

# 测井成岩相自动识别及其在鄂尔多斯盆地 苏里格地区的应用

白 焱<sup>1</sup>, 薛林福<sup>1</sup>, 石玉江<sup>2</sup>, 潘保芝<sup>3</sup>, 张海涛<sup>2</sup>, 王建强<sup>1</sup>

(1. 吉林大学 地球科学学院, 吉林 长春 130026; 2. 中国石油长庆油田分公司 勘探开发研究院, 陕西 西安 710018;  
3. 吉林大学 地球探测科学与技术学院, 吉林 长春 130026)

**摘要:**以岩性作为测井特征提取及成岩相识别单元,排除岩性差异对测井信息影响,控制识别单元发育成岩相类型。利用黏土矿物含量比值反映孔隙流体酸碱性,提高判别结果的准确性。根据成岩相对孔缝演化作用的最终影响,定义测井成岩相,并利用基于贝叶斯最佳分类的概率神经网络,对比不同测井组合下神经网络对测井成岩相的识别能力。利用所提方法对鄂尔多斯盆地苏里格地区进行成岩相识别。结果表明,测井成岩相识别结果与实际取心鉴别结果的符合率为 81%,且识别的溶蚀相发育区域在实际试气中基本为气层及气水同层,无差气层存在。

**关键词:**油气储层; 岩性; 测井; 成岩相; 成岩作用; 概率神经网络; 黏土矿物

中图分类号:P 618.13

文献标志码:A

## An automatic identification method of log diagenetic facies and its application in Sulige area, Ordos Basin

BAI Ye<sup>1</sup>, XUE Lin-fu<sup>1</sup>, SHI Yu-jiang<sup>2</sup>, PAN Bao-zhi<sup>3</sup>, ZHANG Hai-tao<sup>2</sup>, WANG Jian-qiang<sup>1</sup>

(1. College of Earth Science, Jilin University, Changchun 130026, China;

2. Research Institute of Exploration & Development, Changqing Oilfield Company, PetroChina, Xi'an 710018, China;

3. College of Geoprospection Science and Technology, Jilin University, Changchun 130026, China)

**Abstract:** Lithology was used as a unit to extracting log feature and identifying diagenetic facies, which could remove the lithology influence on the well-logging informations and control the development types of diagenetic facies in the identification unit. The clay content ratio was used to reflect acidic or alkaline of pore fluid, and the identification accuracy of diagenetic facies was improved. Based on the final effect of diagenetic facies on the development of pore, the conception of log diagenetic facies was given. By using probabilistic neural network based on Bayes optimal classification, the identification ability of diagenetic facies with different logs was compared. The identification coincidence rate of log diagenetic facies is 81% by this method in He 8 section of Sulige area, Ordos Basin. And the gas test results are general gas reservoirs or gas and water reservoirs. The poor gas reservoirs barely exist in the area where corrosion facies develop widely.

**Key words:** petroleum reservoirs; lithology; well logging; diagenetic facies; diagenesis; probabilistic neural network; clay mineral

对深层砂岩油气藏地层,成岩作用产生的次生孔、裂隙是油气主要的储集空间和运移通道。成岩作用的类型和作用强度由于受到地层非均质性影响,变化较大。为了反应储集体经历多期次、多类型成岩作用改造后的最终状态, Railsback 在对碳酸盐成岩作

用研究时提出了成岩相的概念<sup>[1]</sup>。成岩相类别划分所参考的因素包括成岩环境、事件、代表性矿物及储集体形成微观结构等<sup>[2-9]</sup>,最终目的是为表述成岩相在储集体孔缝演化中所起的作用。现阶段对取心段地层成岩相研究主要采用薄片、铸体薄片及扫描电子

显微镜试验手段。未取心地层一般采用统计学方法和地球物理测井信息结合模式识别算法两种手段进行成岩相识别。统计法利用沉积微相与成岩相间对应关系,通过沉积微相展布规律推导成岩相空间分布<sup>[3,10-11]</sup>,但因沉积体骨架颗粒及孔隙流体性质的差异<sup>[12]</sup>,统计学方法分析结果精度较差。利用地球物理测井信息结合模式识别算法对成岩相类型进行划分时,由于成岩相测井特征表现复杂、多样<sup>[13-14]</sup>,常在多维数据空间同样难于有效区分,识别效率较低。笔者以岩性作为测井特征提取成岩相识别单元,排除岩性差异对测井信息影响,控制识别单元发育成岩相类型,并利用黏土矿物含量比值,反映孔隙流体酸碱性,以提高判别结果的准确性。

## 1 成岩相类型影响因素及测井成岩相

成岩相代表沉积物经历多次溶蚀、胶结和压实等成岩作用后,所呈现的一个最终状态<sup>[15]</sup>,因此判断储集体成岩作用类型是成岩相识别的基础。通过对取心成岩作用分析,影响成岩作用类型的主要因素为岩石骨架颗粒成分及孔隙流体性质影响。

### 1.1 岩石骨架颗粒成分

岩石骨架颗粒是成岩作用改造的主要目标,在相同流体介质情况下,不同成分颗粒能够产生的成岩作用类型具有差异性。以碎屑岩为例,其骨架颗粒一般为石英、长石和岩屑。在石英颗粒含量较高的石英砂岩中,由于石英的稳定性,因此成岩作用一般以硅质胶结为主,只有少量石英颗粒边缘发生溶蚀作用。而在岩屑砂岩、长石砂岩及其过渡岩性中,胶结作用常表现为硅质胶结、钙质胶结及黏土矿物充填等,溶蚀作用则可作用于长石、岩屑颗粒及胶结物。这类岩性成岩相类型具有多类别、多期次的特点。

### 1.2 孔隙流体性质

孔隙流体的酸碱性决定了成岩作用类型。酸性环境下、易产生溶蚀作用,但同时也易于  $\text{Si}^{2+}$  沉淀。当地层水向碱性过渡,成岩作用则以钙质胶结和黏土矿物沉淀为主<sup>[4]</sup>。为了定量反应孔隙流体酸碱性,引入黏土矿物比值  $R$ 。

黏土矿物为特定酸碱环境下形成的矿物。其中伊利石与绿泥石为重要继承性黏土矿物,伊利石在  $\text{K}^+/\text{H}^+$  比率较高的弱碱性环境中由蒙脱石转化而来,当碱性增强,且富含  $\text{Fe}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$  离子时高岭石逐渐过渡形成绿泥石<sup>[8,16-17]</sup>。通过对比伊利石与绿泥石质量分数的比值  $R$ ,进而反映孔隙流体特征, $R$  的计算公式如下:

$$R = (\omega_1 + \omega_{1/S}) / \omega_C \quad (1)$$

式中, $\omega_1$ 、 $\omega_{1/S}$ 、 $\omega_C$  分别为伊利石、伊/蒙混层和绿泥石的质量分数。

$R$  为高值时绿泥石含量少,孔隙流体偏中酸性,易于发生溶蚀作用。 $R$  值逐渐减小,绿泥石含量逐渐增加,流体向碱性环境过渡,成岩相过渡为碳酸盐胶结及自生黏土矿物充填孔隙等。

### 1.3 测井成岩相

国内外对成岩相的分类方法很多,包括单因素划分,例如表生淡水成岩相、碳酸盐胶结相、粒间溶蚀相等<sup>[24]</sup>;或多因素划分,例如同生-浅埋早期压实相、分支水道-细砾岩-中细喉相等<sup>[2]</sup>。这些对成岩相划分方法的最终目的是表述成岩相在储集体孔缝演化中所起作用。而测井成岩相是利用测井信息结合成岩相对孔缝作用的分类方法,分类准则是在一类岩石中,测井特征近似且对孔隙演化作用相同成岩相总和,一般可将其分为扩容相、破坏相和保护相。

## 2 测井成岩相的识别

### 2.1 识别方法

概率神经网络 (probabilistic neural network, PNN) 不仅具有神经网络的自适应性和非线性处理能力,同时模拟出的分类曲面也与贝叶斯最优准则下的曲面相接近<sup>[18-19]</sup>。PNN 将求取概率密度的 Parzen 窗函数应用于径向基神经网络中的激活函数部分,其输出层的值即为待测样本属于每种分类的后验概率。从统计学来看,PNN 从学习集中得到的未知样本分类结果错误风险最小。

利用概率神经网络进行样本分类时,影响分类结果的主要因素是学习样本的统计特征,这对学习集建立的合理性提出了较高的要求。以一个一维向量  $\mathbf{x}$  为例,PNN 第  $i$  个神经元的输出值  $Y_j$  计算过程为

$$Y_j = \sum_{k=1}^M w_{jk} H_k(\mathbf{x}), j = 1, 2, \dots, M, \quad (2)$$

$$H_k = \sum_{i=1}^n p_i(\|\mathbf{x} - \mathbf{c}_{ki}\|) \pi_i = \frac{k_i}{\sum_{j=1}^C k_j} \quad (3)$$

式中, $\mathbf{x}$  为一维输入向量; $H_k(\mathbf{x})$  为第二隐层第  $k$  单元的输出; $w_{jk}$  为第二隐层第  $k$  个神经元和输出层第  $j$  个神经元的连接权重; $p(\cdot)$  为 Parzen 窗口函数; $\mathbf{c}_{ki}$  为第一隐层的第  $k$  个类别的第  $i$  个隐中心矢量; $n_k$  为第一隐层第  $k$  个类别的隐层中心矢量数; $\|\cdot\|$  为欧几里德范数; $M$  为输出层神经元数目。

2.2 识别步骤

(1)利用薄片、铸体薄片和扫描电镜识别取心岩性和成岩作用,在对取心深度归位的基础上,提取相应深度测井数据和  $R$  值,对井径异常取样点进行排除后,进行数据标准化,建立成岩相测井数据库。

(2)提取不同岩性成岩相测井信息,针对每种岩性组成神经网络学习集。训练前随机提取学习集中 70% 作为学习样本,剩余 30% 数据作为检验样本。对已训练好的神经网络,利用检验样本测试不同测井组合识别的结果,以衡量不同曲线组合下对测井成岩相的识别准确性。

(3)利用最佳测井组合,对多口钻井整井进行测井成岩相识别,总结扩容相、破坏相及保护相空间展布规律。

3 应用实例分析

鄂尔多斯盆地苏里格地区位于内蒙古自治区伊克昭盟境内,为中国最大的天然气生产基地。其中苏里格北部上古生界二叠系石盒子组盒 8 段为该区主要天然气产层,深度范围 3.2 ~ 3.5 km,压实作用

强烈,原生孔隙基本消失。油气藏主要为受砂体展布及成岩相所控制的岩性油气藏,因此在该区开展成岩相识别具有重要意义。

3.1 岩性、成岩作用及测井成岩相划分

根据 43 口钻井 453 块薄片及 82 个扫描电镜样品,研究区地层主要发育石英砂岩、岩屑石英砂岩和岩屑砂岩。通过对各岩性发育成岩作用类型对比,岩石中泥质含量与成岩作用类型关系密切,因此在岩性分类基础上,将每种岩性中泥质含量大于 5% 的部分作为独立单元进行成岩相识别(表 1)。

表 1 中,成岩作用:①溶蚀石英颗粒;②溶蚀火山岩岩屑;③溶蚀长石;④溶蚀杂基;⑤粒间自生石英;⑥石英次生加大;⑦自生高岭石充填孔隙;⑧方解石交代碎屑并连晶状充填孔隙;⑨软岩屑变形呈假杂基;⑩铁方解石充填孔隙;⑪自生绿泥石环状衬里;⑫伊利石呈薄膜状。成岩相:Ⅰ-石英颗粒溶蚀相;Ⅱ-长石、岩屑、杂基溶蚀相;Ⅲ-硅质胶结相;Ⅳ-自生高岭石胶结相;Ⅴ石英加大-自生高岭石充填孔隙相;Ⅵ-钙质胶结相;Ⅶ-压实相;Ⅷ-黏土膜相。

表 1 不同岩性发育成岩作用类型

Table 1 Types of different lithology development diagenesis

| 测井成岩相 | 成岩相 | 石英砂岩 | 含泥石英砂岩 | 岩屑石英砂岩 | 岩屑砂岩  | 含泥岩屑石英砂岩 | 含泥岩屑砂岩 |
|-------|-----|------|--------|--------|-------|----------|--------|
| 扩容相   | Ⅰ   | ①    |        |        |       |          |        |
|       | Ⅱ   |      |        | ② ③    | ② ③   | ② ③      | ② ③    |
|       |     |      |        | ④      | ④     |          |        |
| 破坏相   | Ⅲ   | ⑤ ⑥  | ⑤ ⑥    | ⑤ ⑥    | ⑤     | ⑤        | ⑤      |
|       | Ⅳ   |      |        |        | ⑦     | ⑦        | ⑦      |
|       | Ⅴ   |      |        | ⑤ ⑥ ⑦  | ⑤ ⑥ ⑦ | ⑤ ⑥ ⑦    | ⑤ ⑥ ⑦  |
|       | Ⅵ   |      |        | ⑧      | ⑧     | ⑧        | ⑧      |
|       |     |      |        | ⑩      | ⑩     |          |        |
|       | Ⅶ   |      |        | ⑨      | ⑨     | ⑨        | ⑨      |
|       |     |      |        | ⑪      | ⑪     | ⑪        | ⑪      |
| 保护相   | Ⅷ   |      |        | ⑫      | ⑫     | ⑫        | ⑫      |

3.1.1 各岩性发育成岩作用类型

成岩作用类型见图 1。

(1)图 1 石英砂岩与含泥石英砂岩发育 3 种成岩作用,归结为 2 种成岩相。石英颗粒在孔隙流体的作用下,颗粒边缘形成港湾状溶蚀(图 1(a)),但随着泥质含量的增加,石英颗粒与孔隙水接触面积减少,溶蚀相消失,在含泥石英砂岩中以胶结作用为主(图 1(b)、(c))。

(2)岩屑石英砂岩与岩屑砂岩发育成岩作用类型基本相同,溶蚀相包括岩屑、长石和杂基溶蚀(图 1(d)、(e)),胶结相则以钙质胶结(图 1(f))和硅质-高岭石胶结为主(图 1(g))。在胶结物中,与含泥

岩屑(石英)砂岩不同的是,钙质胶结中含有大量铁方解石。保护性成岩相则以绿泥石膜为主(图 1(h))。

(3)含泥岩屑石英砂岩和含泥岩屑砂岩中溶蚀作用发育于岩屑及长石颗粒,无杂基溶蚀。碳酸盐胶结以方解石为主,同时含有大量自生结晶形态完整的自生高岭石充填孔隙。

总体来看(含泥)石英砂岩中发育成岩相类型较少,岩屑(石英)砂岩和含泥岩屑(石英)砂岩中成岩相类型多样。

3.1.2 测井成岩相划分

根据成岩作用对孔缝演化的作用,将各岩性中

发育的成岩相类型进行划分(表 1)。

(1)(含泥)石英砂岩:扩容相包括石英颗粒溶蚀,破坏相包括硅质胶结。

(2)岩屑(石英)砂岩:扩容相包括长石、岩屑、杂基溶蚀相,破坏相包括硅质胶结相、自生高岭石胶结相、石英加大-自生高岭石充填孔隙相和钙质胶结相、胶状水云母、软岩屑变形呈假杂基相。保护相

包括黏土膜相。

(3)含泥岩屑(石英)砂岩:扩容相包括长石、岩屑溶蚀相,破坏相包括硅质胶结相、自生高岭石胶结相、石英加大-自生高岭石充填孔隙相和钙质胶结相、胶状水云母、软岩屑变形呈假杂基相。保护相包括黏土膜相。

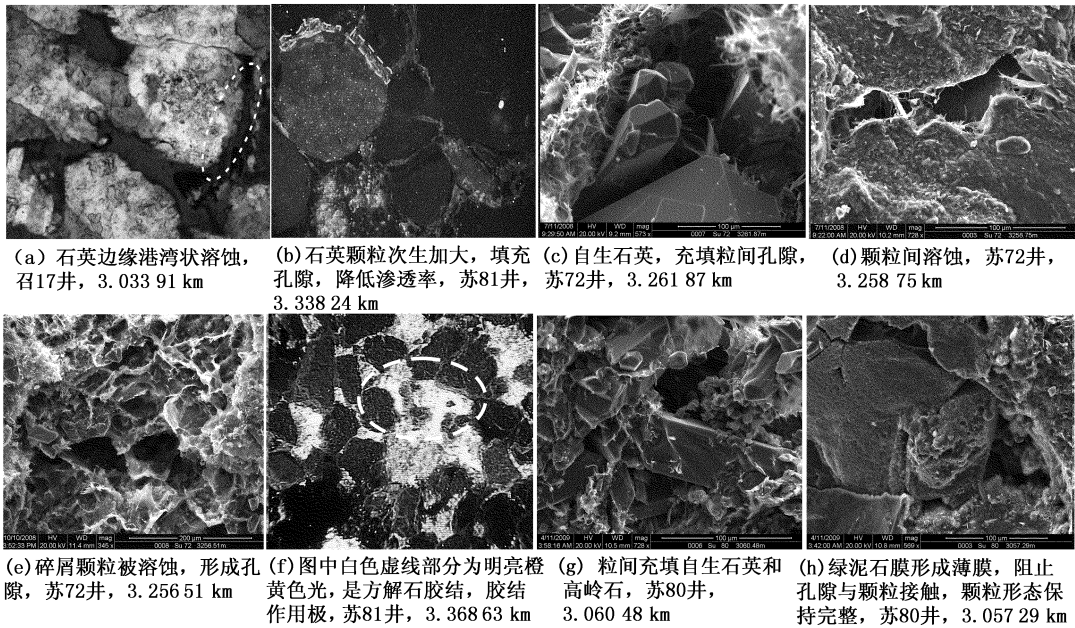


图 1 成岩作用类型

Fig. 1 Type of diagenesis

3.2 测井成岩相测井特征

在岩性分类的基础上,提取反映测井成岩相放射性的自然伽马( $GR$ )和自然伽马能谱测井( $U$ 、 $Th$ 、 $K$ )测井,反映岩石致密程度的声波时差( $\Delta t$ )、密度( $\rho$ )测井等 11 条测井信息以及黏土矿物比值( $R$ )。

3.2.1  $R$  值的计算方法

在提取样本  $R$  值时,需要建立整井黏土矿物含量数据,因此采用纵向连续性好、分辨率高的测井信息建立黏土矿物含量计算模型。黏土矿物含量计算较普遍的方法是以黏土矿物具有的放射性  $U$ 、 $Th$  及  $K$  作为切入点,如斯伦贝谢黏土矿物解释图版、自然伽马能谱测井线性回归法等<sup>[13,20-22]</sup>。但是,苏里格地区地层中含有大量黑云母等高放射性矿物,对放射性能谱测井影响较大,因此通过与以上方法计算结果对比后选取了三孔隙度法进行计算<sup>[20]</sup>。三孔隙度法是指将样品经 X 衍射所得黏土矿物种类、含量与相应深度的中子孔隙度( $\varphi_n$ )、声波时差孔隙度( $\varphi_s$ )、密度孔隙度( $\varphi_d$ )及泥质含量( $V_{sh}$ )进行线性回归分析,建立数学模型。三种孔隙度及泥质含量

计算公式为

$$\varphi = \frac{\Phi - \Phi_{\min}}{\Phi_{\max} - \Phi_{\min}} \quad (4)$$

式中, $\varphi$  为所求孔隙度值; $\Phi$  为待计算深度测井值; $\Phi_{\min}$  和  $\Phi_{\max}$  为流体与骨架颗粒测井值。

通过 15 个样本的 X 衍射实测分析,研究区黏土矿物包括绿泥石( $\omega_c = 65.19\%$ )、高岭石( $\omega_k = 16.99\%$ )、伊利石( $\omega_l = 14.32\%$ )和伊/蒙混层( $\omega_{ls} = 3.5\%$ )。所建立的三孔隙度回归方程为

$$\omega_l + \omega_{ls} = 3.42 + 0.0044V_{sh} - 12.9\varphi_s + 0.88\varphi_n - 10.47\varphi_d, \quad (5)$$

$$\omega_c = 2 + 0.52V_{sh} + 26.15\varphi_s - 13.46\varphi_n - 18.42\varphi_d. \quad (6)$$

两者相关系数均为 0.94。

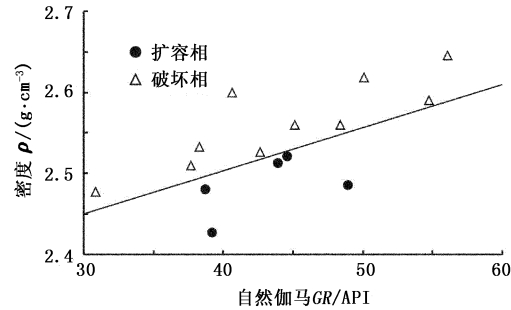
3.2.2 测井成岩相测井特征对比

苏里格地区发育的 6 种岩石类型中,石英砂岩与含泥石英砂岩发育测井相类型单一,较易识别。余下 4 种岩性成岩作用类型多样,其中岩屑砂岩与岩屑石英砂岩发育成岩相类型近似,因此以该两种岩性为例,合并识别。结果见图 2。

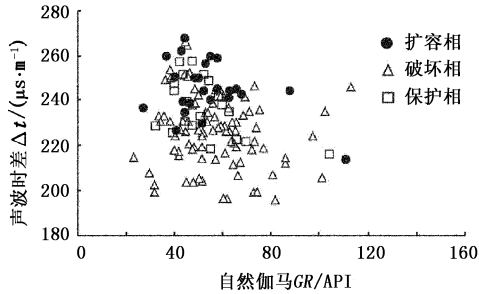
(1)(含泥)石英砂岩扩容相发育于石英砂岩,反映在密度-自然伽马曲线上为中密度、低自然伽马特征,与破坏相区分较大(图 2(a))。

(2)岩屑(石英)砂岩中扩容相具有高声波时差,低自然伽马、高黏土矿物比、低密度的测井特征(图 2(b)~(d)),反映了扩容相地层中为高孔隙、低泥质含量的偏酸性地层,且发生扩容相地层密度

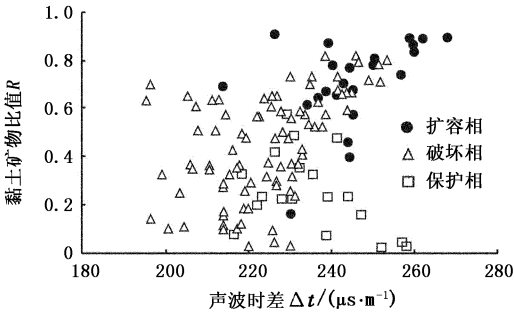
相对较低。破坏相测井特征表现为低声波时差、高自然伽马、中黏土矿物比及高密度,反映了地层中泥质含量较大,孔隙较少,孔隙水类型多样,一般经历多次成岩作用的特征。保护相测井特征介于破坏相及扩容相之间,表现为高自然伽马和低黏土矿物比(图 2(c))。



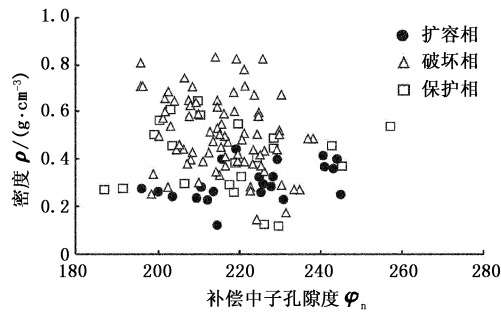
(a) 石英砂岩测井成岩相 GR-ρ 曲线



(b) 岩屑(石英)砂岩测井成岩相 GR-Δt 曲线



(c) 岩屑(石英)砂岩测井成岩相 Δt-R 曲线



(d) 岩屑(石英)砂岩测井成岩相 φₙ-ρ 曲线

图 2 测井成岩相测井特征对比

Fig. 2 Comparison of logging characteristics of log diagenetic facies

### 3.3 测井成岩相识别结果

#### 3.3.1 不同测井组合识别符合率

概率神经网络对测井成岩相的判别是根据已知测井成岩相测井特征进行的。因此,在识别过程中应对比不同测井组合下神经网络测井成岩相符合率(图 3,其中  $P_e$  为光电吸收截面系数)。识别率计算方法为随机提取 30% 样本作为测试样本,70% 样本作为神经网络学习样本,并将这一过程进行 30 次,以最终均值代表该类测井组合下测井成岩相的识别能力。

在岩屑(石英)砂岩测井成岩相识别中, $\omega_{th}-\Delta t-\rho-\phi_n-P_e-R$  测井组合符合率最高,为 80.7%。

#### 3.3.2 测井成岩相识别效果

研究区盒 8 段下部沉积相以辫状河三角洲相为主,沉积物呈多排北东走向河道砂体,根据 26 口单井测井成岩相识别及试油结果,绘制扩容相平面分布图(图 4)。

苏里格地区盒 8 下分布了三个扩容相分布区带:①北部苏 82—苏 55;②北西部统 40—召 46;③

南部苏 139—苏 141 三个地区。与实际试气结果相比较,在扩容性成岩相发育区域试气结果为基本为气层和少量气水同层,无差气层存在,而在破坏性成岩相发育区域则存在大量差气层。

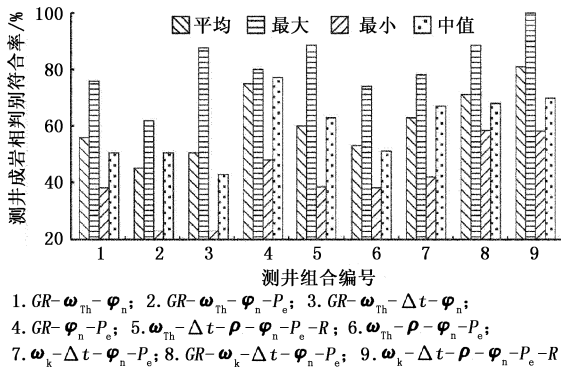


图 3 岩屑(石英)砂岩中不同测井组合测井成岩相判别符合率

Fig. 3 Discriminant coincidence rate of log diagenetic facies for different log combination in lithic( quartz) sandstone

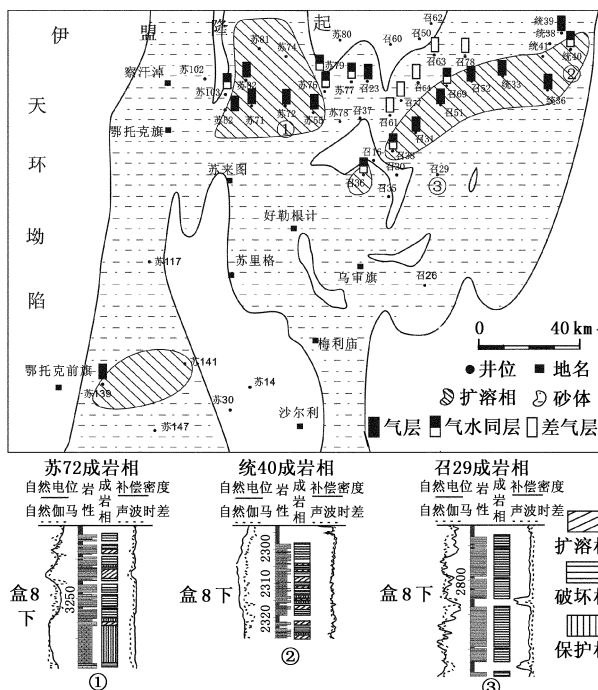


图4 鄂尔多斯盆地苏里格地区盒8下扩容性相分布

Fig. 4 Distribution of solutional phase in He8 section of Sulige area, Ordos Basin

## 4 结论

(1)成岩相测井特征复杂性是由于岩石骨架颗粒及多期次、多类型成岩作用叠加对测井信息的影响造成的。采用分岩性提取成岩相测井特征及识别成岩相可以有效地排除岩石骨架颗粒影响,并限制识别单元中成岩相发育类型。利用黏土矿物比值能够定量反应成岩过程中孔隙流体性质。

(2)学习集中测井成岩相的测井特征是影响概率神经网络识别能力的主要因素,因此在利用概率神经网络进行测井成岩相识别过程中应对比不同测井组合的成岩相识别能力。

(3)根据成岩相对储集体孔缝演化的作用不同,提出测井成岩相概念及划分方法。根据该方法,将鄂尔多斯盆地苏里格地区所发育的12种成岩作用,8种成岩相,划分为3种测井成岩相,最终识别符合率为81%。识别结果与实际试气结果相比较,扩容相发育区域基本为气层及气水同层,无差气层存在。

## 参考文献:

[1] RAISBACK L B. Carbonate diagenetic facies in the Upper Pennsylvanian Dennias formation in Iowa [J]. Missouri and Kansas Journal of Sedimentary, 1984, 54 (3): 986-

999.

[2] 钟广法, 郭宁芬. 成岩岩相分析及其在泌阳凹陷核三下亚段砂岩储层中的初步应用 [J]. 江汉石油学院学报, 1995, 17 (1): 38-40.

ZHONG Guang-fa, WU Ning-fen. Diagenetic lithofacies analysis and its application in sandstone reservoirs of Biyang depression [J]. Journal of Jianghan Petroleum Institute, 1995, 17 (1): 38-40.

[3] 季汉成, 翁庆萍. 鄂尔多斯盆地东部下二叠统山西组山2段成岩相划分及展布 [J]. 古地理学报, 2008, 10 (4): 410-418.

JI Han-cheng, WENG Qing-ping. Division and distribution of diagenetic facies of the member 2 of lower Permian Shanxi formation in eastern Ordos Basin [J]. Journal of Palaeogeography, 2008, 10 (4): 410-418.

[4] 杜业波, 季汉成. 川西前陆盆地上三叠统须家河组成岩相研究 [J]. 吉林大学学报: 地球科学版, 2006, 36 (3): 358-364.

DU Ye-bo, JI Han-cheng. Research on the diagenetic facies of the Upper Triassic Xujiahe formation in the western Sichuan Foreland Basin [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2006, 36 (3): 358-364.

[5] 楼章华, 曾允孚. 扶杨油层孔隙水成因与砂岩成岩相研究 [J]. 沉积学报, 1995 (s13): 63-70.

LOU Zhang-hua, ZENG YUN-fu. The origin of pore-water and the study of sandstone diagenetic facies of Fu-Yang formations ( $K_1q^{3+4}$ , Northern-Eastern Songliao Basin, NE China (Cretaceous)) [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 1995 (s13): 63-70.

[6] 袁波, 杨俊生. 成岩作用效应模拟的应用 [J]. 中国石油大学学报: 自然科学版, 2009, 33 (2): 1-6.

YUAN Bo, YANG Jun-sheng. Application of effect simulation of diagenesis [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2009, 33 (2): 1-6.

[7] 孟元林. 渤海湾盆地西部凹陷南段成岩相分析与优质储层预测 [J]. 沉积学报, 2006, 24 (2): 185-192.

MENG Yuan-lin. Diagenetic facies analysis and high-quality reservoir prediction in the southern Xibu depression of the Bohaiwan Basin [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2006, 24 (2): 185-192.

[8] 李弘, 王芙蓉. 绿泥石膜对储层孔隙度的影响: 以鄂尔多斯盆地M油田延长组2段为例 [J]. 岩性油气藏, 2008, 20 (4): 71-74.

LI Hong, WANG Fu-rong. Influence of chlorite film on reservoir porosity: a case study from the second member of Yanchang formation in Ordos Basin [J]. Lithologic Reservoirs, 2008, 20 (4): 71-74.

[9] 徐樟有, 魏萍, 熊琦华. 枣南油田孔店组一、二段成岩

- 作用及成岩相[J]. 石油学报,1994(s1):60-67.
- XU Zhang-you, WEI Ping, XIONG Qi-hua. The diagenesis and diagenetic facies of EK<sub>1</sub>—EK<sub>2</sub> in South Zaonan Oilfield[J]. Acta Petrolei Sinica,1994(s1):60-67.
- [10] 张金亮,司学强,梁杰,等. 陕甘宁盆地庆阳地区长8油层砂岩成岩作用及其对储层性质的影响[J]. 沉积学报,2004,22(2):225-233.
- ZHANG Jin-liang, SI Xue-qiang, LIANG Jie, et al. Diagenesis of lacustrine deltaic sandstones and its impact on reservoir quality[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2004,22(2):225-233.
- [11] 罗平,裘怿楠,贾爱林,等. 中国油气储层地质研究面临的挑战和发展方向[J]. 沉积学报,2003,21(1):142-147.
- LUO Ping, QIU Yi-nan, JIA Ai-lin. The present challenges of Chinese petroleum reservoir geology and research direction[J]. Acta Sedimentologica Sinica,2003,21(1):142-147.
- [12] 明海会,金振奎,金之钧,等. 泌阳凹陷安棚油田深层系油气分布规律及控制因素[J]. 沉积学报,2005,23(2):329-336.
- MING Hai-hui, JIN Zhen-kui, JIN Zhi-yun, et al. Study on the distribution of hydrocarbon and controlling factors of the deep burial strata in Anpeng Oilfield of Biyang sag[J]. Acta Sedimentologica Sinica,2005,23(2):329-336.
- [13] 谭延栋. 测井解释黏土矿物[J]. 石油钻采工艺,1987,6(4):1-8.
- TAN Yan-dong. The clay minerals in the logging interpretation[J]. Oil Drilling & Production Technology, 1987,6(4):1-8.
- [14] 张小莉,沈英. 利用测井资料分析成岩作用对储集层的影响[J]. 沉积学报,2000,18(1):127-131.
- ZHANG Xiao-li, SHEN Ying. Application of well logging information to analysis on the effect of diagenesis in reservoirs[J]. Acta Sedimentologica Sinica,2000,18(1):127-131.
- [15] 邹才能,陶士振. 成岩相的形成—分类与定量评价方法[J]. 石油勘探与开发,2008,35(5):526-540.
- ZOU Cai-neng, TAO Shi-zhen. Genesis, classification and evaluation method of diagenetic facies [J]. Petroleum Exploration and Development,2008,35(5):526-540.
- [16] 谢渊,王剑,李令喜. 鄂尔多斯盆地白垩系黏土矿物的分布特征及其沉积-成岩环境意义[J]. 地质通报,2010,29(1):93-104.
- XIE Yuan, WANG Jian, LI Ling-xi. Distribution of the Cretaceous clay minerals in Ordos Basin, China and its implication to sedimentary and diagenetic environment [J]. Geological Bulletin of China, 2010,29(1):93-104.
- [17] 王建强,薛林福. 松辽盆地北部石炭—二叠系油气远景[J]. 吉林大学学报:地球科学版,2011(s1):9-16.
- WANG Jian-qiang, XUE Lin-fu. Oil-gas potential of Carboniferous-Permian formation in the north Songliao Basin[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition),2011(s1):9-16.
- [18] 程国建,周冠武. 概率神经网络方法在岩性识别中的应用[J]. 微计算机信息,2007,23(6):288-290.
- CHENG Guo-jian, ZHOU Guan-wu. The probability neural networks for lithology identification[J]. Control & Automation,2007,23(6):288-290.
- [19] PAN Bao-zhi. XUE lin-fu. Evaluation of volcanic reservoirs with the 'QAPM mineral model' using a genetic algorithm[J]. Applied Geophysics, 2008,5(1):1-8.
- [20] 邢培俊,孙建孟. 利用测井资料确定黏土矿物的方法对比[J]. 中国石油大学学报:自然科学版,2008,32(2):53-57.
- XING Pei-jun, SUN Jian-meng. Comparison of determination methods for clay minerals using log data [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science),2008,32(2):53-57.
- [21] 石强. 利用自然伽马能谱测井定量计算黏土矿物成分方法初探[J]. 测井技术,1998,22(5):349-352.
- SHI Qiang. Preliminary investigation on quantitative analysis of the composition of clay minerals using NGS log [J]. Well Logging Technology, 1998,22(5):349-352.
- [22] Schlumberger Limited. Schlumberger wireline and testing Schlumberger log interpretation charts [M]. Houston: Schlumberger Education Services,1996:4-30.

(编辑 修荣荣)