选择、交叉、变异等操作,在求解较为复杂的组合优化问题时,寻找最优适应度值对应的个体,其本质上属于随机寻优过程,不存在局部收敛问题。

将优选出的新种群输入BP神经网络模型中,调整网络权值和阈值,通过反向传播算法,使最优种群的适应度达到给定的阈值,当适应度不再上升时,即迭代次数达到预设的代数时,算法终止。

如图6所示:绿色为BP神经网络预测的TOC误差值,红色为遗传算法优化BP神经网络的预测TOC误差值。可以看出,改进的有机碳含量计算模型GA-BP神经网络法的预测效果要比常规的有机碳计算模型的精度高很多,也更为准确。将实测TOC值与GA-BP法预测的TOC值相对比,相关性高达96.2%。利用常规TOC计算方法与人工智能方法做

对比,可明显看出遗传优化神经网络的精度更好,传统的 $\Delta\log R$ 法受岩性的影响很大,容易造成TOC计算值偏大,人工智能方法BP神经网络精度不高,相反GA-BP法在前期利用遗传算法处理预测数据,可以有效提高预测精度和准确性,更适用于研究区块。

3 应用及推广

基于“三端元四要素”的岩相划分方案,对岩相进行岩性、岩石结构、层理构造、有机碳含量4个方面的测井建模,通过数学和地球物理方法结合建模,提升东营凹陷沙河街组页岩油岩相测井识别精度,以沉积规律为背景,基于东营凹陷多口页岩油井的测井岩相解释结果,建立精细岩相地质模型,利用该模型处理解释东营凹陷300余口页岩油井,明确了研究区页岩油储层井段岩相纵向和横向上分布规律。

如图7所示,以测井相研究为基础,对东营凹陷的4口井进行岩相识别,可以看出,沙四纯上亚段1段为富有有机质层状隐晶泥质灰岩和富有有机质层状隐晶灰质泥岩;沙四纯上亚段2段为富有有机质纹层状隐晶泥质灰岩和富有有机质纹层状隐晶灰质泥岩夹富有有机质纹层状亮晶含灰泥岩;沙四纯上亚段3段为富有有机质纹层状亮晶泥质灰岩和富有有机质纹层状隐晶灰质泥岩;沙四纯上亚4段为含有有机质层状隐晶灰质泥岩和含有有机质层状隐晶泥质灰岩夹富有有机质纹层状亮晶泥质灰岩。岩相在纵向上层理构造随着沉积环境从层状变为纹层,有机质含量从富有有机质变为含有有机质,岩相在纵向上变化较快,确定有利岩相集中在沙四纯上亚段2、3段。根据解释结果优化水平井入靶层,经射孔、压裂后投产,峰值日产油量超100 t,目前累计产油量超7 000 t。

4 结论

1) 针对东营凹陷岩油岩相岩性复杂、非均质性强烈以及区域分布差异明显等特点,从岩心刻度测井出发,以“三端元四要素”的页岩岩相划分方案为原则,将页岩油岩相细分为16种岩相类型,并确定了6种主体岩相类型。

2) 通过“分层+聚类AHC”法、Fisher判别法、小波提频法、遗传优化神经网络等数学和地球物理方法结合,识别页岩油岩性、沉积构造、岩石结构和有

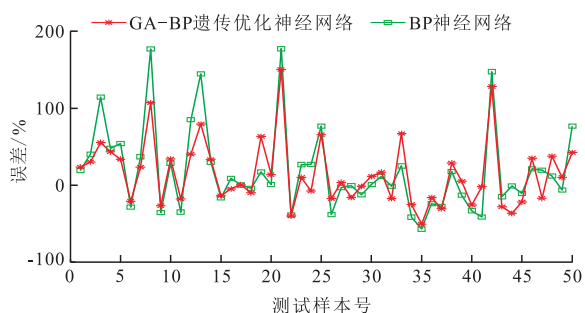


图6 东营凹陷沙河街组泥页岩有机碳含量预测GA-BP遗传优化神经网络与BP神经网络法对比

Fig. 6 Comparison of GA-BP neural network and BP neural network method for prediction of organic carbon content in shale of Dongying Sag

机质含量,解决了因岩性复杂、测井分辨率不够、特殊测井资料不全、有机碳含量模型精度不够等因素导致的岩相识别不出或精度不够的问题,通过岩相四特征的识别,形成了东营凹陷页岩油岩相的测井定量判识方法技术。

3) 依据岩相评价模型,预测洼陷带页岩油岩相在纵向上的变化规律,优选有利岩相集中段,优化水平井入靶层,为明确储层井段岩相纵向和平面分布规律提供依据,指导了多口井的高产开发,验证了岩相测井模型的推广性和实用价值。

参考文献

- [1] 杨涛涛,范国章,吕福亮,等. 烃源岩测井响应特征及识别评价方法[J]. 天然气地球科学, 2013, 24(2): 414-422.
YANG Taotao, FAN Guozhang, LYU Fuliang, et al. The logging features and identification methods of source rock[J]. Natural Gas Geoscience, 2013, 24(2): 414-422.
- [2] 李国永. 复杂断块油藏精细描述关键技术与应用[J]. 油气藏评价与开发, 2023, 13(2): 152-162.
LI Guoyong. Key technology of fine description of complex fault block reservoir and its application[J]. Petroleum Reservoir Evaluation and Development, 2023, 13(2): 152-162.
- [3] 孙焕泉. 济阳拗陷页岩油勘探实践与认识[J]. 中国石油勘探, 2017, 22(4): 1-14.
SUN Huanquan. Exploration practice and prospect of shale oil in Jiyang depression[J]. China Petroleum Exploration, 2017, 22(4): 1-14.
- [4] 曾棒,刘小平,刘国勇,等. 陆相泥页岩层系岩相测井识别与预测:以南堡凹陷拾场次洼为例[J]. 地质科技通报, 2021, 40(1): 69-79.
ZENG Bang, LIU Xiaoping, LIU Guoyong, et al. Logging identification and prediction of lithofacies of lacustrine shale system in Shichang Sub-Sag, Nanpu Depression[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2021, 40(1): 69-79.
- [5] 卢双舫,马延伶,曹瑞成,等. 优质烃源岩评价标准及其应用:以海拉尔盆地乌尔逊凹陷为例[J]. 地球科学, 2012, 37(3): 535-544.
LU Shuangfang, MA Yanling, CAO Ruicheng, et al. Evaluation criteria and application of high-quality source rocks and its applications: Taking the Wuertun Sag in Hailar Basin as an example[J]. Earth Science, 2012, 37(3): 535-544.
- [6] 李昌,沈安江,孟贺. 电成像测井新参数在碳酸盐岩岩相识别中的应用[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(26): 11130-11135.
LI Chang, SHEN Anjiang, MENG He. Application of new parameters of electrical imaging logging in carbonate facies identification[J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(26): 11130-11135.
- [7] 朱振宇,刘洪,李幼铭. $\Delta\log R$ 技术在烃源岩识别中的应用与分析[J]. 地球物理学进展, 2003, 18(4): 647-649.
ZHU Zhenyu, LIU Hong, LI Youming. The analysis and application of $\Delta\log R$ method in the source rock's identification [J]. Advances in Geophysics, 2003, 18(4): 647-649.
- [8] 彭军,杨一茗,刘惠民,等. 陆相湖盆细粒混积岩的沉积特征与成因机理——以东营凹陷南坡陈官庄地区沙河街组四段上亚段为例[J]. 石油学报, 2022, 43(10): 1409-1426.
PENG Jun, YANG Yiming, LIU Huimin, et al. Sedimentary characteristics and genetic mechanism of fine-grained hybrid sedimentary rocks in continental lacustrine basin: A case study of the upper submember of Member 4 of Shahejie Formation in Chenguanzhuang area, southern slope of Dongying Sag[J]. Acta Petrolei Sinica, 2022, 43(10): 1409-1426.
- [9] 彭君,周勇水,李红磊,等. 渤海湾盆地东濮凹陷盐间细粒沉积岩岩相与含油性特征[J]. 断块油气田, 2021, 28(2): 212-218.
PENG Jun, ZHOU Yongshui, LI Honglei, et al. Lithofacies and oil-bearing characteristics of fine-grained sedimentary rocks of salt-layers in Dongpu Sag, Bohai Bay Basin[J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2021, 28(2): 212-218.
- [10] 林中凯,张少龙,李传华,等. 湖相页岩油地层岩相组合类型划分及其油气勘探意义——以博兴洼陷沙河街组为例[J]. 油气藏评价与开发, 2023, 13(1): 39-51.
LIN Zhongkai, ZHANG Shaolong, LI Chuanhua, et al. Types of shale lithofacies assemblage and its significance for shale oil exploration: A case study of Shahejie Formation in Boxing Sag [J]. Petroleum Reservoir Evaluation and Development, 2023, 13(1): 39-51.
- [11] 王永诗,唐东. 咸化断陷湖盆典型页岩剖面地质特征——以东营凹陷为例[J]. 油气藏评价与开发, 2022, 12(1): 181-191.
WANG Yongshi, TANG Dong. Geological characteristics of typical shale profile in a saline lacustrine rift basin: A case study of Dongying Sag[J]. Petroleum Reservoir Evaluation and Development, 2022, 12(1): 181-191.
- [12] ZHAO X Z, PU X G, JIANG W Y, et al. An exploration breakthrough in Paleozoic petroleum system of Huanghua Depression in Dagang Oilfield and its significance, North China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2019, 46(4): 651-663.
- [13] 张顺. 济阳拗陷页岩油富集要素及地质甜点类型划分[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(2): 504-511.
ZHANG Shun. Shale oil enrichment elements and geological dessert types in Jiyang Depression[J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(2): 504-511.
- [14] 张佳佳,李宏兵,姚逢昌,等. 油页岩的地球物理识别和评价方法[J]. 石油学报, 2012, 33(4): 625-632.
ZHANG Jiajia, LI Hongbing, YAO Fengchang, et al. A geophysical method for the identification and evaluation of oil shale[J]. Acta Petrolei Sinica, 2012, 33(4): 625-632.
- [15] 王晓明,陈军斌,任大忠. 陆相页岩油储层孔隙结构表征和渗流规律研究进展及展望[J]. 油气藏评价与开发, 2023, 13(1): 23-30.
WANG Xiaoming, CHEN Junbin, REN Dazhong. Research progress and prospect of pore structure representation and seepage law of continental shale oil reservoir[J]. Petroleum Reservoir Evaluation and Development, 2023, 13(1): 23-30.

(下转第 457 页)

- 中的应用[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2016, 39(5): 701-706.
- LI Fei, LIU Guosheng, ZHOU Qingwei, et al. Application of fractal theory to study the relationship between fracture and mineral resources[J]. Journal of Hefei University of Technology (Natural Science Edition), 2016, 39(5): 701-706.
- [43] JAFARI A, BABADAGLI T. Estimation of equivalent fracture network permeability using fractal and statistical network properties[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2012, 92: 110-123.
- [44] MIAO T J, YU B M, DUAN Y G, et al. A fractal analysis of permeability for fractured rocks[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2015, 81: 75-80.
- [45] ZHU J T, CHENG Y Y. Effective permeability of fractal fracture rocks: Significance of turbulent flow and fractal scaling [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2018, 116: 549-556.
- [46] LAHIRI S. Estimating effective permeability using connectivity and branch length distribution of fracture network[J]. Journal of Structural Geology, 2021, 146: 5-14.
- [47] 谢瑞, 张尚锋, 周林, 等. 川东地区侏罗系自流井组大安寨段致密储层油气成藏特征[J]. 岩性油气藏, 2023, 35(1): 108-119.
- XIE Rui, ZHANG Shangfeng, ZHOU Lin, et al. Hydrocarbon accumulation characteristics of tight reservoirs of Da'anzhai member of Jurassic Ziliujing Formation in eastern Sichuan Basin[J]. Lithologic Reservoirs, 2023, 35(1): 108-119.
- [48] GARTRELL A, ZHANG Y H, LISK M, et al. Fault intersections as critical hydrocarbon leakage zones: Integrated field study and numerical modelling of an example from the Timor Sea, Australia[J]. Marine & Petroleum Geology, 2004, 21(9): 1165-1179.
- [49] 董大忠, 梁峰, 管全中, 等. 四川盆地五峰组—龙马溪组页岩气优质储层发育模式及识别评价技术[J]. 天然气工业, 2022, 42(8): 96-111.
- DONG Dazhong, LIANG Feng, GUAN Quanzhong, et al. Development model and identification evaluation technology of Wufeng-Longmaxi Formation quality shale gas reservoirs in the Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 2022, 42(8): 96-111.
- (编辑 余聪)

(上接第 445 页)

- [16] LIU B, SHI J X, FU X F, et al. Petrological characteristics and shale oil enrichment of lacustrine fine-grained sedimentary system: A case study of organic-rich shale in first member of Cretaceous Qingshankou Formation in Gulong Sag, Songliao Basin, NE China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2018, 45(5): 884-894.
- [17] 唐凡, 朱永刚, 张彦明, 等. CO₂注入对储层多孔介质及赋存流体性质影响实验研究[J]. 石油与天然气化工, 2021, 50(1): 72-76.
- TANG Fan, ZHU Yonggang, ZHANG Yanming, et al. Experimental research of the effect of CO₂ injection on porous media and fluid property in reservoir[J]. Chemical Engineering of Oil & Gas, 2021, 50(1): 72-76.
- [18] 滕建彬. 东营凹陷页岩油储层中方解石的成因及证据[J]. 油气地质与采收率, 2020, 27(2): 18-25.
- TENG Jianbin. Origin and evidence of calcite in shale oil reservoir of Dongying Sag[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2020, 27(2): 18-25.
- [19] 陈恋, 袁梅, 向维, 等. PCA-Fisher判别模型在煤层底板突水预测中的应用[J]. 数学的实践与认识, 2021, 51(6): 103-111.
- CHEN Lian, YUAN Mei, XIANG Wei, et al. Application of PCA-Fisher discriminant model in prediction of water inrush from coal seam floor[J]. Mathematics in Practice and Theory, 2021, 51(6): 103-111.
- [20] 陈红江, 李夕兵, 刘爱华, 等. 用 Fisher 判别法确定矿井突水水源[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2009, 40(4): 1114-1120.
- CHEN Hongjiang, LI Xibing, LIU Aihua, et al. Identifying of mine water inrush source by Fisher discriminant analysis method[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2009, 40(4): 1114-1120.
- [21] 张海桥. 海拉尔盆地红旗凹陷烃源岩评价及有利区预测[J]. 大庆石油地质与开发, 2020, 39(2): 21-27.
- ZHANG Haiqiao. Evaluation of the hydrocarbon source rock and prediction of the favorable zone in Hongqi Sag of Hailar Basin[J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2020, 39(2): 21-27.
- [22] 王健, 石万忠, 舒志国, 等. 富有机质页岩 TOC 含量的地球物理定量预测[J]. 石油地球物理勘探, 2016, 51(3): 596-604.
- WANG Jian, SHI Wanzhong, SHU Zhiguo, et al. TOC content quantitative prediction in organic-rich shale[J]. Petroleum Geophysical Exploration, 2016, 51(3): 596-604.
- [23] PASSEY Q R, CREANEY S, KULLA J B, et al. Practical model for organic richness from porosity and resistivity logs[J]. AAPG Bulletin, 1990, 74(12): 1777-1794.
- [24] SCHMOKER J W. Determination of organic content of Appalachian Devonian shales from formation-density logs[J]. AAPG Bulletin, 1979, 63(9): 1504-1537.
- [25] 陈钢花, 梁莎莎, 王军, 等. 卷积神经网络在岩性识别中的应用[J]. 测井技术, 2019, 43(2): 130-135.
- CHEN Ganghua, LIANG Shasha, WANG Jun, et al. Application of convolutional neural network in lithology identification[J]. Well Logging Technology, 2019, 43(2): 130-135.
- [26] 刘巍, 刘威, 谷建伟, 等. 利用卡尔曼滤波和人工神经网络相结合的油藏井间连通性研究[J]. 油气地质与采收率, 2020, 27(2): 118-124.
- LIU Wei, LIU Wei, GU Jianwei, et al. Research on interwell connectivity of oil reservoirs based on Kalman filter and artificial neural network[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2020, 27(2): 118-124.
- (编辑 郭群)