

基于主成分分析的致密砂砾岩孔隙度测井评价方法

高 阳 李忠新

(中石化胜利油田分公司勘探开发研究院 山东东营 257015)

摘 要 岩性识别是致密砂砾岩测井评价的重要工作。砂砾岩岩性多样、成分复杂,导致测井识别岩性准确率低、测井解释孔隙度不准确。以东营凹陷北部陡坡带沙四下亚段致密砂砾岩为例,在对其岩石学特征分析的基础上,按照岩石类型和骨架矿物差异给砂砾岩分类,利用铸体薄片资料对测井曲线进行岩性标定,提取各种岩性的测井响应特征,在此基础上建立了基于主成分分析的测井岩性识别方法,并分岩性建立了孔隙度测井评价模型,提高了砂砾岩测井岩性识别和测井孔隙度计算的准确率。

关键词 致密砂砾岩 测井评价 主成分分析 东营凹陷 孔隙度

第一作者简介 高 阳 男 1982年出生 博士 副研究员 致密砂砾岩油气成藏与储层评价 E-mail:swap124@163.com

中图分类号 TE122.2*3 **文献标识码** A

0 引言

砂砾岩油气藏是断陷盆地重要的油气勘探目标^[1]。在我国东部箕状断陷盆地陡坡带,广泛发育了砂砾岩扇体,目前已在 大庆油田徐家围子地区^[2]、大港油田滩海地区^[3]、辽河油田西部凹陷^[4]、胜利油田东营凹陷北部陡坡带、车镇凹陷北部陡坡带和沾化凹陷罗家地区^[5-7]发现了规模聚集的砂砾岩油气藏。砂砾岩体大多为重力流和牵引流共同作用下的扇三角洲、近岸水下扇或浊积扇近物源沉积物,储层非均质性强,具体表现为:平面上岩相变化快,纵向多期叠置、沉积厚度大,微观上表现为岩石骨架成分复杂、孔隙结构变化复杂^[8],这些导致了砂砾岩体测井岩性识别和物性评价精度低^[9]。提高砂砾岩储层测井评价精度,是这类油气藏勘探和开发亟待解决的科学和实际问题。

东营凹陷北部陡坡带沙四下亚段致密砂砾岩中富含油气^[10]。2005年该区的丰深1井沙四下亚段砂砾岩储层经CO₂压裂后,获日产气8×10⁴ m³、凝析油49.7 m³的工业油气流,2011年丰深1—斜1井沙四下亚段砂砾岩经压裂后,6 mm油嘴试气日产气7.2×10⁴ m³、凝析油18.7 m³,证实该区致密砂砾岩油气藏具有较大的资源潜力^[11-13]。国内外勘探实践证明,致密

砂砾岩油气勘探的关键问题是有效储层识别,但目前东营北带沙四下亚段致密砂砾岩测井评价仍然采用的是复杂岩性解释方法(CRA),该方法识别岩性的准确率低于50%,测井解释的孔隙度与实测孔隙度之间有很大差别,多数样品测井解释孔隙度大于实测孔隙度,测井孔隙度与实测孔隙度差值小于1.5%的样品仅占所有样品的61.8%(图1),这直接影响了该区砂砾岩有效储层识别,阻碍了该区致密砂砾岩油气藏的勘探。

因此,本文在对东营北带沙四下亚段砂砾岩储层岩石学特征分析的基础上,按照骨架矿物、岩石类型对砂砾岩分类,并建立了基于主成分分析的砂砾岩岩性测井识别方法,然后分岩性建立了孔隙度测井计算模型,提高了该区致密砂砾岩储层孔隙度测井评价精度。

1 致密砂砾岩储层特征与分类

东营凹陷北部陡坡带紧邻控凹的陈南断裂,位于断层下降盘,断裂上升盘为陈家庄凸起物源区,沙四下亚段沉积期,陈南断裂强烈活动,两盘之间古落差极大,此时在断层下降盘发育盐湖,总体形成了“高山深湖、沟梁相间”的古地理面貌,发育重力流成因的近岸水下扇沉积^[11]。这些砂砾岩扇体纵向上多期叠置,累计厚度可达2 000余米,平面上自西向东依

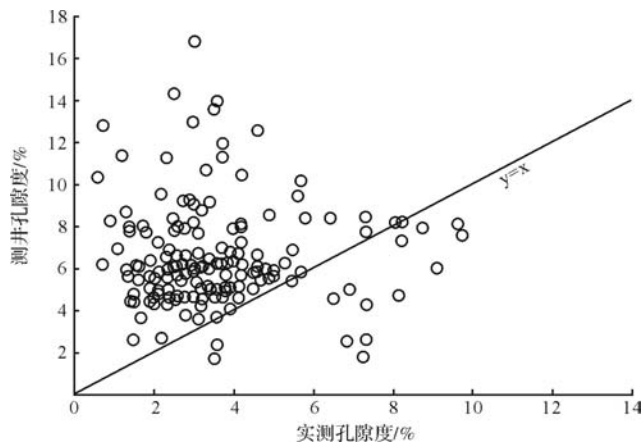


图1 东营凹陷北带沙四下亚段致密砂砾岩测井解释孔隙度(CRA)与实测孔隙度

Fig.1 Logging CRA-porosity and measured porosity of E_{s4x} tight glutenite in the north of Dongying sag

次发育利津、胜坨、民丰三个冲沟群,各冲沟群又可以划分为多个冲沟,例如民丰冲沟群可以划分为丰深4、丰深1、丰8、丰深6四个冲沟。

统计了目前该区钻井资料、岩芯资料、粒度分析资料,发现这套砂砾岩岩性组成复杂,其中砾岩(>2 mm)占 39.9% (包括砾岩、含砂砾岩、砂质砾岩),砂岩(包括砂岩、含砾砂岩、砾质砂岩)占 54.5%,这些砂岩中以不等粒砂岩和中粗砂岩为主,细砂岩较少,粉砂岩(<0.062 5 mm)仅占 3.6%,另外还包括 2.0%的杂砂岩(图 2)。统计 179 组砂岩粒度分析资料,发现东营北带沙四下砂岩分选系数介于 1.4~5.2,平均 1.85,标准偏差介于 0.98~2.79,平均 1.44,C 值(百分之一含量的最大粒径)最大可达 45 mm,M 值(中值粒径)平均 0.48 mm,整体分选中等—较差。从粒度累积概率曲线看,粒度分布范围广,以一段式和粗粒稍占优势的宽缓上拱式为主,具有明显的重力流沉积特征(图 3)。薄片观察发现,研究区砂砾岩颗粒以次棱状为主(占 94%),分选差—中等(占观察样品 93%),结构成熟度低。

东营凹陷北部陡坡带沙四下亚段砂砾岩物源来源复杂,既有来自下古生界的碳酸盐岩,也有来自太古界的变质岩,还包括中生界的碎屑岩和少量侵入岩。为查清研究区砂砾岩骨架矿物类型,统计了 253 个铸体薄片数据,发现东营北带沙四下亚段砂砾岩的砾石主要成分为来自太古界的二长花岗岩、花岗—片麻岩、伟晶岩、石英岩砾石(图 4a),以及来自下古生界的白云岩砾石(图 4b),岩浆岩砾石、砂岩砾石较少。根据砂岩三角图分类(图 5),研究区砂岩的岩性

多为岩屑长石砂岩(图 4c)、长石砂岩、长石岩屑砂岩和岩屑砂岩(图 4d),砂岩中石英含量低,平均含量仅 28.9%,长石含量平均 36.3%,岩屑含量平均 34.8%, $Q/(F+R)$ 一般在 0.15~0.75 之间,平均 0.48,矿物成熟度低。

砂岩中岩屑成分能够代表母岩性质。通过统计发现,研究区砂岩中岩屑成分与砂岩类型有相关关系,在研究区西部的利津地区主要为灰岩、白云岩岩屑等沉积岩屑,砂岩类型以长石岩屑砂岩为主,在民丰和胜坨地区为结晶岩、石英岩、二长花岗岩岩屑,砂岩多为长石砂岩、岩屑长石砂岩,且不同冲沟的砂岩类型与岩屑类型规律性分布(图 6)。

总之,按照研究区砂砾岩的粒度特征、岩石学特征、骨架矿物特征,可先将之划分为砂岩和砾岩两种类型,进一步按照骨架矿物类型划分为变质型砾岩、沉积型砾岩、变质型长石砂岩和沉积型岩屑砂岩四类。

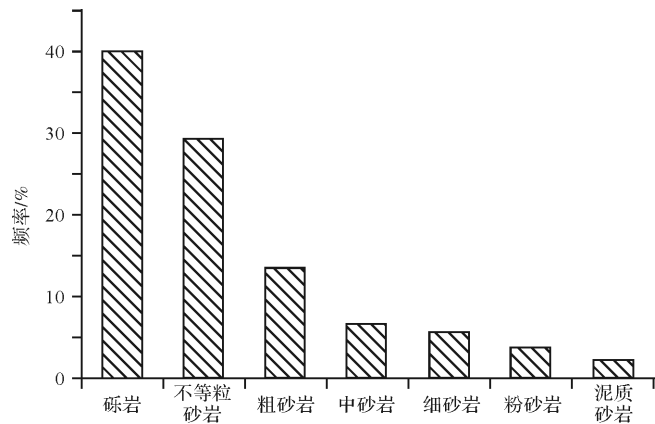


图2 东营北带沙四下砂砾岩岩性直方图(按粒度)

Fig.2 Frequency histogram of E_{s4x} tight glutenite in the north of Dongying sag

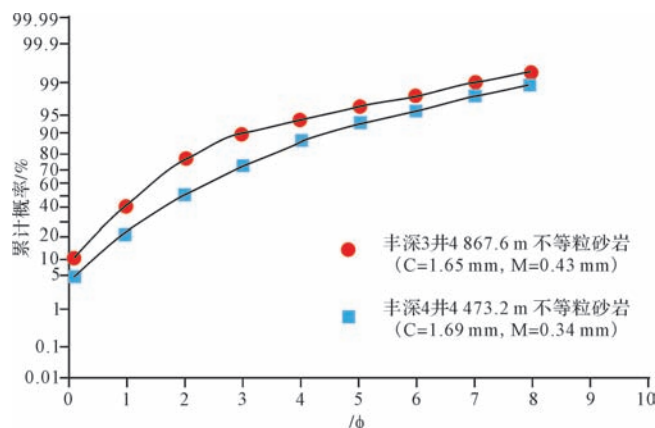


图3 东营北带沙四下砂岩粒度概率累积曲线

Fig.3 Granularity probability cumulative curve of E_{s4x} sandstone in the north of Dongying sag

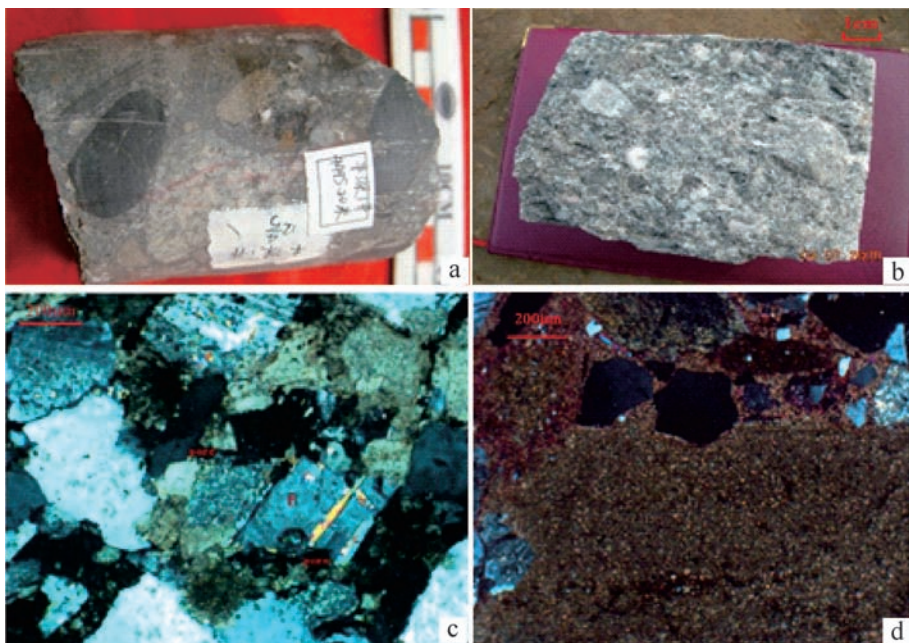


图4 东营北带致密砂砾岩砾石成分与砂岩成分

a. 丰深1井, 4 495.2 m, 太古界变质岩砾石; b. 丰深2井, 5 649.2 m, 下古生界碳酸盐岩砾石; c. 丰深1井, 4 348.25 m, 岩屑长石砂岩(40+); d. 坨168井, 3 490.8 m, 岩屑砂岩(40+)。

Fig.4 Gravel and sandstone composition of Es_{4x} tight glutenite in the north of Dongying sag

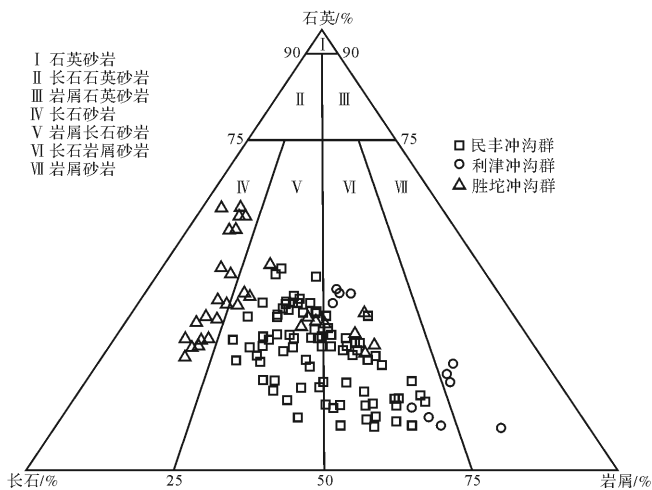


图5 东营北带沙四下砂岩三角图

Fig.5 Sandstone triangle of Es_{4x} in the north of Dongying sag

2 砂砾岩储层测井岩性识别

目前,国内外砂砾岩储层评价普遍采用了先界定岩性或骨架矿物,然后分岩性(骨架矿物)建立测井孔隙度、渗透率计算模型的方法^[14-19],岩性骨架识别的准确性决定了砂砾岩测井评价精度。

2.1 不同岩性测井响应特征

目前常用的岩性识别方法是交汇图、交汇图—树

形判别法,该方法应用的基础是各岩性之间测井响应特征差别较大。从前文可知,按照颗粒粒度,研究区砂砾岩可以划分为砂岩和砾岩两大类,其中砂岩(砾石含量 $<50\%$)又可以划分为含砾砂岩、砾质砂岩和砂岩,砾岩的砾石含量 $>50\%$,进一步可以划分为砾岩、含砾砂岩和砂质砾岩,由于含砾砂岩样品较少,且测井响应特征与砾岩相似,因此我们统计了研究区砂岩、含砾砂岩、砾质砂岩、砂质砾岩、砾岩(包括含砾砂岩)五类岩性的测井响应特征(表1)。由表1可知,砂岩、含砾砂岩和砾质砂岩(砾石含量 $<50\%$)的 $AC > 57 \mu s/ft$, $CNL > 8.0\%$, $lgRt < 1.8$,砾岩(砾石含量 $>50\%$)的 $AC < 57 \mu s/ft$, $CNL < 6.0\%$, $lgRt < 1.8$,但各岩性之间测井响应特征差别小。

2.2 基于主成分分析的砂砾岩岩性测井识别

从密度—中子孔隙度、声波时差—电阻率对数交汇图中也可以看出(图7),砂砾岩各类岩性彼此重叠区间较大,利用二维交会图难以区分。众所周知,随着参与交会的曲线数量(维度)增加,岩性区分度增加,但我们实际研究中只能在三维空间内研究,也就是说只能应用三条曲线开展交会分析,如果交会不能有效区分岩性,就需要我们增加曲线数目。为此我们引入了主成分分析方法,其主要思路是将多条反应岩

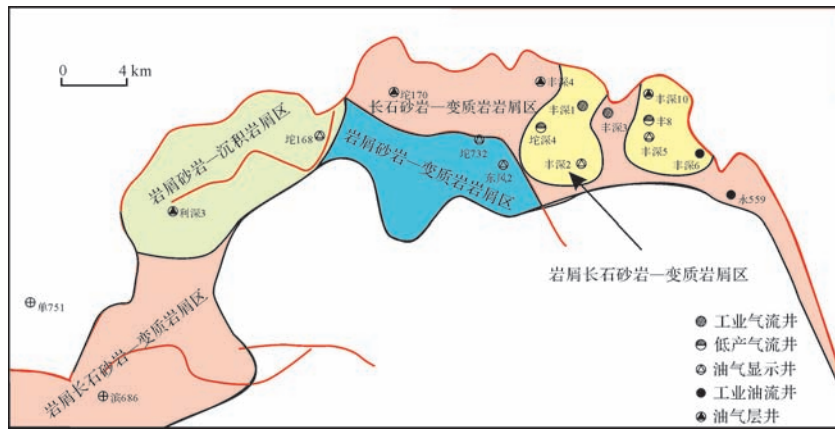


图6 东营凹陷北部陡坡带沙四下亚段致密砂砾岩岩石类型—骨架矿物分区图

Fig.6 Rock type and matrix mineral distribution regions of Es_{4x} tight glutenite in the north of Dongying sag

表1 东营北带沙四下亚段致密砂砾岩测井响应特征

Table 1 Logging response characteristics of tight glutenite in north of Dongying sag

岩性(按粒度分)	AC/(μs/ft)	CNL/%	DEN/(g/cm ³)	ΔGR	lgRt
砾岩(包括含砂砾岩)	49.4-61.1	1.6-8.0	2.59-2.76	0-0.81	1.13-3.99
	54.3	4.9	2.67	0.45	2.51
砂质砾岩	52.8-58.4	4.0-9.0	2.58-2.72	0.31-0.63	1.27-2.15
	55.1	5.7	2.65	0.43	1.92
砾质砂岩	54.5-59.4	4.1-13.9	2.56-2.67	0.33-0.61	1.29-1.75
	57.1	7.3	2.61	0.46	1.57
含砾砂岩	49.5-63.0	1.5-17.2	2.53-2.74	0.24-0.68	1.12-2.50
	56.7	7.4	2.65	0.44	1.80
砂岩	47.6-84.0	0.5-13.6	2.49-2.77	0.18-0.77	1.09-2.50
	57.8	6.1	2.63	0.43	1.73

注:ΔGR=(GR-GR_{min})/(GR_{max}-GR_{min}),GR为自然伽马读值,API;GR_{max}为自然伽马最大值,API;GR_{min}为自然伽马最小值,API。

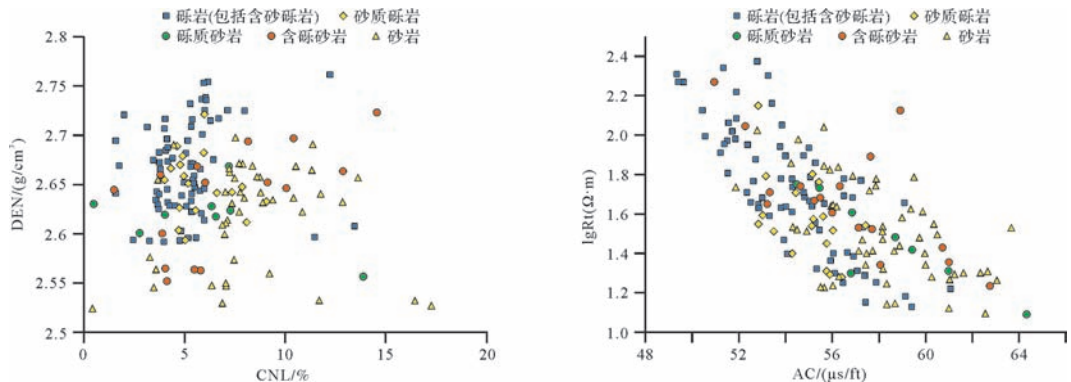


图7 东营北带沙四下亚段致密砂砾岩 DEN-CNL、AC-IgRt 交会图

Fig.7 DEN-CNL, AC-IgRt cross plot of Es_{4x} tight glutenite in the north of Dongying sag

性的测井曲线进行尺度缩减,利用提取的主成分开展交会分析。

本文首先利用趋势面法对测井曲线进行预处理^[20],再利用主成分分析法将 AC、CNL、DEN、ΔGR、lgRt 五条测井曲线进行尺度缩减^[21],以主成分累计方差百分比大于 80% 为准,提取主成分。由表 2 可

知,主成分 F₁ 特征值为 2.585,能够解释原有五个变量的 51.694%,主成分 F₂ 特征值为 1.002,能够解释总变量的 20.036%,F₃ 特征值 0.809,能够解释总变量的 16.173%,选用这 3 个变量就能表征原先 5 条变量的 87.903%。

值得注意的是表2中自变量解释能力是曲线标

表2 主成分分析结果

Table 2 Principal component analysis result

成分	初始特征值			自变量解释能力(标准化后)				
	特征值	方差/%	累计方差/%	AC	CNL	DEN	Δ GR	lgRt
F ₁	2.585	51.694	51.694	-0.828	0.855	0.906	0.274	-0.521
F ₂	1.002	20.036	71.730	0.166	-0.182	-0.161	0.878	-0.381
F ₃	0.809	16.173	87.903	0.060	0.115	0.264	0.389	0.756
F ₄	0.458	9.157	97.060					
F ₅	0.147	2.940	100.00					

准化之后的系数,要得到原始系数需要将标准化数据与原数据关系代入公式,便得到每个主成分的表达式(见式1):

$$F_1 = -11.222DEN + 0.187CNL + 0.0996AC + 1.928\Delta GR - 1.149lgRt + 23.477$$

$$F_2 = 2.250DEN - 0.0399CNL - 0.0177AC + 6.179\Delta GR - 0.840lgRt - 5.95$$

$$F_3 = 0.813DEN + 0.0252CNL + 0.0290AC + 2.737\Delta GR + 1.668lgRt - 7.982$$

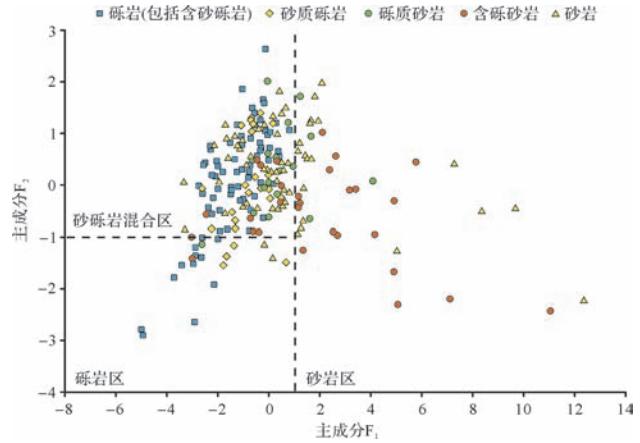
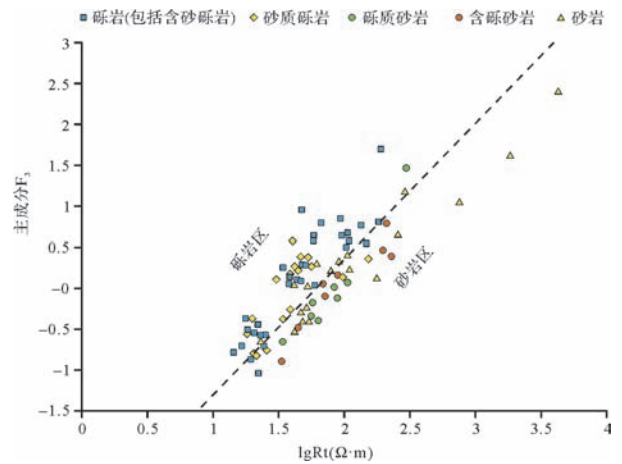
$$\begin{cases} F_1 = 0.15AC + 0.13CNL - 7.85DEN + 1.95\Delta GR - 1.31lgRt \\ F_2 = 0.02AC + 0.24CNL + 3.65DEN - 5.36\Delta GR - 0.02lgRt \\ F_3 = -0.01AC + 0.15CNL + 13.98DEN + 4.04\Delta GR - 0.03lgRt \end{cases}$$

(式1)

式中:AC为声波时差, μ s/ft;CNL为补偿中子孔隙度,%;DEN为体积密度, g/cm^3 ;lgRt为原状地层电阻率以10为底的对数, $\Omega \cdot m$ 。

从式1中可以看出,对五条曲线解释能力51.694%的F₁变量与电阻率对数、密度呈反比,与声波时差和中子孔隙度成正比,这与岩石的孔隙度、渗透率的测井相应特征是一致的,可以表征孔隙,F₂与中子孔隙度、声波时差反比,与密度成正比,这与F₁恰好相反,可以表征岩石骨架,F₃的地质意义不明确。

从F₁-F₂交汇图可以看出,不同岩性分布呈现明显的分区特点,当F₁>1时主要为砂岩和含砾砂岩,少量的砾质砂岩,当F₁≤1且F₂≤-1时主要发育砾岩和砂质砾岩,但在F₁≤1且F₂>-1时,各类岩性之间区分度较差(图8)。为识别这一部分岩性,我们将F₁≤1且F₂>-1的样品进行进一步交会分析,通过分析发现,利用主成分F₃-lgRt可以有效划分砂岩和砾岩,并建立了岩性识别参数F,计算公式见式2,当F>0时判断岩性为砾岩,F<0为砂岩(图9)。

图8 F₁-F₂交汇图关系图Fig.8 F₁-F₂ cross plot图9 F₃-lgRt 交汇图(F₁≤1且F₂>-1时)Fig.9 F₃-lgRt cross plot(F₁≤1 & F₂>-1)

$$F = F_3 - 1.667 lgRt + 3 \quad (\text{式2})$$

在分清了砂岩和砾岩的基础上,利用 Δ GR可以有效区分岩石骨架类型^[22]。前文已述,研究区的砾岩按照骨架成分又可以分为母岩为太古界二长花岗岩、片麻岩、伟晶岩的变质型砾岩和母岩为古生界碳酸盐岩的沉积型砾岩,前者由于富含高放射性矿物,其 Δ GR大于0.4,后者 Δ GR小于0.4(图10左);砂岩

按照骨架成分可以分为变质型长石砂岩和沉积型岩屑砂岩两类,前者以变质型岩屑为主,因此 ΔGR 高于后者(图 10 右)。

利用上述方法,首先开展主成分分析,利用 F_1 - F_2 交会图和 F_3 - $\lg Rt$ 交会图区分砂岩和砾岩,然后可以利用 ΔGR 区分骨架矿物类型。利用该方法对研究区丰深 1、丰 8、利深 3 等 15 口井进行了测井岩性识别,然后将识别结果与 253 个薄片鉴定结果相印证,发现岩性识别准确率可达 74.5%(表 3)。

2.3 孔隙度解释模型

利用多元回归的方法,将 ΔGR 、 AC 、 DEN 、 CNL 、 $LgRt$ 与孔隙度之间建立相关关系,优选相关系数最大的回归公式作为孔隙度解释模型(图 11)。

各类岩性的孔隙度解释模型如下:

变质型砾岩: $\phi = 7.0826 \times 10^{-10} e^{-8.998DEN} (R^2 = 0.72)$

沉积型砾岩: $\phi = 2.194 \times 10^{-6} DEN^{-13.55} (R^2 = 0.69)$

变质型长石砂岩: $\phi = 44.29 - 0.17CNL - 8.24\Delta GR - 13.51DEN + 0.38\lg Rt (R^2 = 0.82)$

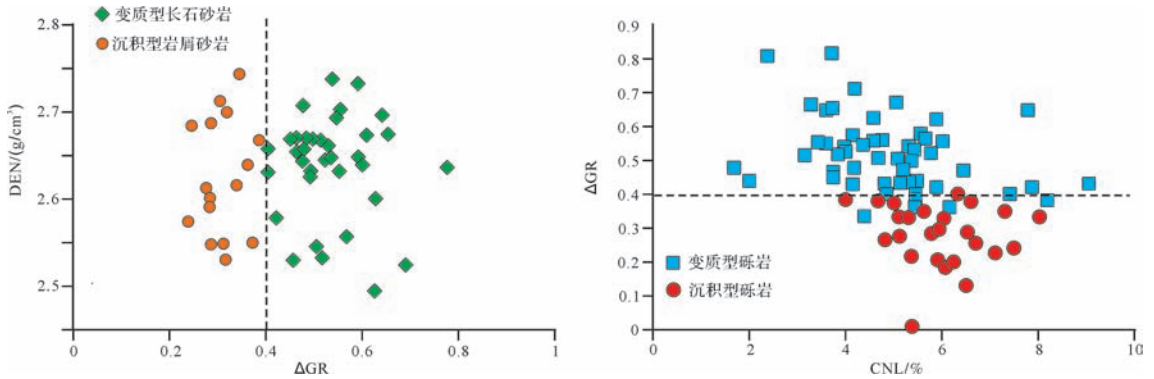


图 10 利用 ΔGR 识别砂岩、砾岩骨架矿物

Fig.10 Recongnition of matrix mineral in sandstone and conglomerate with ΔGR

表 3 丰深 2、丰深 3 井测井识别岩性与薄片鉴定岩性对比表

Table 3 Lithologic comparison between logging identification and thin section determination results from wells Fengshen2 and Fengshen3

井名	深度 /m	岩屑组成(100%)			测井识别参数				薄片定名	岩石分类	判别准确
		沉积岩 /%	变质岩 /%	岩浆岩 /%	F_1	F_2	F_3	F			
丰深 2	5 542.5	50.0	40.0	10.0	3.08	-0.08	-2.55	0.45	碳酸盐质粉砂岩	沉积型岩屑砂岩	√
丰深 2	5 544.05				0.61	0.74	-3.02	-0.02	碳酸盐质极细粒岩屑长石砂岩	沉积型岩屑砂岩	√
丰深 2	5 544.75				0.79	0.20	-3.20	-0.20	砾岩	沉积型岩屑砂岩	×
丰深 2	5 545.56	88.0	12.0	0.0	0.03	0.15	-3.42	-0.42	碳酸盐质细粒岩屑长石砂岩	沉积型岩屑砂岩	√
丰深 2	5 580.7	85.7	8.6	5.7	0.20	0.38	-3.30	-0.30	碳酸盐质不等粒长石岩屑砂岩	沉积型岩屑砂岩	√
丰深 2	5 582.23	83.3	10.0	6.7	0.53	0.26	-3.27	-0.27	含白云质细粒岩屑长石砂岩	沉积型岩屑砂岩	√
丰深 2	5 583.2	84.8	9.1	6.1	1.73	0.30	-2.95	0.05	含铁白云质不等粒长石岩屑砂岩	沉积型岩屑砂岩	√
丰深 2	5 648.94				0.91	0.49	-3.47	-0.47	碳酸盐质砾石	沉积型岩屑砂岩	×
丰深 2	5 646.86	80.0	12.0	8.0	2.28	0.72	-3.05	-0.05	含灰质中岩屑长石砂岩	沉积型岩屑砂岩	√
丰深 2	5 648.51	71.4	28.6	0.0	1.84	0.78	-3.12	-0.12	碳酸盐质砂质砾岩	沉积型岩屑砂岩	×
丰深 3	4 767.55	12.0	84.0	4.0	1.14	-0.22	-0.60	0.30	含砾白云质不等粒岩屑长石砂岩	变质型长石砂岩	√
丰深 3	4 767.95	31.0	64.3	4.8	0.47	-0.41	-0.53	-0.07	含白云质巨粒岩屑长石砂岩	变质型长石砂岩	√
丰深 3	4 768.03	0.0	87.5	12.5	0.47	-0.41	-0.53	-0.07	砾质不等粒岩屑长石砂岩	变质型长石砂岩	√
丰深 3	4 768.51	47.5	40.0	12.5	0.63	-0.13	-0.47	0.28	粗粒长石岩屑砂岩	沉积型砾岩	×
丰深 3	4 769.17	33.3	62.2	4.4	1.16	-0.94	-0.84	0.15	表鲕状不等粒岩屑长石砂岩	变质型长石砂岩	√
丰深 3	4 769.9				-0.02	-0.64	-0.70	0.00	砾质不等粒岩屑长石砂岩	变质型长石砂岩	√
丰深 3	4 770.14	76.9	18.5	4.6	0.18	-0.45	-0.70	-0.07	含泥质不等粒岩屑长石砂岩	变质型长石砂岩	√
丰深 3	4 771.17				1.18	-0.37	-0.66	0.24	含砾不等粒岩屑长石砂岩	变质型长石砂岩	√
丰深 3	4 786.82				1.60	-0.66	-0.88	-0.16	砾质不等粒岩屑长石砂岩	变质型长石砂岩	√
丰深 3	4 866.62				1.93	1.23	-0.14	0.59	含泥质不等粒岩屑长石砂岩	变质型长石砂岩	√
丰深 3	4 867.6				1.85	1.73	0.03	0.86	中粒岩屑长石砂岩	变质型长石砂岩	√

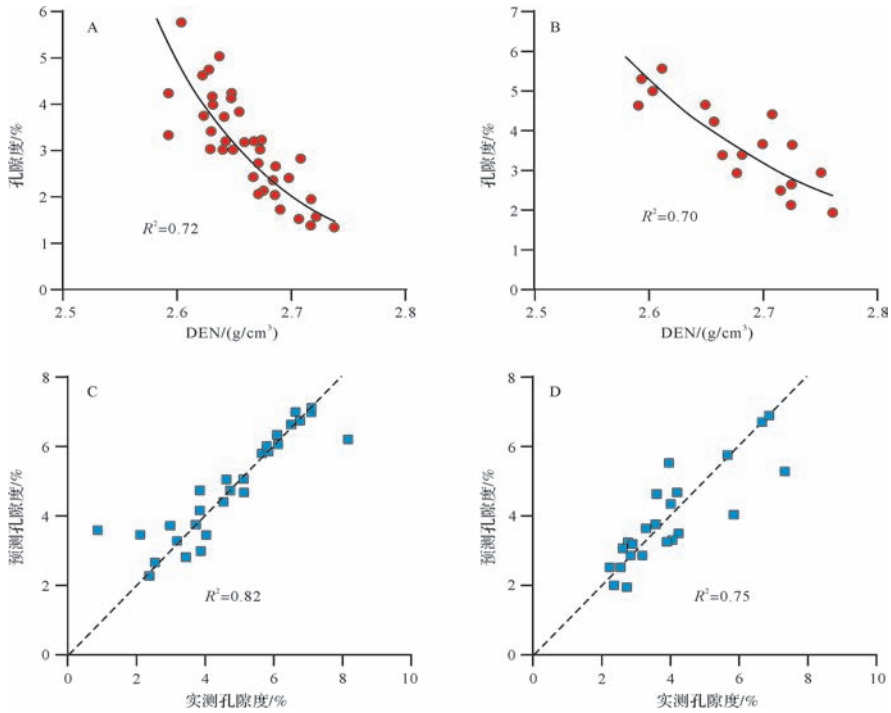
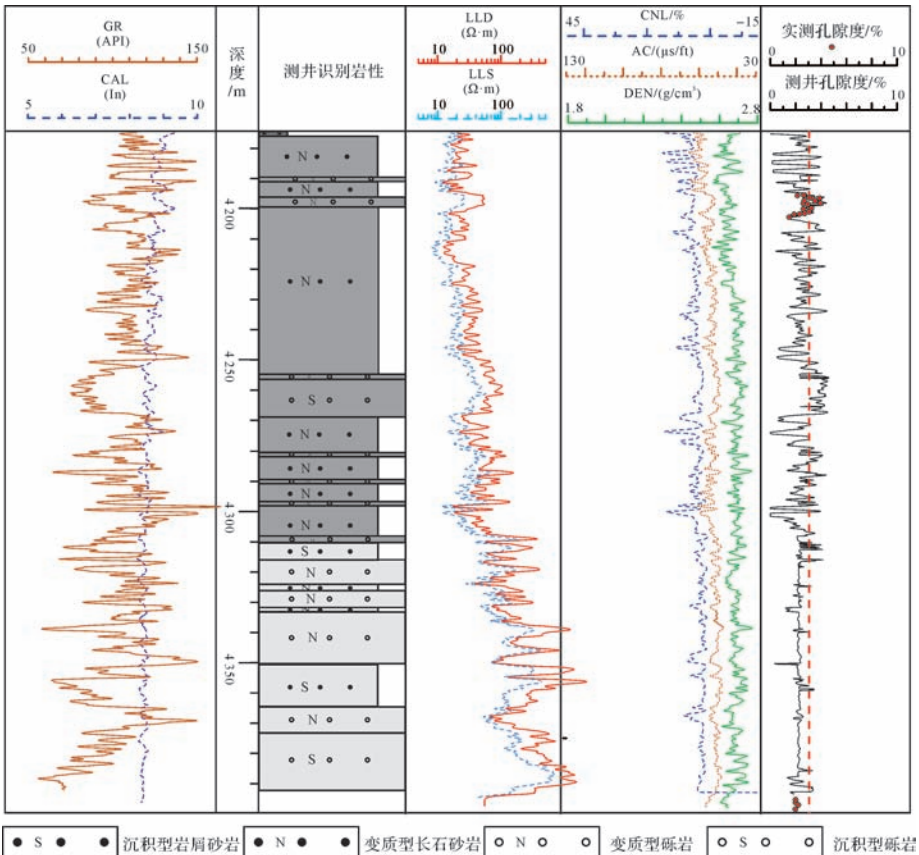


图 11 不同岩性孔隙度解释模型

1. 变质型砾岩; B. 沉积型砾岩; C. 变质型长石砂岩; D. 沉积型岩屑砂岩

Fig.11 Porosity interpretation model of different rock types



注:图中岩石填充颜色(灰黑色、灰白色)来自录井资料

图 12 丰 8 井沙四下亚段砂砾岩储层评价图

Fig.12 Es_{4x} tight glutenite reservoir evaluation chart of Well Feng 8

沉积型岩屑砂岩: $\phi = 22.75 + 0.25AC - 0.18CNL - 8.96\Delta GR - 11.45DEN + 1.76\lg Rt$ ($R^2 = 0.75$)

由图 11 中可知,建立的孔隙度解释模型复相关系数 R^2 都超过了 0.7。利用本文第 2 部分所述测井方法,对东营凹陷北带 15 口井砂砾岩储层进行评价(图 12),测井评价孔隙度与实测孔隙度差值小于 1.5% 的样品个数占样品个数的 79.5%,较之前的 61.8% 大幅提升,测井解释精度提高。

3 结论

砂砾岩岩性多样、骨架矿物变化复杂,利用传统方法难以识别骨架及岩性,影响了测井孔隙度评价准确性。本文在对东营凹陷北部陡坡带沙四下亚段砂砾岩岩石学特征分析的基础上,将研究区砂砾岩划分为变质型砾岩、沉积型砾岩、变质型长石砂岩、沉积型岩屑砂岩四类,然后利用薄片分析资料对岩性进行精细标定,在岩性标定基础上建立了基于主成分分析法的砂砾岩岩性识别方法,将与岩性有关的 AC、CNL、DEN、 ΔGR 、 $\lg Rt$ 五条测井曲线进行尺度缩减,构建了主成分识别参数 F_1 、 F_2 、 F_3 ,然后通过逐步交会分析,有效识别砂砾岩岩性。在岩性识别的基础上,利用多元线性回归的方法构建了测井孔隙度评价模型,提高了测井孔隙度评价精度。

参考文献 (References)

- 李丕龙,金之钧,张善文,等. 济阳拗陷油气勘探现状及主要研究进展[J]. 石油勘探与开发,2003,30(3):1-4. [Li Pilong, Jin Zhijun, Zhang Shanwen, et al. The present research status and progress of petroleum exploration in the Jiyang depression[J]. Petroleum Exploration and Development, 2003, 30(3): 1-4.]
- 冯子辉,印长海,陆加敏,等. 致密砂砾岩气形成主控因素与富集规律——以松辽盆地徐家围子断陷下白垩统营城组为例[J]. 石油勘探与开发,2013,40(6):650-656. [Feng Zihui, Yin Changhai, Lu Jiamin, et al. Formation and accumulation of tight sandy conglomerate gas: A case from the Lower Cretaceous Yingcheng Formation of Xujia-weizi fault depression, Songliao Basin[J]. Petroleum Exploration and Development, 2013, 40(6): 650-656.]
- 柳成志,霍广君,张冬玲. 辽河盆地西部凹陷冷家油田沙三段扇三角洲—湖底扇沉积模式[J]. 大庆石油学院学报,1999,23(1):1-4. [Liu Chengzhi, Huo Guangjun, Zhang Dongling. Fan-Delta-Sub-lacustrine Fan sedimentary models of S_3 member in Lengjia oilfield in Liaohe Basin[J]. Journal of Daqing Petroleum Institute, 1999, 23(1): 1-4.]
- 邵维志,梁巧峰,盛兰敏,等. 大港油田滩海地区中生界砂砾岩储层识别方法研究[J]. 国外测井技术,2004,19(4):38-40. [Shao Weizhi, Liang Qiaofeng, Sheng Lanmin, et al. Study on the recognition

method of Mesozoic glutenite reservoir in tidal zone and shallow water area of Dagang oilfield[J]. World Well Logging Technology, 2004, 19(4): 38-40.]

- 操应长,马奔奔,王艳忠,等. 东营凹陷盐家地区沙四上亚段近岸水下扇砂砾岩颗粒结构特征[J]. 天然气地球科学,2014,25(6):793-803. [Cao Yingchang, Ma Benben, Wang Yanzhong, et al. The particle texture characteristics of sandy conglomerate in the nearshore subaqueous fan of upper Es_4 in the Yanjia area, Dongying depression[J]. Natural Gas Geoscience, 2014, 25(6): 793-803.]
- 彭传圣,王永诗,常国贞,等. 罗家地区砂砾岩储集层地球物理预测技术[J]. 油气地质与采收率,2001,8(2):36-38. [Peng Chuansheng, Wang Yongshi, Chang Guozhen, et al. Geophysical forecasting technology for glutenite reservoir in Luoia area[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2001, 8(2): 36-38.]
- 王金铎,许淑梅,季建清,等. 车镇凹陷北部陡坡带砂砾岩体识别与储层物性预测[J]. 海洋地质与第四纪地质,2008,28(2):93-98. [Wang Jinduo, Xu Shumei, Ji Jianqing, et al. Recognition of sand-gravel body and forecasting its petroleum-bearing feature in northern steep slope of Chezhen sag[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2008, 28(2): 93-98.]
- 管灵,王顺华,张枝焕,等. 砂砾岩储层研究现状[J]. 长江大学学报:自然科学版,2011,8(3):63-66. [Zan Ling, Wang Shunhua, Zhang Zhihuan, et al. Research status of sandy conglomerates reservoir[J]. Journal of Yangtze University: Natural Science Edition, 2011, 8(3): 63-66.]
- 魏芬. 砂砾岩储层测井解释方法研究——以排 2 井区为例[D]. 武汉:长江大学,2012:3-5. [Wei Fen. Study of logging interpretation in glutenite reservoir-Taking Well pai2 area for example [D]. Wuhan: Yangtze University, 2012: 3-5.]
- 刘华,蒋有录,徐浩清,等. 东营凹陷民丰地区深层裂解气藏成因类型与成藏模式[J]. 吉林大学学报:地球科学版,2012,42(6):1638-1646. [Liu Hua, Jiang Youlu, Xu Haoqing, et al. Genetic types and accumulation model of the deep cracked gas pools of Minfeng area in Dongying sag[J]. Journal of Jilin University: Earth Science Edition, 2012, 42(6): 1638-1646.]
- 高阳. 东营凹陷北部沙四段下亚段盐湖相烃源岩特征及展布[J]. 油气地质与采收率,2014,21(1):10-15. [Gao Yang. Characteristics and distribution of salt lake source rocks from lower submember of 4th member of Shahejie Formation, north Dongying depression[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2014, 21(1): 10-15.]
- 宋国奇,蒋有录,刘华,等. 东营凹陷利津—民丰地区中深层裂解气成藏史[J]. 天然气工业,2009,29(4):14-17,38. [Song Guoqi, Jiang Youlu, Liu Hua, et al. Pooling history of cracked gas in middle-deep reservoirs in Lijin-Minfeng areas of the Dongying sag[J]. Natural Gas Industry, 2009, 29(4): 14-17, 38.]
- 鄢继华,陈世悦,姜在兴. 东营凹陷北部陡坡带近岸水下扇沉积特征[J]. 石油大学学报:自然科学版,2005,29(1):12-16,17. [Yan Jihua, Chen Shiyue, Jiang Zaixing. Sedimentary characteristics of nearshore subaqueous fans in steep slope of Dongying depression[J]. Journal of the University of Petroleum, China, 2005, 29(1): 12-16, 17.]

- 14 鲁国明. 东营凹陷深层砂砾岩岩性测井综合识别技术[J]. 测井技术, 2010, 34(2): 168-171. [Lu Guoming. Logging comprehensive identification technology of deep sandy conglomerate lithology, Dongying Sag[J]. Well Logging Technology, 2010, 34(2): 168-171.]
- 15 闫建平, 蔡进功, 赵铭海, 等. 考虑岩石结构的砂砾岩有效储层测井判别方法[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2011, 39(9): 1365-1372. [Yan Jianping, Cai Jingong, Zhao Minghai, et al. Identification method of effective reservoir for glutenite body using well logging base on rock texture[J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2011, 39(9): 1365-1372.]
- 16 申本科, 赵红兵, 崔文富, 等. 砂砾岩储层测井评价研究[J]. 地球物理学进展, 2012, 27(3): 1051-1058. [Shen Benke, Zhao Hongbing, Cui Wenfu, et al. Sandy conglomerate reservoir logging evaluation study[J]. Progress in Geophysics, 2012, 27(3): 1051-1058.]
- 17 张丽艳. 砂砾岩储层孔隙度和渗透率预测方法[J]. 测井技术, 2005, 29(3): 212-215. [Zhang Liyan. Porosity and permeability predictions in sand-conglomerate reservoir from conventional well logs [J]. Well Logging Technology, 2005, 29(3): 212-215.]
- 18 陈钢花, 张孝珍, 吴素英, 等. 特低渗砂砾岩储层的测井评价[J]. 石油物探, 2009, 48(4): 412-416. [Chen Ganghua, Zhang Xiaozhen, Wu Suying, et al. Logging evaluation of low-permeability glutenite reservoir[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2009, 48(4): 412-416.]
- 19 Lee S H, Kharghoria A, Datta-Gupta A. Electrofacies characterization and permeability predictions in complex reservoirs[J]. SPE Reservoir Evaluation & Engineering, 2002, 5(3): 237-248.
- 20 王莹莹, 孙莉莉, 王志章. 测井资料趋势面分析法标准化流程建立[J]. 油气地球物理, 2010, 8(4): 5-8. [Wang Yingying, Sun Lili, Wang Zhizhang. The establishment of the trend surface analysis normalization flow chart for logging data [J]. Petroleum Geophysics, 2010, 8(4): 5-8.]
- 21 刘爱疆, 左烈, 李景景, 等. 主成分分析法在碳酸盐岩岩性识别中的应用——以 YH 地区寒武系碳酸盐岩储层为例[J]. 石油与天然气地质, 2013, 34(2): 192-196. [Liu Aijiang, Zuo Lie, Li Jingjing, et al. Application of principal component analysis in carbonate lithology identification: A case study of the Cambrian carbonate reservoir in YH field[J]. Oil & Gas Geology, 2013, 34(2): 192-196.]
- 22 李建红, 周伦先. 东营凹陷砂砾岩自然伽马测井响应特征研究及应用[J]. 石油天然气学报(江汉石油学院学报), 2008, 30(1): 88-91. [Li Jianhong, Zhou Lunxian. Response features of gamma ray log and its application in glutenite of Dongying depression[J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2008, 30(1): 88-91.]

Logging Interpretation of Porosity for Tight Glutenite Based on Principal Component Analysis

GAO Yang LI ZhongXin

(Research Institute of Exploration and Development, Shengli Oilfield, Dongying, Shandong 257015, China)

Abstract: Lithology recognition is an important work in log evaluation of tight glutenite. Glutenite is characterized by diverse lithology and complex component. These factors always result in difficulty in lithology recognition and logging interpretation of porosity. In this article, take tight glutenite in the lower part of the 4_{th} member of Shahejie formation in steep-slope zone in north Dongying Sag as an example, based on petrologic characteristics, glutenite was classified according to different rock types and framework minerals. Rock thin sections were used to demarcate lithology in log curve, and log response for different lithology were extracted, then the author established lithology recognition method for tight sandstone based on principal component analysis, and finally established porosity evaluation method based on log curve for different lithology. Practice indicates that application of this method can increase accuracy both in lithology recognition and porosity prediction by a wide margin.

Key words: tight glutenite; log evaluation; principal component analysis; Dongying sag; porosity