

泌阳凹陷深凹区核三上段页岩层 脆性矿物预测及分布

黄新, 胡守志, 李水福, 吕倩

(中国地质大学(武汉)构造与油气资源教育部重点实验室, 武汉 430074)

摘要: 利用多测井参数回归法和多矿物模型法, 结合实测矿物含量数据, 对泌阳凹陷深凹区核三上段页岩层矿物进行预测与分析。结果表明, 该页岩层矿物含量变化较大, 主要以石英和黏土矿物为主(其平均含量分别为 24.2% 和 23.4%); 斜长石、方解石、白云石、钾长石、黄铁矿含量依次降低, 黄铁矿平均含量仅为 3.1%; 沸石、石膏等其他矿物只在少数样品中可见。通过实测数据校验, 预测结果相关性好, 其中多矿物模型预测精度更高, 其相关性最高可达 0.8。泌页 HF1 井矿物剖面分布以及核三上段页岩层脆性矿物平面分布显示, 多矿物模型预测的结果能够较好地反映该区矿物分布规律及其变化趋势, 其结果对页岩油甜点预测、储层矿物评价和页岩油开发都具有重要参考价值。

关键词: 脆性矿物; 多矿物模型; 页岩层; 核三上段; 泌阳凹陷; 南襄盆地

中图分类号: TE132.8

文献标识码: A

Forecast and distribution of brittle minerals in shales from the upper section of the third member of Hetaoyuan Formation in the deep sag area of the Biyang Depression

Huang Xin, Hu Shouzhi, Li Shuifu, Lü Qian

(Key Laboratory of Tectonics & Petroleum Resources of the Ministry of Education, China University of Geosciences, Wuhan, Hubei 430074, China)

Abstract: In this paper, we briefly discuss two types of logging prediction methods, namely multi-parameter regression and multi-mineral model. We determined the mineral composition of shales from the upper section of the third member of Hetaoyuan Formation in the deep sag area of the Biyang Depression using these methods and compared this with measured data. The results showed that the major components are quartz and clay minerals, with an average of 24.2% and 23.4%, respectively. The contents of plagioclase, calcite, dolomite, potassium feldspar and pyrite reduce in a descending order. The content of pyrite is about 3.1% on average. Zeolite, gypsum and other minerals are visible only in a few samples. Measured data validation proved that the predictions by logging using these two models are accurate, especially the multi-mineral model, which has an accordance rate of 0.8. The mineral composition section in well BYHF1 and the brittle mineral content in shales from the upper section of the third member of Hetaoyuan Formation showed that the multi-mineral model can predict the distribution rules and trend of minerals better. It is significant for shale oil sweet spot prediction, reservoir mineral evaluation and shale oil development.

Key words: brittle minerals; multi-mineral model; shale; upper section of the third member of Hetaoyuan Formation; Biyang Depression; Nanxiang Basin

页岩油是一种新兴的、重要的非常规油气资源, 它的发展是解决能源供应不足的一个有效途径^[1-7]。页岩层既是页岩油的生油层, 也是储集层, 在页岩油勘探中, 由于页岩孔隙度渗透率极低, 如果

没有自然或人工裂缝, 只能产生较小的非经济油流。得益于水平钻井以及水力压裂技术的进步, 可通过压裂岩层增加渗透性来获得工业油流^[8-13]。水力压裂的有效性受岩石脆性的影响, 而岩石脆性与其矿

收稿日期: 2015-06-30; 修订日期: 2015-12-08。

作者简介: 黄新(1991—), 男, 硕士生, 油气地球化学专业。E-mail: 1292939882@qq.com。

通讯作者: 胡守志(1976—), 女, 副教授, 从事油气地质及油气地球化学研究和教学。E-mail: hushzh@cug.edu.cn。

基金项目: 国家自然科学基金(41572109, 41273052)、教育部科技项目留学回国人员科研启动基金(2014022019)和中国石化河南油田分公司横向合作项目“泌阳凹陷古近系核桃园组页岩油形成条件及分布规律”联合资助。

物成分密切相关,其中,石英、长石和碳酸盐矿物含量高、黏土矿物含量低的页岩脆性好,在压裂状况下更容易产生大规模复合的裂缝网络^[14-15],使得页岩油能够有效产出。因此,弄清页岩层的矿物组成与分布特征对页岩油开采具有重要价值。

页岩油资源富集状况和页岩可压裂性是页岩油开采有利目标区优选的 2 大最主要因素^[16-17]。页岩油资源富集状况一般通过 TOC、成熟度等参数来反映,目前,泌阳凹陷核三上段有关这方面的研究报道较多,而页岩矿物成分研究报道相对较少,且主要是通过实测数据反映矿物变化规律^[18-19]。然而,湖相沉积的页岩层矿物组成存在强烈的非均质性^[18-19],仅靠数量有限的岩心实验分析数据难以全面准确地了解页岩层的矿物组成和分布特征。本文通过多参数回归和多矿物模型^[20-22]建立岩心与测井数据之间的定量关系,结合实验分析与测井预测以达到对泌阳凹陷核三上段脆性矿物的全面认识。

1 地质背景

泌阳凹陷是南襄盆地中的一个次级构造单元,位于河南省南部唐河县与泌阳县境内,平面上呈扇形展布。凹陷从南向北、从东向西逐渐抬升,构成一个南深北浅,平面呈端部北指的箕状断陷。凹陷内部次级构造单元可划分为南部陡坡带、中部深凹带、北部斜坡带(图 1)。泌阳凹陷面积约 1 000 km²,基底最大埋深达 8 000 m 以上^[23-24]。泌阳凹陷沉积地层自下而上发育上白垩统,古近系玉皇顶组、大仓房组、核桃园组、廖庄组,新近系上寺组及第四系。其中,核桃园组分为三段,自下而上分别为核三段、核二段和核一段^[25]。泌阳凹陷深凹区核三上段为深湖相—半深湖相沉积,发育大套泥页岩,其页岩层厚

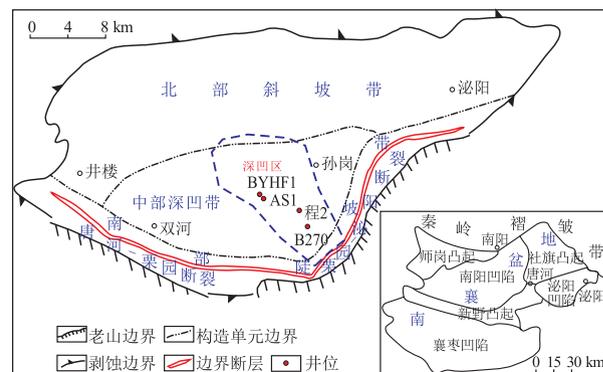


图 1 南襄盆地泌阳凹陷深凹区构造位置

Fig.1 Tectonic location of the deep sag area in the Biyang Depression, Nanxiang Basin

度大、有机质类型好、丰度高、热演化程度适中,具有良好的成藏基础,为页岩油勘探主力层段^[26-28]。

2 样品与实验

2.1 样品

本次研究共采集核三上段页岩层 116 个岩心样品(表 1),分别来自于泌页 HF1 井、安深 1 井、泌 365 井、程 2 井和泌 270 井(图 1)。

2.2 实验方法

X 衍射技术是鉴定、分析和测量固态物质物相的一种基本方法,在地质学及含油气盆地分析中已广泛应用^[29]。样品的矿物成分测试在中国地质大学(武汉)材化学院 XRD 研究室完成,仪器为德国 Bruker AXS D8-Focus X 射线衍射仪。测试条件: Cu 靶, K α 辐射, Ni 滤波, X 射线管电压 40 kV, 管电流 40 mA, 采样间隔 0.01 $^\circ$, 扫描速度 0.05 s/步。采用缩分法对采集的样品进行制备,以使所测试样品能更好地代表所在层位岩石的矿物成分。

3 实验结果及讨论

3.1 实验结果

样品中均含有伊利石、绿泥石等黏土矿物,以及石英、长石、方解石、白云石等碎屑矿物和自生矿物。部分样品含有蒙脱石、高岭石等黏土矿物,黄铁矿、沸石、石膏等其他矿物。

矿物组分定量分析结果显示,泌阳凹陷深凹区核三上段泥页岩各种矿物含量变化起伏较大(图 2)。总体而言,石英含量最高,为 1.8%~67.4%,平均 24.2%;黏土矿物其次,为 1.5%~69.3%,平均 23.4%;还含有较多的斜长石,平均 19.7%;方解石、白云石含量分布范围较广,方解石最高含量达到 84.8%,但其主要分布范围在 0~20%之间,方解石、白云石平均含量分别为 13.1%和 11.9%;钾长石、黄铁矿含量较少,平均含量分别为 3.3%和 3.1%;沸石、石膏等其他矿物少见。石英、钾长石、斜长石、方解石、白云石等脆性矿物总量为 29.2%~

表 1 南襄盆地泌阳凹陷核三上段页岩层样品信息

Table 1 Shale samples from the upper section of the third member of Hetaoyuan Formation in the Biyang Depression, Nanxiang Basin

井号	样品数量/个	采样深度范围/m	采样间隔/m
泌页 HF1	33	2 416.3~2 451.2	约 1
安深 1	13	2 460.0~2 540.0	4~10
泌 365	22	2 726.3~2 751.2	约 1
程 2	36	2 795.9~2 831.9	1~2
泌 270	12	2 945.0~3 050.0	约 5

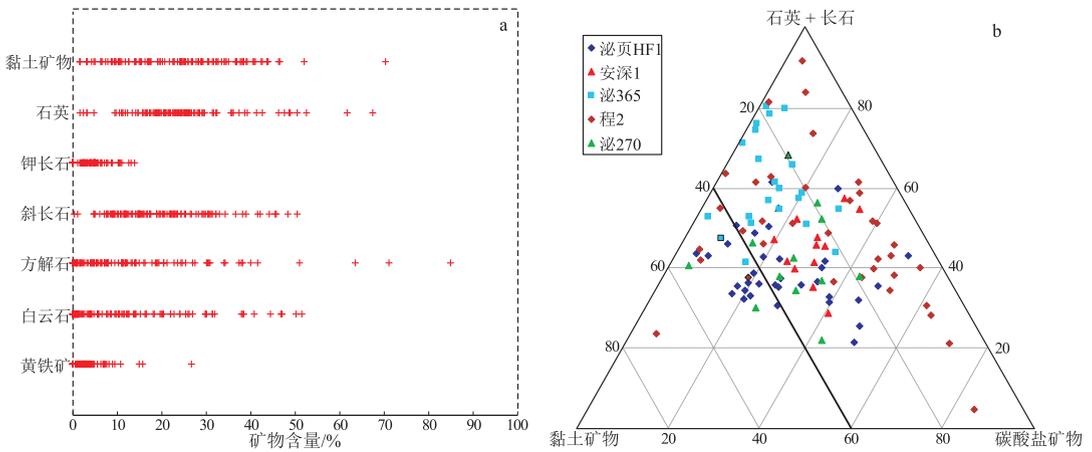


图 2 南襄盆地泌阳凹陷核三上段矿物含量分布特征

Fig.2 Distribution of mineral content in the upper section of the third member of Hetaoyuan Formation in the Biyang Depression, Nanxiang Basin

95.4%, 平均 72.2%。脆性矿物含量较高, 其中石英长石类矿物占绝大多数, 根据岩石脆性评价标准^[30]判断, 该泥页岩的脆性矿物含量超过 60%, 脆性较好。

3.2 矿物预测方法

页岩虽然外观均匀, 但其内部矿物组分却非常复杂, 除了含有石英、长石等多种主要矿物外, 部分岩石还含有少量沸石、石膏, 而且各矿物在横向和纵向上含量变化很大, 例如, 本次实测的 116 个样品矿物含量中, 方解石含量最少为 0, 最多可达 85% (图 2)。所以, 仅靠为数有限的岩心矿物分析不能有效地刻画各种矿物含量在泥页岩中的分布特征, 需要在实测矿物含量的基础上, 通过其他手段进行预测。测井资料纵向分辨率高、连续性好, 利用测井资料进行矿物预测精确度高, 目前常用的有多测井参数回归法和多矿物模型法。

3.2.1 多测井参数回归法

岩石中各矿物都有其不同的固定的测井响应值, 如声波在不同矿物中的传播速度不同, 各矿物声波时差测井响应值也会发生变化。矿物成分及含量不同, 岩层测井曲线值会发生变化, 反之, 各测井曲线值的变化一定程度上反映了不同的矿物成分及含量。因此, 可以将测井曲线值作为自变量, 各矿物含量作为因变量, 建立测井曲线与矿物含量之间的多元线性回归方程。首先, 建立单一矿物实测含量与各测井曲线响应值之间的多元回归方程并拟合回归系数, 然后, 利用得到的回归方程预测无实测数据层段的矿物含量。不同矿物拟合回归方程所用的测井曲线种类和个数不同, 需要根据本地区实际情况确定最优组合。多参数回归分析中拟合方程的相关性受实测数据精度和数量影响较

大, 为了提高拟合方程的精度, 可采取段对段取值方式建模^[31]。

3.2.2 多矿物模型法

多矿物模型根据岩石体积模型原理以及各矿物、流体的不同测井响应值预测矿物组分。岩石可简化为由石英、长石、方解石等一系列矿物和孔隙流体组成, 自然伽马、体积密度、声波时差等测井响应值可以看作岩石单位体积内各组成部分响应物理量的平均值^[20,32], 因此, 建立测井响应方程通式:

$$\left. \begin{aligned} F_1 &= P_{1,1}V_1 + P_{1,2}V_2 + \dots + P_{1,j}V_j + \dots + P_{1,n}V_n + P_{1,o}V_o + P_{1,w}V_w \\ F_2 &= P_{2,1}V_1 + P_{2,2}V_2 + \dots + P_{2,j}V_j + \dots + P_{2,n}V_n + P_{2,o}V_o + P_{2,w}V_w \\ &\dots \\ F_i &= P_{i,1}V_1 + P_{i,2}V_2 + \dots + P_{i,j}V_j + \dots + P_{i,n}V_n + P_{i,o}V_o + P_{i,w}V_w \\ &\dots \\ F_m &= P_{m,1}V_1 + P_{m,2}V_2 + \dots + P_{m,j}V_j + \dots + P_{m,n}V_n + P_{m,o}V_o + P_{m,w}V_w \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中: $i=1, 2, \dots, m; j=1, 2, \dots, n; F_i$ 为第 i 种测井的实际测量值, 共 m 种测井曲线, 其值由测井曲线直接读取。在页岩地层较薄的情况下, 为了排除邻层对测井数据的影响, 有时需要对测井数据进行规范化: 首先利用测井曲线和岩心图像识别地层边界, 然后用最能反映地层特征的测井曲线上的点 (一般为中点或极值点) 作为该段地层的测井值^[21,33]; V_j 为第 j 种待求矿物的百分含量, 共 n 种待求矿物; V_o, V_w 分别为油和水的百分含量; $P_{i,j}$ 为第 j 种纯矿物第 i 种测井的响应值; $P_{i,o}, P_{i,w}$ 分别为油和水第 i 种测井的响应值; 岩石各组分的体积百分含量之和为 1, 且都大于等于 0, 即有约束条件:

$$\begin{aligned} V_1 + V_2 + \dots + V_j + \dots + V_n + V_o + V_w &= 1 \\ V_j \geq 0; V_o \geq 0; V_w \geq 0 \end{aligned} \quad (2)$$

联立式(1)和(2)即可求出各矿物百分含量。

孔隙流体中可能还含有气,由于泌阳凹陷核三上段页岩层为页岩油含油层位,含气量较少,在计算过程中未考虑气体对响应方程的影响。泌阳凹陷核三上段页岩层岩心实验分析结果显示,主要矿物种类为石英、钾长石、斜长石、方解石、白云石、伊利石和绿泥石,钾长石、斜长石系列主要是正长石和钠长石,这些纯矿物及油、水的常用测井响应值见表2^[34]。根据纯矿物及油、水的测井响应参数范围取定初值,最终计算出矿物及流体含量后,将选用的测井响应参数初值及矿物和流体的计算结果代入测井响应方程以重建测井曲线。如果重建的曲线和原始测井曲线不能很好的叠合,则需重新选取矿物测井响应初值并代入计算,直至重建曲线与原始测井曲线叠合度最好为止。

为了得到唯一解,式(1)和(2)组成的方程组应该为一个矩阵,即为了得到 n 种矿物百分含量的唯一解,需要 $n+1$ 种测井曲线。有时经常出现测井曲线数量不足的情况,此时不存在唯一解,只存在一个最近似的解,这时可通过最小二乘法误差获

表2 纯矿物及油、水测井响应值^[34]

Table 2 Logging values of pure minerals, oil and water

岩石成分	DEN/ ($g \cdot cm^{-3}$)	AC/ ($\mu s \cdot m^{-1}$)	GR/API	NPHI/pu
石英	2.65	165	0~5	-0.05
正长石	2.53~2.54	175~177	235~275	-0.03
钠长石	2.58	157	3.6~58.6	-0.03
方解石	2.71	156	0~10	0
白云石	2.87	143	0~10	0.03
伊利石	2.60~2.90	280	130~235	0.3
绿泥石	2.60~3.30	280	50	0.3
油	0.63	620	0	1
水	1.05	620	0	1

得最优解^[35]。最小二乘法总误差 δ 为:

$$\delta = \sum_{k=1}^n \left(\frac{X_{\text{测量}k} - X_{\text{期望}k}}{X_{\text{测量}k}} \right)^2$$

式中: $X_{\text{测量}k}$ 为实际测井曲线值; $X_{\text{期望}k}$ 为解方程后根据各矿物所占百分比正向推导出的理论测井值。各测井曲线的实测值和理论值除以 $X_{\text{测量}k}$ 是对数据进行标准化,因为各测井值量纲不同。

总误差最小的解即为最优解。

3.3 预测精度分析

分别利用多测井参数回归法和多矿物模型法对泌阳凹陷深凹区核三上段页岩层的矿物组分进行预测。结果表明,多测井参数回归法和多矿物模型法中各矿物预测值与实测值的相关系数分别为0.3~0.6和0.5~0.8。相较之下,用多矿物模型法预测的效果更好。

多测井参数回归法预测安深1井、泌365井、程2井和泌270井实测数据拟合的回归公式为:

$$\begin{aligned} \text{石英含量} = & 0.072w(\text{Th}) + 5.347w(\text{K}) - 0.069w(\text{GR}) + \\ & 0.764w(\text{CNL}) - 0.003w(\text{RT}) \end{aligned} \quad (3)$$

式中: $w(\text{Th})$ 为钍含量; $w(\text{K})$ 为钾含量; $w(\text{GR})$ 为自然伽马测井曲线值; $w(\text{CNL})$ 为中子测井曲线值; $w(\text{RT})$ 为电阻率测井曲线值。

根据式(3)预测泌页HF1井的石英含量,预测值与实测值的相关系数为0.4866(图3a)。

图3b为多矿物模型法预测中石英相关性分析图,石英预测值与实测值的相关系数为0.7549。

可见多矿物模型在泌阳凹陷地区应用的相关性更好。对比泌页HF1井脆性矿物总量多矿物模型预测值与实测值的误差(图4),表明预测数据的

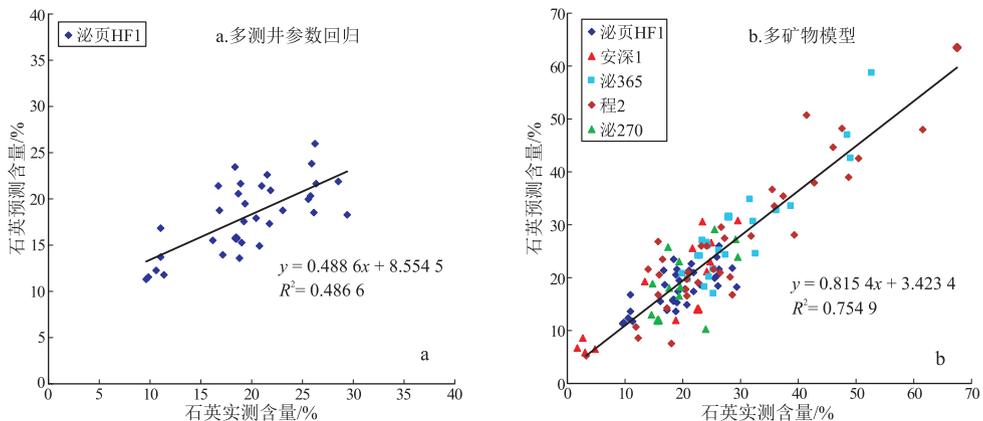


图3 南襄盆地泌阳凹陷核三上段页岩层石英含量预测结果的相关性分析

Fig.3 Quartz contents predicted by multi-parameter regression and multi-mineral model in shale samples from the upper section of the third member of Hetaoyuan Formation in the Biyang Depression, Nanxiang Basin

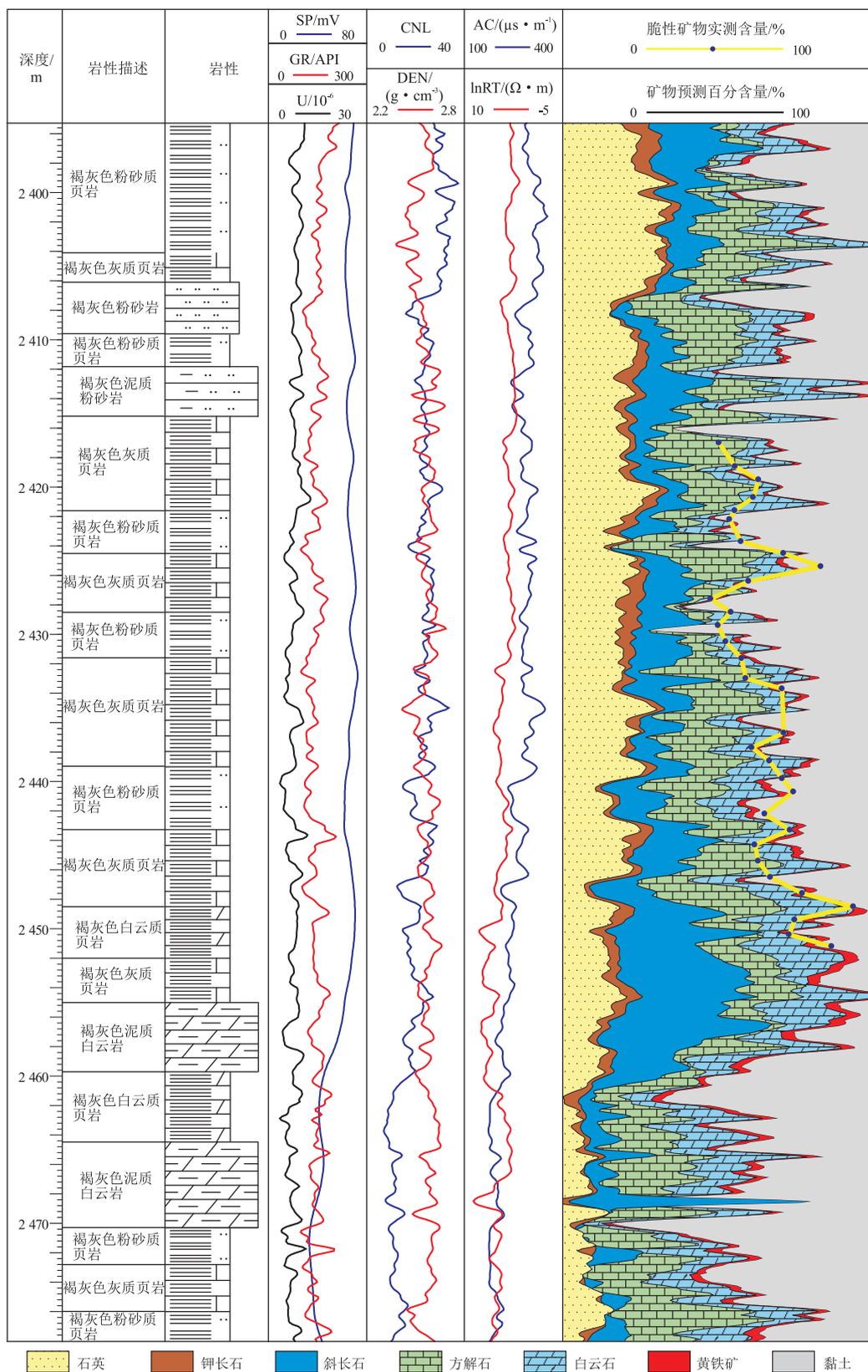


图 4 南襄盆地泌阳凹陷泌页 HF1 井页岩层矿物剖面分析

Fig.4 Mineral section of shales in well BYHF1 in the Biyang Depression, Nanxiang Basin

最大相对误差为 31.0%，平均相对误差为 9.7%，总体相对误差较小，因此，选用多矿物模型分析该区脆性矿物分布特征。

3.4 脆性矿物分布特征

通过多矿物模型预测泌页 HF1 井核三上段页岩层各矿物含量，由泌页 HF1 井矿物处理成果图

(图4)可知:矿物测井解释与实验室岩心分析两者一致性较好,脆性矿物总体含量基本吻合;页岩层黏土矿物含量为0~57.4%,平均22.4%,石英、钾长石、斜长石、方解石、白云石、黄铁矿平均含量分别为17.5%,3.1%,14.6%,17.3%,12.9%,3.1%;脆性矿物总量为13.7%~100%,平均65.5%,脆性矿物整体含量较高,在深度2 454 m左右,脆性矿物含量最高;页岩层上部各矿物含量较稳定,以脆性矿物为主,而下部各矿物含量变化较大,脆性矿物总体呈现先增后减的趋势。

泌阳凹陷深凹区核三上段页岩层脆性矿物平均含量平面分布如图5所示,脆性矿物平均含量整体基本大于50%,脆性矿物含量较高;深凹区中部泌365井、泌149井和程2井附近脆性矿物含量最高,达70%以上,沿着四周脆性矿物含量逐渐降低,泌69井附近脆性矿物含量接近70%,出现不太明显的含量高值区,这2个脆性矿物含量相对较高的区域,夹层厚度较大,有利于后期压裂;脆性矿物等值线分布均匀,脆性矿物含量变化平缓。

3.5 脆性矿物的地质意义

脆性矿物含量是控制页岩油藏的重要因素,影响孔隙和裂缝的发育程度^[36-37],进而影响页岩油的产能。石英、长石含量高的页岩,杨氏模量大、泊松比小,岩石更易碎;碳酸盐矿物一般含量高,有利于压裂,但并不总是含量越高越好,页岩层中裂缝被碳酸盐矿物充填的地方,在岩层压裂过程中,往

往作为破裂边界阻止裂缝延伸^[38];黏土矿物会增加岩层的延展性。因此,了解脆性矿物空间分布有利于制定合理的压裂方案。脆性矿物含量高,意味着黏土矿物含量一般较低,吸附油相对较少,增加了游离油储存空间,有利于页岩油藏开发。

页岩油富集区(如北美 Fort Worth 盆地密西西比系 Barnett 页岩、Appalachian 盆地泥盆系 Ohio 页岩、Illinois 盆地泥盆系 New Albany 页岩、San Juan 盆地白垩系 Lewis 页岩)脆性矿物含量都大于30%,脆性矿物平均含量大于60%^[36,39-41],都有较好的脆性。相较而言,泌阳凹陷核三上段页岩层脆性矿物整体含量大于50%,脆性矿物含量较高,有利于储层压裂改造。泌页 HF1 井核三上段页岩层在深度2 454 m左右脆性矿物含量最高,达到90%,石英长石类脆性矿物含量远大于碳酸盐矿物,其上、下部分脆性矿物含量都有所降低,在此深度为压裂的有效激发点,即页岩层的中部偏下位置有利于压裂。泌365、泌354、程2等井区附近脆性矿物含量高,四周脆性矿物含量呈近环形趋势下降,在此井区附近压裂可使能量衰减最慢而获得最有效的压裂效果,是页岩油开发的有利地区。通过岩心实验分析与测井预测,可以了解页岩层的脆性矿物分布,为页岩油有利区预测提供证据,也为勘探开发过程中压裂部署做好准备。

4 结论

(1)岩心矿物实测结果表明,泌阳凹陷核三上段页岩层矿物组分复杂,各矿物含量变化幅度较大。脆性矿物含量大于60%,其中石英长石类矿物占多数,脆性较好,为页岩油开发压裂的有利层段。

(2)矿物预测结果表明,泌阳凹陷深凹区核三上段页岩层平面上在泌365、泌354、程2等井区附近、剖面上在页岩层中部偏下位置脆性矿物最为富集,为勘探开发的有利区域和层段。

(3)测井方法预测矿物组分相关性较好,其中,多矿物模型精度较高,在泌阳凹陷地区应用效果好。结合岩心实测数据与测井预测数据分析矿物组分,可达到对页岩层脆性矿物含量及其分布的精确认识,为寻找页岩油有利区提供证据。

参考文献:

- [1] 贾承造,郑民,张永峰.中国非常规油气资源与勘探开发前景[J].石油勘探与开发,2012,39(2):129-136.
Jia Chengzao, Zheng Min, Zhang Yongfeng. Unconventional hydrocarbon resources in China and the prospect of exploration and development [J]. Petroleum Exploration and Development, 2012,

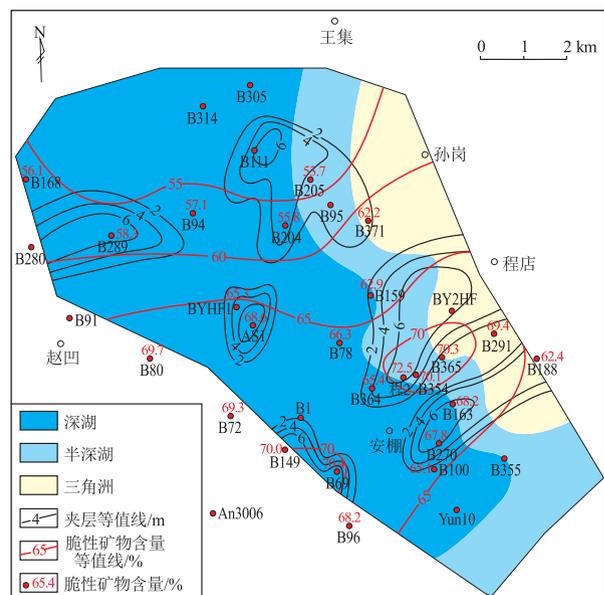


图5 南襄盆地泌阳凹陷深凹区核三上段页岩层脆性矿物平均含量平面分布

Fig.5 Average contents of brittle minerals in shales in the upper section of the third member of Hetaoyuan Formation in the deep sag area of Biyang Depression, Nanyang Basin

- 39(2):129-136.
- [2] 盛湘,陈祥,章新文,等.中国陆相页岩油开发前景与挑战[J].石油实验地质,2015,37(3):267-271.
Sheng Xiang, Chen Xiang, Zhang Xinwen, et al. Prospects and challenges of continental shale oil development in China [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2015, 37(3): 267-271.
- [3] 王优先.陆相页岩油成藏地质条件及富集高产主控因素:以泌阳凹陷为例[J].断块油气田,2015,22(5):588-593.
Wang Youxian. Geologic conditions of continental shale oil accumulation and main controlling factors of enrichment and high production: Taking Biyang Depression as an example [J]. Fault-Block Oil and Gas Field, 2015, 22(5): 588-593.
- [4] 吕艳南,张金川,张鹏,等.东濮凹陷北部沙三段页岩油气形成及分布预测[J].特种油气藏,2014,21(4):48-52.
Lv Yannan, Zhang Jinchuan, Zhang Peng, et al. Shale oil/gas formation and distribution prediction in Sha-3 Member of Northern Dongpu Sag [J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2014, 21(4): 48-52.
- [5] 陈永昌,张金川,苏惠,等.东濮凹陷北部沙三段页岩油成藏地质条件分析[J].特种油气藏,2014,21(3):62-65.
Chen Yongchang, Zhang Jinchuan, Su Hui, et al. Analysis of geologic conditions for Es3 shale oil accumulation in the northern Dongpu sag [J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2014, 21(3): 62-65.
- [6] 宁方兴.济阳坳陷不同类型页岩油差异性分析[J].油气地质与采收率,2014,21(6):6-9.
Ning Fangxing. Difference analysis on different types of shale oils in Jiyang depression [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2014, 21(6): 6-9.
- [7] 王勇,宋国奇,刘惠民,等.济阳坳陷页岩油富集主控因素[J].油气地质与采收率,2015,22(4):20-25.
Wang Yong, Song Guoqi, Liu Huimin, et al. Main control factors of enrichment characteristics of shale oil in Jiyang depression [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2015, 22(4): 20-25.
- [8] 邹才能,陶士振,侯连华,等.非常规油气地质[M].北京:地质出版社,2011.
Zou Caineng, Tao Shizhen, Hou Lianhua, et al. Unconventional petroleum geology [M]. Beijing: Geology Publishing House, 2011.
- [9] 邹才能,杨智,崔景伟,等.页岩油形成机制、地质特征及发展对策[J].石油勘探与开发,2013,40(1):14-26.
Zou Caineng, Yang Zhi, Cui Jingwei, et al. Formation mechanism, geological characteristics and development strategy of nonmarine shale oil in China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2013, 40(1): 14-26.
- [10] 王欢,廖新维,赵晓亮,等.非常规油气藏储层体积改造模拟技术研究进展[J].特种油气藏,2014,21(2):8-15.
Wang Huan, Liao Xinwei, Zhao Xiaoliang, et al. The progress of reservoir stimulation simulation technology in unconventional oil and gas reservoir [J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2014, 21(2): 8-15.
- [11] 程远方,王光磊,李友志,等.致密油体积压裂缝网扩展模型建立与应用[J].特种油气藏,2014,21(4):138-141.
Cheng Yuanfang, Wang Guanglei, Li Youzhi, et al. Establishment and application of fracture propagation model for volumetric fracturing in tight oil reservoir [J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2014, 21(4): 138-141.
- [12] 齐银,白晓虎,宋辉,等.超低渗透油藏水平井压裂优化及应用[J].断块油气田,2014,21(4):483-485,491.
Qi Yin, Bai Xiaohu, Song Hui, et al. Fracturing optimization and application of horizontal wells in ultra-low permeability reservoir [J]. Fault-Block Oil and Gas Field, 2014, 21(4): 483-485, 491.
- [13] 徐创朝,陈存慧,王波,等.低渗致密油藏水平井缝网压裂裂缝参数优化[J].断块油气田,2014,21(6):823-827.
Xu Chuangchao, Chen Cunhui, Wang Bo, et al. Fracture parameter optimization of network fracturing for horizontal well in low permeability and tight oil reservoir [J]. Fault-Block Oil and Gas Field, 2014, 21(6): 823-827.
- [14] Ross D J K, Bustin R M. The importance of shale composition and pore structure upon gas storage potential of shale gas reservoirs [J]. Marine and Petroleum Geology, 2009, 26(6): 916-927.
- [15] Hill D G, Nelson C R. Reservoir properties of the Upper Cretaceous Lewis Shale, a new natural gas play in the San Juan Basin [J]. AAPG Bulletin, 2000, 84(8): 1240.
- [16] 姜在兴,张文昭,梁超,等.页岩油储层基本特征及评价要素[J].石油学报,2014,35(1):184-196.
Jiang Zaixing, Zhang Wenzhao, Liang Chao, et al. Characteristics and evaluation elements of shale oil reservoir [J]. Acta Petrolei Sinica, 2014, 35(1): 184-196.
- [17] Jarvie D M. Shale resource systems for oil and gas: part 2 shale-oil resource systems [M] // Breyer J A, ed. AAPG Memoir 97 Shale reservoirs: giant resources for the 21st century. Tulsa: AAPG, 2012: 89-119.
- [18] 陈国辉.泌阳凹陷核三上亚段页岩油资源潜力分级评价[D].大庆:东北石油大学,2013.
Chen Guohui. Shale oil resource potential classification of the upper section of the third member of Hetaoyuan Formation, Palaeogene in the Biyang Sag [D]. Daqing: Northeast Petroleum University, 2013.
- [19] 李吉君,史颖琳,章新文,等.页岩油富集可采主控因素分析:以泌阳凹陷为例[J].地球科学:中国地质大学学报,2014,39(7):848-857.
Li Jijun, Shi Yinglin, Zhang Xinwen, et al. Control factors of enrichment and producibility of shale oil: A case study of Biyang depression [J]. Earth Science: Journal of China University of Geosciences, 2014, 39(7): 848-857.
- [20] 秦瑞宝,余杰.多矿物处理方法在北美页岩油气藏测井评价中的应用[J].石油地球物理勘探,2013,48(S1):175-180.
Qin Ruibao, Yu Jie. Application of multi-mine soft model in a shale oil & gas reservoir logging evaluation [J]. Oil Geophysical Prospecting, 2013, 48(S1): 175-180.
- [21] Heidari Z, Torres-verdín C. Inversion-based method for estimating total organic carbon and porosity, and for diagnosing mineral constituents from multiple well logs in shale-gas formations [J]. Interpretation, 2013, 1(1): T113-T123.
- [22] 张晋言.页岩油测井评价方法及其应用[J].地球物理学进展,2012,27(3):1154-1162.
Zhang Jinyan. Well logging evaluation method of shale oil reservoirs and its applications [J]. Progress in Geophysics, 2012,

- 27(3):1154-1162.
- [23] 张文昭.泌阳凹陷古近系核桃园组三段页岩油储层特征及评价要素[D].北京:中国地质大学,2014.
Zhang Wenzhao.Characteristics and evaluation factors of shale oil reservoir of the third member of Hetaoyuan Formation, Palaeogene in Biyang Depression [D].Beijing:China University of Geosciences,2014.
- [24] 王敏,陈祥,严永新,等.南襄盆地泌阳凹陷陆相页岩油地质特征与评价[J].古地理学报,2013,15(5):663-671.
Wang Min,Chen Xiang,Yan Yongxin, et al.Geological characteristics and evaluation of continental shale oil in Biyang sag of Nanxiang Basin [J].Journal of Palaeogeography,2013,15(5):663-671.
- [25] 董田,何生,林社卿.泌阳凹陷核桃园组烃源岩有机地化特征及热演化成熟史[J].石油实验地质,2013,35(2):187-194.
Dong Tian,He Sheng,Lin Sheqing.Organic geochemical characteristics and thermal evolution maturity history modeling of source rocks in Eocene Hetaoyuan Formation of Biyang Sag, Nanxiang Basin [J].Petroleum Geology & Experiment,2013,35(2):187-194.
- [26] 陈祥,王敏,严永新,等.泌阳凹陷陆相页岩油气成藏条件[J].石油与天然气地质,2011,32(4):568-576.
Chen Xiang,Wang Min,Yan Yongxin, et al.Accumulation conditions for continental shale oil and gas in the Biyang Depression[J].Oil & Gas Geology,2011,32(4):568-576.
- [27] 吕明久,付代国,何斌,等.泌阳凹陷深凹区页岩油勘探实践[J].石油地质与工程,2012,26(3):85-87.
Lv Mingjiu,Fu Daiguo,He Bin, et al.Exploration practice of shale oil in deep sag area of Biyang depression [J].Petroleum Geology and Engineering,2012,26(3):85-87.
- [28] 章新文,李吉君,朱景修,等.泌阳凹陷页岩油富集段资源评价及有利区预测[J].断块油气田,2014,21(3):301-304.
Zhang Xinwen,Li Jijun,Zhu Jingxiu, et al.Resource evaluation and favorable area prediction on rich section of shale oil in Biyang Depression [J].Fault-Block Oil & Gas Field,2014,21(3):301-304.
- [29] 赵杏媛,张有瑜,宋健.中国含油气盆地粘土矿物的某些矿物学特征[J].现代地质,1994,8(3):264-272.
Zhao Xingyuan,Zhang Youyu,Song Jian.Some mineralogical characteristics of clay minerals in China oil-bearing basins [J].Geoscience-Journal of Graduate School, China University of Geosciences,1994,8(3):264-272.
- [30] Wang G C,Carr T R.Methodology of organic-rich shale lithofacies identification and prediction:A case study from Marcellus Shale in the Appalachian basin[J].Computers & Geosciences,2012,49:151-163.
- [31] 耿生臣.罗家地区泥页岩矿物组分含量解释模型构建方法[J].油气地质与采收率,2013,20(1):24-27.
Geng Shengchen.Study on shale mineral component model in Luoia area [J].Petroleum Geology and Recovery Efficiency,2013,20(1):24-27.
- [32] 侯颀,邹长春,杨玉卿.页岩气储层矿物组分测井分析方法[J].工程地球物理学报,2012,9(5):607-613.
Hou Jie,Zou Changchun,Yang Yuqing.Well Logging method in the analysis of the mineralogical composition of shale gas reservoirs [J].Chinese Journal of Engineering Geophysics,2012,9(5):607-613.
- [33] Heidari Z,Torres-Verdín C,Preeg W E.Improved estimation of mineral and fluid volumetric concentrations in thinly bedded carbonate formations[J].Geophysics,2012,78(4):D261-D269.
- [34] 吴庆岩,张爱军.斯仑贝谢测井公司解释常用岩石矿物手册[M].北京:石油工业出版社,1998.
Wu Qingyan,Zhang Aijun.Log interpretation of commonly used rock mineral[M].Beijing:Petroleum Industry Press,1998.
- [35] 田云英,夏宏泉.基于多矿物模型分析的最优化测井解释[J].西南石油学院学报,2006,28(4):8-11.
Tian Yunying,Xia Hongquan.The optimal logging explanation base on multi minerals model analysis[J].Journal of Southwest Petroleum Institute,2006,28(4):8-11.
- [36] Loucks R G,Ruppel S C.Mississippian Barnett Shale:Lithofacies and depositional setting of a deep-water shale-gas succession in the Fort Worth Basin,Texas[J].AAPG Bulletin,2007,91(4):579-601.
- [37] Bryndzia L T,Braunsdorf N R.From source rock to reservoir:the evolution of self-sourced unconventional resource plays[J].Elements,2014,10(4):271-276.
- [38] Bowker K A.Development of the Barnett shale play,Fort Worth Basin [J].West Texas Geological Society Bulletin,2003,42(6):4-11.
- [39] Jarvie D M,Hill R J,Ruble T E, et al.Unconventional shale-gas systems:The Mississippian Barnett Shale of north-central Texas as one model for thermogenic shale-gas assessment [J].AAPG Bulletin,2007,91(4):475-499.
- [40] Curtis J B.Fractureed shale-gas systems [J].AAPG Bulletin,2002,86(11):1921-1938.
- [41] Wang G C,Cheng G J,Carr T R.The application of improved NeuroEvolution of Augmenting Topologies neural network in Marcellus Shale lithofacies prediction[J].Computers & Geosciences,2013,54:50-65.

(编辑 徐文明)