

考虑岩石结构的砂砾岩有效储层测井判识方法

闫建平^{1,2}, 蔡进功¹, 赵铭海³, 李尊芝⁴

(1. 同济大学 海洋与地球科学学院, 上海 200092; 2. 西南石油大学 资源与环境学院, 四川 成都 610500;
3. 中石化胜利油田地质科学研究院, 山东 东营 257000; 4. 中石化胜利油田临盘地质研究所, 山东 临盘 251507)

摘要: 以东营凹陷盐家沙四上亚段砂砾岩体为研究对象, 通过岩心、试油及气测资料提取有效储层样本, 观察其岩心、薄片及成像测井图像特征, 发现有效储层在宏观和微观上都表现为岩石结构相对均匀、分选较好的含砾砂岩或砾状砂岩。数字岩心模拟也表明, 孔隙度相同, 但岩石结构不同, 电阻率响应差异较大, 因此, 判识储层的有效性应考虑区分岩石结构差异。实际资料处理中, 在测井曲线最优分层、测井相聚类判识岩性大类的基础上, 利用成像测井图像模式, 对岩性大类进行结构细分, 采用“岩石结构+电性下限”双重条件限定有效储层的思路, 建立多信息融合逐步判识有效储层的半定量方法, 并取得较好的应用效果。

关键词: 岩石结构; 砂砾岩; 成像测井; 测井相; 数字岩心
中图分类号: P 631.81 **文献标识码:** A

Identification Method of Effective Reservoir for Glutenite Body Using Well Logging Based on Rock Texture

YAN Jianping^{1,2}, CAI Jingong¹, ZHAO Minghai³, LI Zunzhi⁴

(1. College of Ocean and Earth Science, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. School of Resources and Environment, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China; 3. Institute of Geoscience of Shengli Oil Field Co. Ltd of SINOPEC, Dongying 257000, China; 4. Institute of Linpan Geology of Shengli Oil Field Co. Ltd of SINOPEC, Linpan 257015, China)

Abstract: This paper deals with the research on Yanjia region glutenite body of the upper Es4 in the northern steep slope zone of Dongying Depression. Effective reservoir samples are taken by core drilling, formation testing and gas logging data, and observing the relationship among the core, thin section and image logging, it is found that the effective reservoir appears as well sorted pebbly sandstone and conglomeratic sandstone in macroscale and microscale. The simulating of digital core also indicates that the difference of pore configuration which is derived from different rock textures is the major impact factor for electric resistivity response, so various rock textures should be well considered when identify the validity of reservoir using well logging. Therefore, during the data

processing, detailed identification of rock textures by image model of image logging, based on automatic layering of conventional logging curve and automatic identification of lithologic category by means of logging facies cluster method, is indispensable. With the newly double constrains of rock texture and lower limit of electrical property on effective reservoir, this semi-quantitative method is preliminarily proposed to be a preferable application for multi-information identification of effective reservoir.

Key words: rock texture; glutenite; image logging; logging facies; digital rock

随着油气勘探的逐步深入, 陆相断陷湖盆陡坡带发育的砂砾岩体隐藏油气藏, 已成为今后增储上产的重要勘探目标。东营凹陷是中国陆相断陷湖盆一典型代表。其北带具有沟梁相间的古地貌特征, 在古近纪时期, 坡度陡、物源近且构造活动强烈, 沿着不同构造部位发育了多种成因类型的砂砾岩体, 有冲积扇、扇三角洲、近岸水下扇、浊积扇等^[1]。盐家区块构造上处于东营北带东段盐 16 古冲沟和盐 18 古冲沟, 陈家庄凸起及陈南断层的南侧(图 1), 沙四上亚段沉积的砂砾岩体是陡坡带中一类重要的油气储集体。前人已对陡坡带砂砾岩体成藏动力学特征^[2]、储层物性演化及控制因素^[3]等进行了深入研究, 但由于砂砾岩体岩性种类多、成分及结构成熟度低, 电阻率响应受岩石骨架和孔隙结构影响严重, 反映储层孔隙流体性质的信息弱^[4], 大大降低了有效储层与无效层电阻率的反差, 使得有效储层判识成为测井研究面临的难题。目前, 砂砾岩体有效储层测井判识还是停留在制定“电性下限”上, 忽略了岩石骨架中砾石粒度、分选性即岩石结构对测井响应的影响, 判识结果往往和试油结论吻合不好, 给勘探开发造成严重损失。岩石结构对地震纵、横波速度的影响研究已取得了一些成果^[5], 但对电阻率响应的影响研究还不够深入。数字岩

收稿日期: 2010-12-05

基金项目: 国家自然科学基金(40872089); 河南省生物遗迹与成矿过程重点实验室基金(OTMP0902)

第一作者: 闫建平(1980—), 男, 讲师, 理学博士, 主要研究方向为测井地质学、岩石物理及储层地质学。E-mail: yanjp@tongji.edu.cn

通讯作者: 蔡进功(1961—), 男, 教授, 博士生导师, 理学博士, 主要研究方向为海洋沉积学与石油地质学。E-mail: jgcai@tongji.edu.cn

心作为岩石微观结构的一种数学抽象,是岩石物理数值模拟的有效手段^[6-7]. 笔者通过数字岩心模拟,分析因岩石结构不同产生的孔隙结构差异对电阻率响应的影响程度,为考虑对岩石结构信息进行有效储层测井判识提供了理论依据. 实际资料处理中,在测井曲线最优分层、测井相聚类^[8]判识岩性大类的基础上,利用成像测井图像模式对岩性大类进行结构细分,采用“岩石结构+电性下限”双重条件限定有效储层,建立多信息融合逐步判识有效储层的半定量方法,为后续准确计算储量及开发方案的实施奠定坚实的基础.

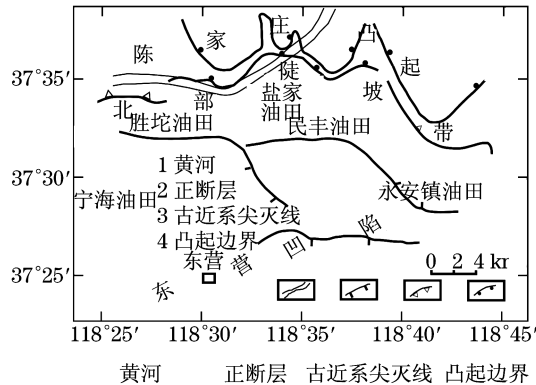


图 1 东营凹陷北带构造分区位置略图
Fig.1 Tectonic division figure of steep slope in Dongying sag

1 有效储层的岩石结构特征

有效储层指储集了烃类流体并在现有的工艺技术条件下可采出的物性下限以上部分. 该物性下限用能够储集和渗滤流体的最小孔隙度和最小渗透率来度量,通常用孔隙度和渗透率的某个确定值来表述^[9-10]. 利用关键取心井的岩心、试油及气测资料提取 28 个有效储层样本,分析其四性关系及特征,可知有效储层的电性下限为:声波时差 $c \geq 197 \mu\text{s} \cdot \text{m}^{-1}$,深侧向电阻率 $R_d \geq 18 \Omega \cdot \text{m}$;测井响应通常表现为:自然电位低,自然伽马值 G_R 不确定,中等声波时差、深侧向电阻率、补偿中子及感应电导率、微电极通常呈正幅度差异,一般显示低侵特征,测井响应干扰因素较多.

观察有效储层段岩心、岩石薄片及成像测井图像的特征,以直观的形式认识有效储层的岩石结构特征,发现有效储层在岩心和成像测井图像上都宏观显示为岩石结构相对均匀、分选较好的含砾砂岩或砾状砂岩、细砾岩,在岩石薄片图像上反映出有效储层基本为中粗粒岩屑长石砂岩,颗粒相对均匀,结构分选较好,孔隙及孔喉配位数较多,孔隙连通性也较好(图 2). 说明有效储层的判识应该区分岩石结构分选较差的类型.

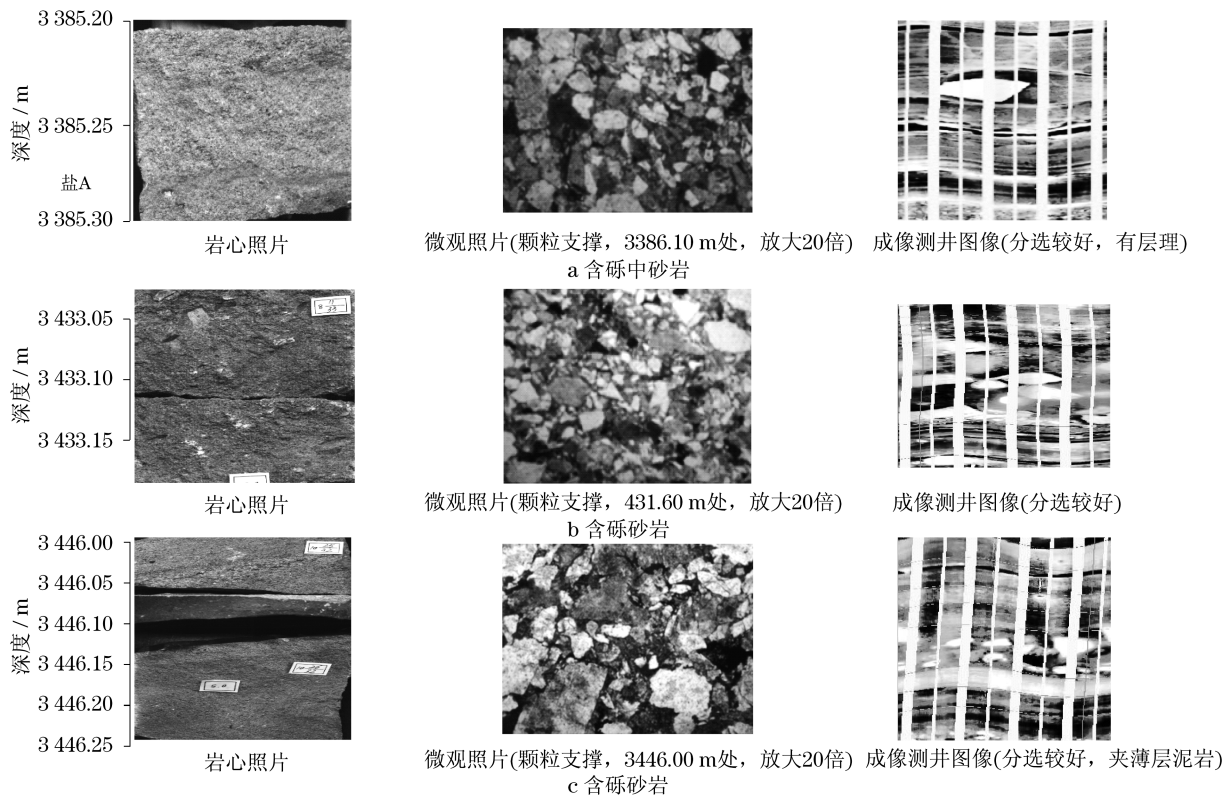


图 2 有效储层样本岩心-薄片-成像图像岩石结构特征
Fig.2 Rock texture characteristic of core-slice-image logging in effective reservoir

2 岩石结构对电阻率响应的影响

砂砾岩体储层中存在不同岩石结构类型的含砾砂岩和砾状砂岩,其中,含砾砂岩从岩心剖光图像和岩石铸体薄片上看都存在分选差、孔隙结构复杂的含砾质不等粒岩屑砂岩,和分选中等、孔隙连通性较好的含粗粒岩屑砂岩.以这两种不同岩石结构类型的含砾砂岩为基础,利用2维岩石铸体薄片反映的孔隙度、粒径分布、孔隙尺寸及孔隙连通性特征,分别建立其各自的3维数字岩心模型.

模型1孔隙度为11.78%(图3a),岩石骨架颗粒平均粒径为0.25 mm,最小和最大粒径分别为0.05 mm和0.60 mm,是岩石结构分选较差的类型;模型2孔隙度为11.97%(图3b),岩石骨架颗粒平均粒径为0.20 mm,最小和最大粒径分别为0.10 mm和0.40 mm,分选较好.对数字岩心的 x , y , z 方向进行三维切片,可直接观察数字岩心的内部结构.

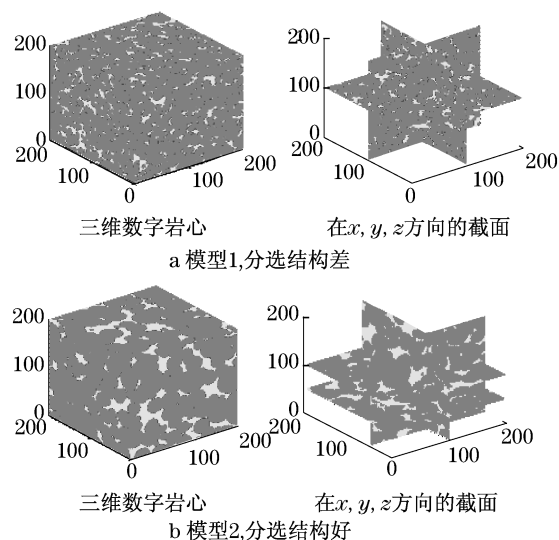


图3 重建分选结构好和差的三维岩心

Fig.3 Reconstruction of graded 3D nongraded and digital core

利用孔隙尺寸分布函数及局部孔隙度分布函数分析这两种不同岩石结构数字岩心的孔隙结构差异:①孔隙尺寸分布函数.在孔隙空间中任取一点,如果该点到最近骨架点的距离分布于 δ 到 $\delta + d\delta$ 之间的概率可用 $P(\delta)d\delta$ 表示,则 $P(\delta)$ 称为孔隙尺寸分布函数.它描述了岩心中任意孔隙点到岩石骨架不同距离的分布概率,反映孔隙空间的发育程度^[6,11].由测量所建立的两种不同岩石结构类型

数字岩心孔隙空间中所有点到岩石骨架的最短距离,并由图进行统计分析,即可得到各自的孔隙尺寸分布函数(图4).由图可见,两种不同岩石结构类型的数字岩心的孔隙尺寸分布函数差别较大,表明二者在孔隙形状和尺寸方面存在差别.模型1的平均孔隙尺寸小于模型2,孔隙形状不规则,孔隙连通性较差.②局部孔隙度分布函数.在多孔介质的内部,对小范围内的岩心孔隙度等物理量测量、统计分析,从而获取反映岩心微观结构特征的相关信息.定义 $K(\mathbf{r}, L)$ 为多孔介质内部以向量 $\mathbf{r}$ 末端为中心、边长为 L 的立方体,局部孔隙度就是通过对 $K(\mathbf{r}, L)$ 内孔隙度等物理量的测量、统计分析来研究孔隙介质的微观结构,局部孔隙度分布函数表征了岩心的均质程度及岩心孔隙的连通性.测量单元 $K(\mathbf{r}, L)$ 的孔隙度定义为

$$\phi(\mathbf{r}, L) = V[C \cap K(\mathbf{r}, L)] / V[K(\mathbf{r}, L)] \quad (1)$$

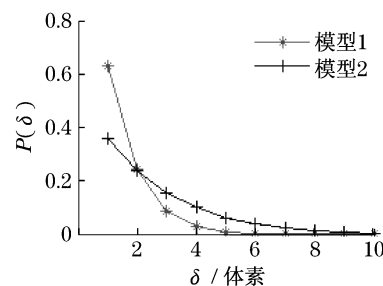


图4 孔隙尺寸分布函数

Fig.4 Pore size distribution function

式中: $V(G)$ 为某集合 $G \subset \mathbb{R}^d$ 的体积; C 表示孔隙空间.局部孔隙度分布函数定义如下:

$$U(\mathbf{r}, L) = \frac{1}{n} \sum_r [\phi - \phi(\mathbf{r}, L)] \quad (2)$$

式中: n 为系统中 $K(\mathbf{r}, L)$ 的个数; $\delta(x)$ 为狄拉克函数; $U(\mathbf{r}, L)$ 表示边长为 L 、孔隙度为 ϕ 的立方体所占的比例,反映 $K(\mathbf{r}, L)$ 的孔隙度分布概率.对于非均质性强的岩心, $U(\mathbf{r}, L)$ 分布在以岩心孔隙度为中心的较大范围内.当 L 为定值,局部孔隙度分布函数曲线开口越小,即曲线狄拉克分布特征越明显,岩心均质性越好^[11].分析表明,模型2的局部孔隙度分布函数近似集中在岩石薄片孔隙度的两边,且开口较小(图5),可知模型1的非均质性强于模型2.

复杂地层的电阻率增大系数 I 与含水饱和度 S_w 之间往往呈现非线性关系.饱和度指数 n 不是常数,而是一个受多种因素影响的变量.毛志强等定量分析塔里木盆地储集层岩石电阻率影响因素,研究表明,孔隙连通性、孔隙大小及孔喉半径比(即岩石孔

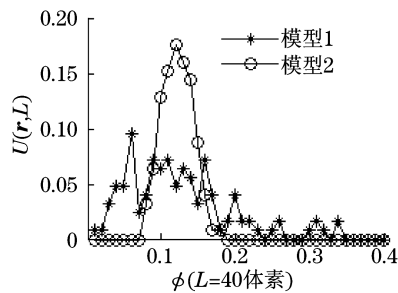


图 5 局部孔隙度分布函数
Fig.5 Local porosity distribution function

隙结构)的差别,是导致储集层电阻率测井响应复杂多变的主要因素^[12]. 鉴于砂砾岩体存在不同种类的岩石结构类型,采用重建的三维数字岩心模型,分析因岩石结构不同产生的微观因素差异性对含水电阻率响应及地层因素的影响. 模拟中,将岩石骨架电导率设定为零,地层水采用地层条件下(100 ℃)等效 NaCl 溶液质量分数 $6\,000 \times 10^{-6}$,电阻率 R_w 约为 $0.25\,\Omega \cdot \text{m}$,利用有限元方法^[13],数值模拟砂砾岩体两种不同岩石结构类型数字岩心的含水电阻率响应 R_0 、地层因素 F 、孔隙指数 m 及孔隙度 ϕ_{por} ,见表 1.

表 1 两种模型数字岩心电阻率响应及地层因素特征 Tab.1 Resistivity response and formation factor of the two models					
模型类型	$R_w/(\Omega \cdot \text{m})$	$R_0/(\Omega \cdot \text{m})$	F	m	$\phi_{\text{por}}/\%$
模型 1	0.25	52.893	211.57	2.504	11.78
模型 2	0.25	26.170	104.68	2.191	11.97

可以看出,模型 1 与 2 的孔隙度接近,但模型 1 含水电阻响应、地层因素及孔隙指数 m 值都大于模型 2. 说明砂砾岩体储层岩石结构类型不同,孔隙结构差异较大,由此产生的导电性差异也较大,使得岩石结构分选差的水层或无效储层的电阻率与岩石结构分选较好的有效储层电阻率差别较小. 岩石结构分选差,造成孔隙尺寸小、孔隙连通性差即孔隙结构复杂,掩盖了储层流体的电阻率响应,是加大测井判识有效储层难度的最主要影响因素. 因此,区分岩石结构的差异性,可提高有效储层测井判识的准确率.

3 成像测井图像细分岩石结构类型

地层微电阻率扫描成像测井(FMI)是为了解决非均质储层问题而发展起来的一种新测井方法,一次下井可采集 192 条微电阻率曲线^[14],其纵向分辨率及探测深度均为 5 mm(0.2 in)左右. 经过一系列

数据预处理后,形成彩色成像图,比以往的曲线表示方式更精确、更直观,使得测量结果拉近了与地层特征之间的“距离”,因而在揭示井周地层的岩性、岩石结构、沉积构造、韵律性等方面有很大的优势^[14-15]. 数字岩心研究表明,岩石结构类型不同,地层因素、电阻率差异较大. 目前的问题是含砾砂岩、砾状砂岩在岩石结构细分上还不能很好地判识,电性特征叠加在一起,不能有效地区分. 因此,考虑利用成像测井对岩石结构有较好的识别能力,建立砾状砂岩、含砾砂岩不同岩石结构的成像测井图像模式,将其和岩性大类判识的结论信息相融合,可实现岩性结构细分的较准确判识.

(1) 砾状砂岩 鉴于常规测井对中砾状(分选差)和细砾状(分选较好)砂岩不易判识的难点,将砾状砂岩在图像结构上归纳了两种图像模式(图 6),细砾状表现为砾径最大 10 mm,一般 2~3 mm,次棱角状-次圆状,分选较好;中砾状表现为砾径最大 25 mm,一般 10~20 mm,次棱角状-次圆状,分选较差.

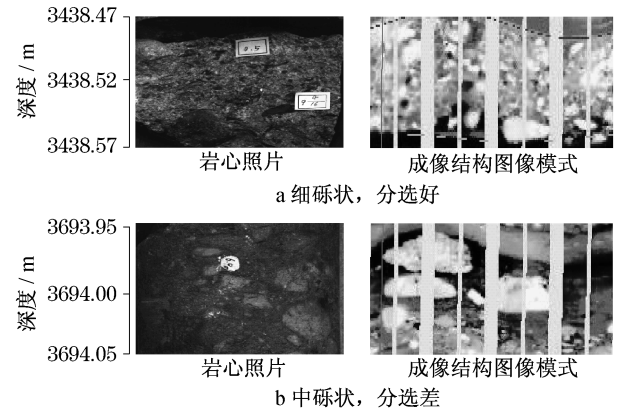


图 6 砾状砂岩岩石结构细分图像模式
Fig.6 Image model of rock structure for conglomeratic sandstone

(2) 含砾砂岩 在图像上归纳了 3 种图像模式(图 7),含细砾砂岩、含中砾砂岩及含中细砾泥质砂岩. 其中,含细砾砂岩表现为砾径最大 8 mm,一般 2~3 mm,次圆状,分选较好;含中砾砂岩表现为砾径最大 20 mm,次棱角状-次圆状,分选中等;含中细砾泥质砂岩表现为砾径最大 10 mm,次棱角状,泥质分布不均匀,呈斑块状分布,分选较差.

4 有效储层判识及应用效果分析

复杂砂砾岩体有效储层判识的干扰因素较多,按岩性细分岩石结构类型困难,且不同岩石结构类

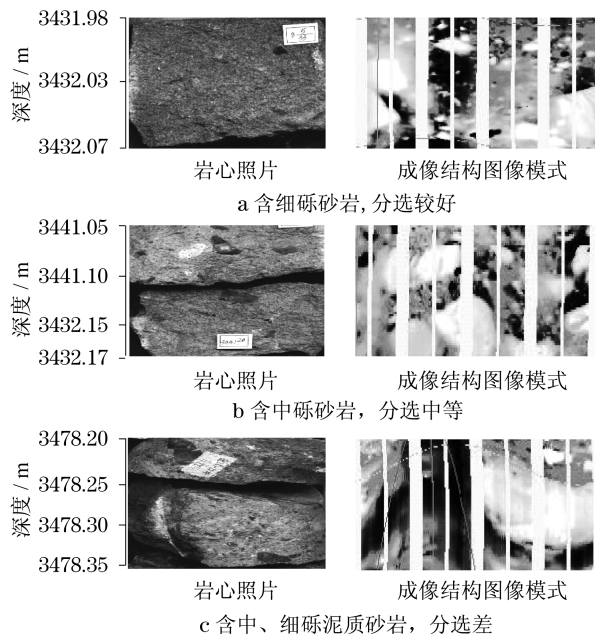


图 7 含砾砂岩岩石结构细分图像模式
Fig.7 Image model of rock structure for pebbly sandstone

型中有效储层的识别是测井评价又一大难题. 一般有效储层是利用“电性下限值”来划分,但是对于复杂岩性的砂砾岩体判识效果较差,因此,在测井曲线最优分层的基础上,采用测井相聚类分析方法判识岩性大类^[8],然后利用“电性下限 + 岩性大类”信息相结合判识有效储层. 在划分的 24 层有效储层中,经岩心物性、含油性及试油资料验证,有 9 层判识错误,判识率为 62.5%(图 12). 这种方法忽略了岩石骨架颗粒分选性即岩石结构对测井响应的影响,判识效果较差. 数字岩心模拟表明,不同岩石结构产生的孔隙结构差异对电阻率响应影响较大,不同岩石结

构类型的油、水、干层可能有相近的电性值,因此,砂砾岩体有效储层测井判识应考虑岩石结构信息.

(1) 判识思路 第一,利用测井相聚类分析判识岩性大类的结果,选择其中两种较敏感的测井曲线进行 2 维交会,在此基础上设立第三维坐标,可以选择另外一种敏感测井响应变量的平均值作为第三维信息,让叠加在一起的不同岩性分离出来,进一步提高岩性大类的判识率. 第二,在制作有效储层电性图版过程中,由于有效储层一般属于分选较好的岩石结构类型,如含砾砂岩中只有分选较好的含细中砾砂岩才能成为有效储层,单凭岩性大类判识结果和有效储层的电性下限二者信息的融合,仍旧不能准确地判识有效储层,给勘探开发造成一定的损失,需要在岩性大类判识的基础上再细分岩石结构类型. 因此,利用成像测井建立的不同岩石结构图像模式(图 6,7)对疑难岩性细分结构,让叠加在一起的不同岩石结构类型的岩性逐级分离出来,准确判识疑难岩性岩石结构;采用“岩石结构 + 电性下限”双重条件限定有效储层的思路,建立多信息融合逐步判识有效储层的半定量方法.

(2) 判识实例 通过统计测井相-岩相数据库中不同岩性的电性区间及平均值(表 2),可以看出,5 种岩性对应的 c (声波时差)、 ϕ_{cnl} (中子孔隙度)平均值不重叠且逐渐升高; R_d (深侧向电阻率)和 R_{msf} (微球形聚焦电阻率)平均值也不重叠且逐渐降低; E_{sp} (自然电位)和 ρ_{den} (密度)平均值有重叠且无规律. 因此,可将 ϕ_{cnl} 和 R_{msf} 的平均值作为第三维信息融合到测井相判识岩性结果的 R_d - c 交汇图版中.

表 2 不同岩性的电性区间及平均值统计
Tab.2 Electrical property interval of different lithology and the average value

岩 性	E_{sp}/mV		$c/(\mu\text{s} \cdot \text{m}^{-1})$		$R_d/(\Omega \cdot \text{m})$		$R_{\text{msf}}/(\Omega \cdot \text{m})$		$\rho_{\text{den}}/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$		$\phi_{\text{cnl}}/\%$	
	区间	平均	区间	平均	区间	平均	区间	平均	区间	平均	区间	平均
粗、中砾岩 (巨砾岩)	74~97	86	172~222	199	26~193	82	37~913	226	2.54~2.66	2.60	3.0~12.4	7.2
砾状砂岩	72~97	81	179~271	201	13~84	47	15~758	156	2.43~2.65	2.58	5.2~23.0	8.3
含砾砂岩、 细砾岩	71~96	82	189~276	220	12~65	28	7~243	47	2.29~2.62	2.55	4.7~20.5	10.9
粗、中砂岩	83~94	86	239~276	252	12~40	22	11~47	27	2.51~2.62	2.55	11.6~25.0	17.0
灰质、砂 质泥岩	82~98	94	230~318	267	7~32	15	6~81	23	2.24~2.60	2.50	7.6~30.0	18.2

以研究区盐 A 井为例,利用上述判识思路,将岩性大类测井相自动判识的结果在 R_d - c 二维信息交

汇的基础上,将不同岩性平均值的 ϕ_{cnl} 信息作为第 3 维信息融合到交汇图版中(图 8),可以看出,砾状砂

岩、含砾砂岩、砂岩有部分叠加在一起的点在三维空间分离了出来,岩性大类的判识准确率提升了 8.1%.

然后,对已判识出的砾状砂岩、含砾砂岩进行岩石结构类型细分.首先,将这 2 种已判识的岩性大类显示在三维空间(图 9),将建立的图像模式信息(图 10)加入三维空间;接着,依据建立的成像测井图像岩性结构细分模式(图 6,7),划分各岩性中不同岩石结构类型属于的模式,再投影到对应的三维空间模式面中,即可将岩性大类中不同岩石结构类型的数据点逐步分离出来(图 11),得到疑难岩性岩石结构细分判识结果(图 12).通过观察岩心及岩性描述资料验证,判识准确率为 89.5%.这种方法较大地提高了运用测井信息细分判识岩石结构类型的准确率.

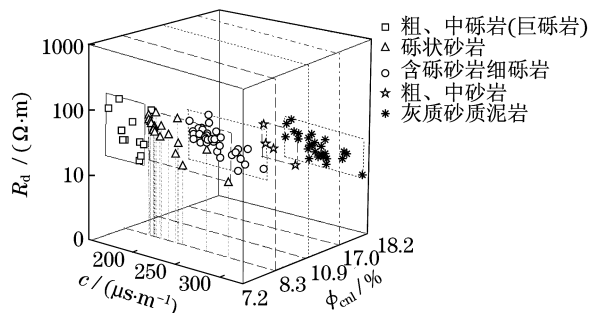


图 8 测井响应三维空间判识岩性大类
Fig.8 Lithology identification of 3D logging response

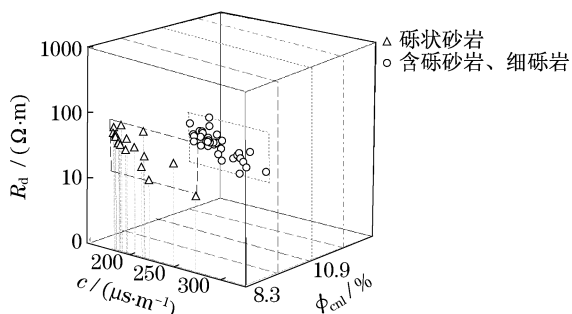


图 9 三维空间显示疑难岩性
Fig.9 Complex lithology show by 3D space

因为岩心、试油及气测资料显示的有效储层段岩性绝大部分为结构相对均匀、分选较好的含细砾砂岩、细(中)砾状砂岩(见图 2),因此,在实践中提出了利用“岩石结构+电性下限”双重条件限定有效储层的判识方法,对盐 A 井沙四上亚段判识有效储层(图 12).经岩心显示、试油资料验证,判识的 17 段有效储层中只有 3 层错误,判识准确率为 82.4%.

综合来看,由有效储层样本得到的电性下限是判识有效储层的基本条件.数字岩心模拟表明,砂砾岩体岩石结构不同,地层因素及电阻率差异较大.在测井相判识岩性大类的基础上,利用成像测井图像再细分岩石结构类型,与电性下限信息融合,可提高砂砾岩体有效储层判识的精度.

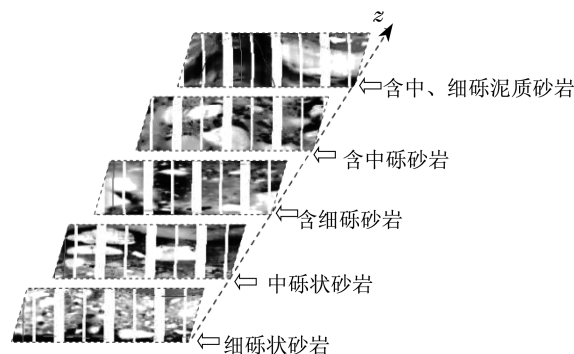


图 10 疑难岩性结构图像模式
Fig.10 Texture image model of complex lithology

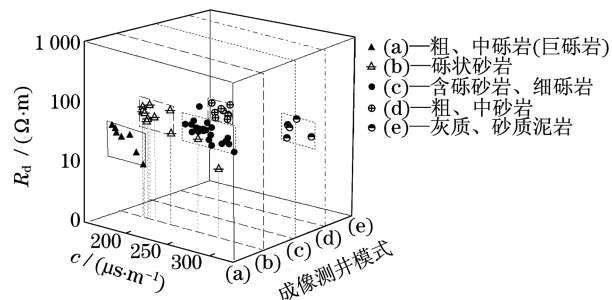


图 11 疑难岩性结构细分判识结果
Fig.11 Identification of rock texture with complex lithology

5 结论

(1) 有效储层在宏观和微观上都表现为岩石结构相对均匀、分选较好的含砾砂岩或砾状砂岩.

(2) 不同岩石结构产生的孔隙结构差异是影响地层因素及电阻率响应的主要因素.因此,区分岩石结构差异可提高有效储层的测井判识率.

(3) 电性下限是判识有效储层的基本条件,而岩石结构在判识过程中是不可忽视的最主要因素,因此,在测井相聚类判识岩性大类的基础上,利用成像测井图像模式细分岩石结构类型,与电性下限信息融合,可有效提高砂砾岩体有效储层的测井判识率.

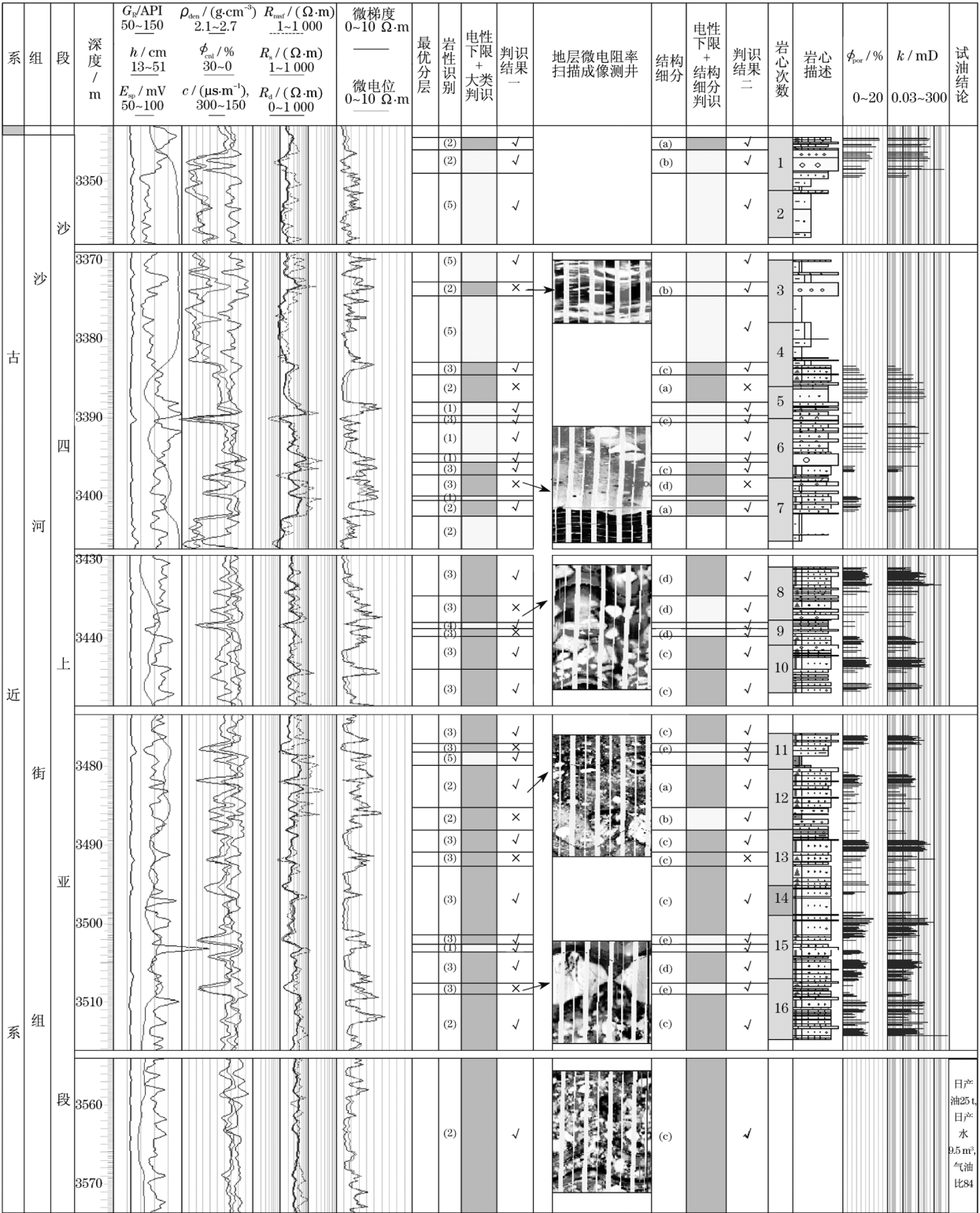


图 12 盐 A 井岩石结构及有效储层测井判识结果

Fig.12 Identification of rock texture and effective reservoir of Yan-A

参考文献:

- [1] 孔凡仙. 东营凹陷北部陡坡带砂砾岩体的勘探[J]. 石油地球物理勘探, 2000, 35(5): 669.
KONG Fanxian. Prospecting for sand-gravel body in northern steep slope of Dongying Depression [J]. Oil Geophysical Prospecting, 2000, 35(5): 669.
- [2] 隋风贵. 断陷湖盆陡坡带砂砾岩扇体成藏动力学特征[J]. 石油与天然气地质, 2003, 24(4): 335.
SUI Fenggui. Characteristics of reservoiring dynamic on the sand-conglomerate fan bodies in the steep slope belt of continental fault basin: a case study on Dongying Depression [J]. Oil & Gas Geology, 2003, 24(4): 335.
- [3] 安吉, 操应长, 王艳忠. 东营凹陷北带沙四段近岸水下扇砂砾岩储层物性演化特征[J]. 石油天然气学报, 2008, 30(6): 221.
AN Ji, CAO Yingchang, WANG Yanzhong. Characterization on physical property evolution of glutentite reservoir of Es4 offshore subsea apron in the northern region of Dongying Depression [J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2008, 30(6): 221.
- [4] 孙焕泉, 运华云, 侯庆功, 等. 胜利油区油气层测井响应特征[M]. 北京: 石油工业出版社, 2008.
SUN Huanquan, YUN Huayun, HOU Qinggong, et al. Log response characteristics of oil and gas-bearing zones in Shengli Oilfield [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2008.
- [5] 马中高. 成岩作用和岩石结构对砂岩弹性速度的影响[J]. 石油学报, 2008, 29(1): 58.
MA Zhonggao. Effects of diagenesis and rock texture on elastic velocity of sandstone [J]. Acta Petrolei Sinica, 2008, 29(1): 58.
- [6] 刘学峰, 孙建孟, 王海涛, 等. 顺序指示模拟重建三维数字岩心的准确性评价[J]. 石油学报, 2009, 30(3): 391.
LIU Xuefeng, SUN Jianmeng, WANG Haitao, et al. The accuracy evaluation on 3D digital cores reconstructed by sequence indicator simulation [J]. Acta Petrolei Sinica, 2009, 30(3): 391.
- [7] LIU Xuefeng, SUN Jianmeng, WANG Haitao. Reconstruction of 3-D digital cores using a hybrid method [J]. Applied Geophysics. 2009, 6(2): 105.
- [8] 李尊芝, 闫建平, 首祥云, 等. 辽河盆地杜229块复杂砂砾岩体稠油储层岩性识别方法研究[J]. 石油地质与工程, 2007, 21(3): 24.
LI Zunzhi, YAN Jianping, SHOU Xiangyun, et al. Lithologic identification research of complicated glutenite heavy oil reservoir of Du 229 block in Liaohe basin [J]. Petroleum Geology and Engineering, 2007, 21(3): 24.
- [9] 王艳忠, 操应长, 宋国奇, 等. 东营凹陷古近系深部碎屑岩有效储层物性下限的确定[J]. 中国石油大学学报: 自然科学版, 2009, 33(4): 16.
WANG Yanzhong, CAO Yingchang, SONG Guoqi, et al. Determination of physical property lower limit of deep clastic effective reservoirs of Paleogene in Dongying Depression [J]. Journal of China University of Petroleum: Natural Science, 2009, 33(4): 16.
- [10] 郭睿. 储集层物性下限值确定方法及其补充[J]. 石油勘探与开发, 2004, 31(5): 140.
GUO Rui. Supplement to determining method of cut-off value of net pay [J]. Petroleum Exploration and Development, 2004, 31(5): 140.
- [11] 姚军, 赵秀才, 衣艳静, 等. 储层岩石微观结构性质的分析方法[J]. 中国石油大学学报: 自然科学版, 2007, 31(1): 80.
YAO Jun, ZHAO Xiucui, YI Yanjing, et al. Analysis methods for reservoir rock's microstructure [J]. Journal of China University of Petroleum: Natural Science, 2007, 31(1): 80.
- [12] 毛志强, 高楚桥. 孔隙结构与含油岩石电阻率性质理论模拟研究[J]. 石油勘探与开发, 2000, 27(2): 87.
MAO Zhiqiang, GAO Chuqiao. Theoretical simulation of the resistivity and pore structure of hydrocarbon bearing rocks [J]. Petroleum Exploration and Development, 2000, 27(2): 87.
- [13] Garboczi E J. Finite element and finite difference programs for computing the linear electric and elastic properties of digital images of random materials [R] // National Institute of Standards and Technology Internal Report 6269. [s. l.]: Building and Fire Research Laboratory National Institute of Standard Technology Gaithersburg, 1998: 67-88.
- [14] 张占松, 朱留方, 陈莹, 等. FMI测井资料在砂砾岩沉积相研究中的应用[J]. 中国海上油气: 地质, 2003, 17(2): 136.
ZHANG Zhansong, ZHU Liufang, CHEN Ying, et al. An application of FMI data to glutenite sedimentary facies analysis in Dongying sag [J]. China Offshore Oil and Gas: Geology, 2003, 17(2): 136.
- [15] 张龙海, 代大经, 周明顺, 等. 成像测井资料在湖盆沉积研究中的应用[J]. 石油勘探与开发, 2006, 33(1): 67.
ZHANG Longhai, DAI Dajing, ZHOU Mingshun, et al. Application of imaging logs in studying lake basin sedimentations [J]. Petroleum Exploration and Development, 2006, 33(1): 67.