



极限学习机在黏土矿物分析中的应用

白 焱¹, 曹乃文², 邱庆良³

1. 吉林省煤田地质局物测队, 吉林 长春 130031; 2. 吉林省煤田地质局 203 勘探队, 吉林 四平 136000;
3. 吉林省煤田地质局 102 勘探队, 吉林 通化 135000

摘 要: 对鄂尔多斯盆地苏里格北部上古生界盒 8 段低渗透储层研究发现, 成岩作用是控制气藏分布的主要因素之一, 而黏土矿物又影响着成岩作用类型及强度, 在成岩作用划分中具有重要指示作用。本研究尝试利用自然伽马能谱测井结合神经网络(极限学习机)准确计算储层中黏土矿物含量, 为全井自动成岩作用识别提供支撑。在黏土矿物分析过程中, 为避免测井信息受岩石骨架颗粒成分差异的影响, 针对研究区沉积的岩屑砂岩和岩屑石英砂岩分别建立黏土矿物分析神经网络, 提高计算精度。神经网络采用了参数不易陷入局部最优的极限学习机, 保证了分析结果的速度和稳定性。在此基础上, 利用苏里格北部地区上古生界盒 8 段 15 个 X 衍射分析样本, 将分岩性计算结果与未分岩性分析结果进行比较, 证明了方法的有效性。

关键词: 黏土矿物; 自然伽马能谱测井; 岩性分析; 极限学习机; 鄂尔多斯盆地

APPLICATION OF EXTREME LEARNING MACHINE IN ANALYSIS OF CLAY MINERALS

BAI Ye¹, CAO Nai-wen², QIU Qing-liang³

1. Geophysical Prospecting and Surveying Team, Jilin Bureau of Coalfield Geology, Changchun 130031, China;
2. No. 203 Exploration Team, Jilin Bureau of Coalfield Geology, Siping 136000, Jilin Province, China;
3. No. 102 Exploration Team, Jilin Bureau of Coalfield Geology, Tonghua 135000, Jilin Province, China

Abstract: The study on low permeability reservoirs in the 8th member of Lower Shihezi Formation, Upper Paleozoic in northern Sulige of Ordos Basin show that diagenesis is one of the main factors controlling the distribution of gas reservoirs, while clay minerals affect the type and intensity of diagenesis and serve as an important indicator in the classification of diagenesis. This study attempts to use natural gamma-ray spectral logging combined with neural network (extreme learning machine, ELM) to accurately calculate the content of clay minerals in reservoir, providing support for automatic identification of diagenesis in the whole well. In the analysis of clay minerals, to avoid the influence of difference of rock skeleton and particle compositions on logging information, the neural network of clay mineral analysis is established respectively for lithic sandstone and lithic quartz sandstone in the study area to improve calculation accuracy. The neural network adopts the ELM with lower probability of trapping into low efficiency and local optimum to ensure the speed and stability of analysis result. On this basis, 15 X-ray diffraction analysis samples from the 8th member of Lower Shihezi Formation in northern Sulige area are used to compare the calculated results of differential and indifferential lithology, proving the effectiveness of the method.

Key words: clay mineral; natural gamma-ray spectral logging; lithological analysis; extreme learning machine; Ordos Basin

收稿日期: 2020-06-08; 修回日期: 2020-07-24. 编辑: 张哲.

基金项目: 国家科技重大专项“大型油气田及煤层气开发——鄂尔多斯盆地大型低渗透岩性地层油气藏开发示范工程”(2011ZX05044).

作者简介: 白焱(1983—), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事地质定量分析及应用研究, 通信地址: 吉林省长春市二道区东盛大街 2752 号, E-mail//176838900@qq.com

0 前言

鄂尔多斯盆地是中国大型岩性油气藏盆地, 对该区苏里格地区北部上古生界盒 8 段含气储层分析发现, 成岩作用是致密储层能够形成“甜点”的主要控制因素^[1-5]。而在划分成岩作用的过程中发现, 黏土矿物影响着成岩作用类型及强度。为更加准确有效对该区储层进行评价, 开展了黏土矿物含量分析研究。现阶段对黏土矿物的实验手段主要可以概括为定量和定性两种。定量分析为 X 衍射分析, 可得到黏土矿物类型及含量; 定性分析为直接利用扫描电镜观察取心样本黏土矿物微观形态, 判断类型、成因、期次等, 但受限于取心数量, 实验方法常无法满足实际生产需求。随着近年来测井技术的突飞猛进, 测井信息对储集体结构、成分具有了更精确的反映。利用测井数据分析黏土矿物, 前人进行了大量的尝试, 如斯伦贝谢公司提供的黏土矿物解释图版^[6]、黏土矿物定量分析图版^[7]、多元回归分析法^[8]、中子-密度交会法、密度-体积光电吸收截面指数交会法、钾光电吸收截面指数交会法^[9]和钍-钾交会法等^[10]。这些方法以黏土矿物具有的放射性为切入点, 利用自然伽马能谱测井数据与不同黏土矿物建立响应关系。但考虑到岩石骨架成分等对测井数据的影响因素, 单一的解釋图版并不能适应多物源积体系及多变沉积环境地层黏土矿物含量的计算, 所得到的分析结果精度自然也受到较大影响^[11]。

人工神经网络是 20 世纪 40 年代由 W. McCulloch 等人所提出^[12], 其由大量简单的神经元广泛互连形成复杂的非线性系统。其中最为经典, 在各种地质元素识别中应用广泛的为 BP 神经网络^[13-16]。但由于其对阈值和权值的调整是沿最快梯度下降方向, 所以在最优解的寻找过程中不可避免地常陷入到局部最优, 使参数无法调整到全局最佳, 也就是存在分析结果的不稳定性。针对该问题新加坡学者 Guang-Bin Huang 提出了其改进型^[17-18], 即极限学习机 (Extreme Learning Machine, ELM)。该算法不仅能够提高神经网络学习速度, 还能保证每次在节点参数计算中均得到全局唯一最优解, 因此保证了计算结果的准确率。本研究中 ELM 算法由 Matlab 平台提供的相关函数实现。

1 极限学习机

1.1 极限学习机原理

极限学习机是单隐层前馈神经网络 (如图 1)。该算法随机产生输入层与隐层间的连接权值及阈值, 参数上仅需调整隐层神经元个数, 便可获得唯一最优解。其计算过程以一个 n 维数据为例, 在针对 1 个隐层节点的网络, 当输入变量为 n 维数据的 x_n 时, w_m 为输入点连接到隐层节点的权值, b 为相应阈值。其激活函数 $g(x)$ 要求是一个任意区间无限可微的函数, β_k 为隐层节点连接到输出节点的权值。由输入端经过神经网络的计算, 在输出端最终结果可表示为 $\beta_k g(w_{ij} x_i + b)$, 用 T 代表。其中 $g(w_{ij} x_i + b)$ 用 H 代表。针对该式, Huang 等人提出了定理 1 和 2, 并证明了其正确性^[15]。

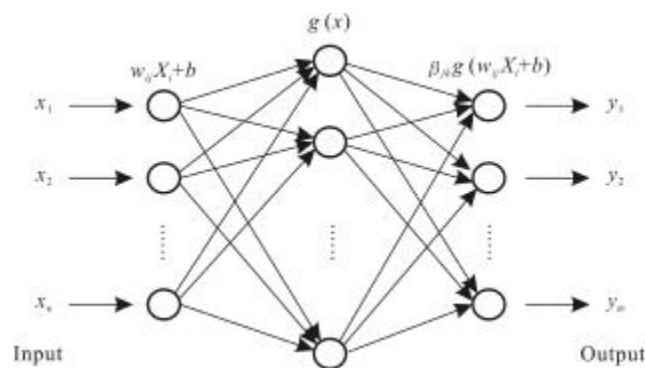


图 1 ELM 拓扑结构图

Fig. 1 Topological structure diagram of ELM

定理 1: 给定任意 Q 个不同样本 (x_i, y_i) , 其中 $x_i = [x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{in}]^T \in \mathbb{R}^n$, $y_i = [y_{i1}, y_{i2}, \dots, y_{im}] \in \mathbb{R}^m$, 和一个任意区间无限可微的激活函数 $g: \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$, 则对于具有 Q 个隐含层神经元的神经网络, 在任意赋值 $w_i \in \mathbb{R}^n$ 和 $b_i \in \mathbb{R}$ 的情况下, 其隐含层输出矩阵 H 可逆, 且具有 $\|H\beta - T'\| = 0$, T' 为 T 的转置矩阵。

定理 2: 给定任意 Q 个不同样本 (x_i, y_m) , 其中 $x_i = [x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{in}]^T \in \mathbb{R}^n$, $y_i = [y_{i1}, y_{i2}, \dots, y_{im}] \in \mathbb{R}^m$, 给定任意小误差 ε ($\varepsilon > 0$) 和一个任意区间无限可微的激活函数 $g: \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$, 则总存在一个含有 K ($K \leq Q$) 个隐含层神经元的神经网络, 在任意赋值 $w_i \in \mathbb{R}^n$ 和 $b_i \in \mathbb{R}$ 的情况下, 有 $\|H_{N \times M} \beta_{M \times m} - T'\| < \varepsilon$ 。

因此, 针对网络参数的计算过程中, 由定理 1 可知, 若隐含层神经元个数与训练集样本个数相等, 则对于任意的 w 和 b , 神经网络都可以零误差逼近训练样本。由定理 2 可以看出, 当隐层个数小于训练样本时

则可逼近任意一个 $\varepsilon > 0$.

1.2 ELM 判别准确率计算方法

由于实测样本数量与待预测样本数量差距较大,对神经网络判别结果准确率的评定较难衡量.本研究主要采用 more against one 法,即从实测黏土矿物样本集中抽取 1 个作为对照样本,其他作为神经网络训练样本,将判别结果与对照样本进行记录,将这个过程循环,当所有样本都作为对照样本进行过分析后,计算黏土矿物分析的准确率.

2 苏里格北部上古生界二叠系盒 8 段黏土矿物分析

鄂尔多斯盆地位于华北地块西部,是一个稳定沉积、拗陷迁移、扭动明显的多旋回克拉通盆地,现今构造面貌为一南北翘起、东翼缓而长、西翼短而陡的不对称向斜(图 2). 苏里格地区位于鄂尔多斯盆地北部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 段为其主要天然气产层,深度范围介于 3200~3500 m,压实作用强烈,原生孔隙基本消失,油气藏为受砂体展布及成岩作用所控制的岩性油气藏. 区内开展了大量成岩作用相关研究. 成岩作用普遍与黏土矿物有关,如自生高岭石及伊利石,堵塞喉道,分割大孔隙,降低储层渗透性;绿泥石则在颗粒表面形成绿泥石膜,阻止颗粒的次生加大,增强岩屑颗粒抗压实能力等. 因此对黏土矿物的识别能够为后期全井自动识别成岩作用提供支撑^[1,19].

2.1 岩性及黏土矿物特征

本研究收集了苏里格北部盒 8 段 7 口钻孔的 15 个黏土矿物 X 衍射实验数据,取心井位置如图 2 所示.

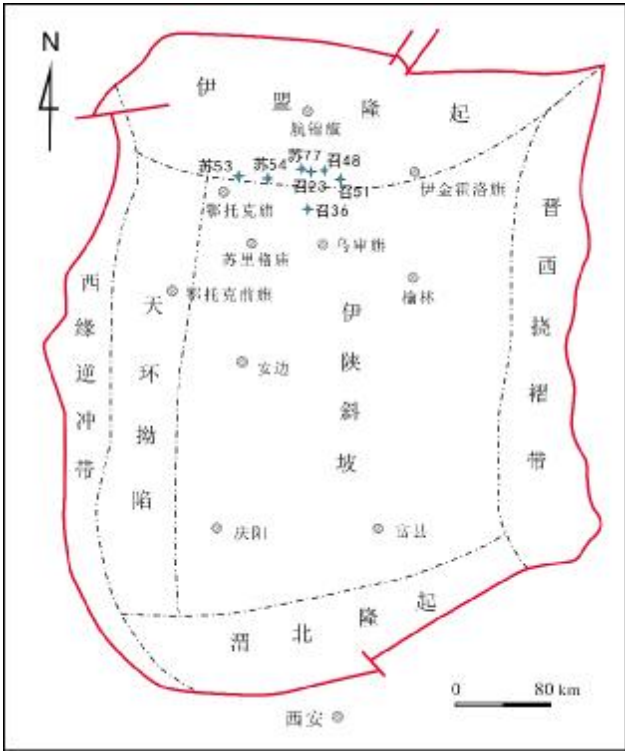


图 2 研究区位置及井位图

Fig. 2 Location map of the study area with well position

苏里格盒 8 段储集层主要沉积有石英砂岩(10%)、岩屑石英砂岩(35%)和岩屑砂岩(55%),岩屑主要为火山岩屑,成分复杂. 黏土矿物种类包括绿泥石(65.19%)、高岭石(16.99%)、伊利石(14.32%)及伊/蒙混层(3.5%). 在扫描电镜下,绿泥石基本以包壳状覆盖于岩石颗粒之上,阻止了颗粒在成岩过程中硅类物质的次生加大(图 3a),对早期形成的孔隙具有保护作用. 发育的高岭石以原生为主(图 3b),部分次生高岭石与硅质胶结相伴生,对成岩后期溶蚀形成的孔隙造成了二次封闭,伊利石及伊/蒙混层一般呈丝状发育

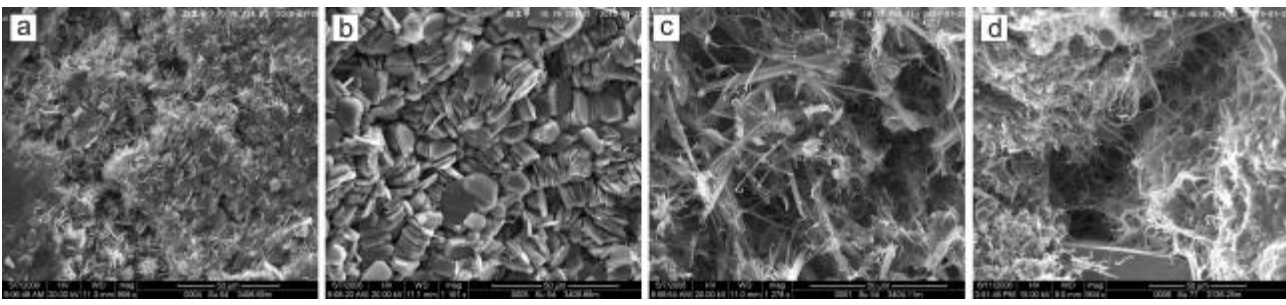


图 3 鄂尔多斯盆地苏里格地区盒 8 段黏土矿物扫描电镜图像

Fig. 3 SEM images of the clay minerals from the 8th mem. of L. Shihezi fm. in Sulige area, Ordos Basin

a—绿泥石膜,苏 54 井 3406.68 m, $\times 383$ (chlorite coating from Su54 well); b—自生高岭石,苏 54 井 3406.68 m, $\times 1191$ (authigenic kaolinite from Su54 well); c—伊利石,苏 54 井 3404.11 m, $\times 1220$ (illite from Su54 well); d—伊/蒙混层,苏 77 井 3136.25 m, $\times 900$ (illite-smectite mixed layer from Su77 well)

于颗粒之间(图 3c、d),将大口径的喉道分割为多个小孔隙,对渗透率影响较大。

通过对苏里格北部地区储层 3 种主要岩石发育的成岩作用进行总结发现,石英砂岩所含黏土矿物以自生高岭石为主,种类单一,含量较低。因此在对整井岩性分类后,石英砂岩不计算其中的黏土矿物含量,黏土矿物分析仅针对岩屑石英砂岩和岩屑砂岩。由于该区伊/蒙混层含量较少,成分及对储层的影响与伊利石近似,在计算中将两者合并计算。

2.2 黏土矿物自然伽马能谱测井特征

铀系($^{238}_{92}\text{U}$)、钍系($^{232}_{90}\text{Th}$)和钾系($^{40}_{19}\text{K}$)是地层中主要的放射性核素,其产生的放射性一般能占地层总放射量的 99% 以上^[20]。自然伽马能谱测井不仅能测量出总自然伽马(GR),同时还能根据不同放射性元素能量范围的差异进行无铀伽马(KTh)、铀(U)、钍(Th)和钾(K)的测量。其中 K 和 Th 一般为矿物本身结构中的离子元素,U 则为还原环境中被黏土吸附的离子^[9]。因此,U 与黏土矿物的种类和含量相关性较弱,Th、K 与 Th/K 值对黏土矿物的种类和含量的反映相对较准确。表 1 中列出了研究区黏土矿物的自然伽马能谱的测井特征,其中岩屑石英砂岩和岩屑砂岩由于岩石骨架含有大量长石类物质,在放射性上体现为岩屑砂岩 Th、K 值相对较高。高岭石表现为高 Th、高 Th/K、低 K、低 U 的特征;蒙脱石表现为低 Th、低 K、低 Th/K、低 U 的特点;伊利石表现为高 Th、高 K、低 Th/K、中 U 的测井特征;绿泥石表现为中 Th、低 K、高 Th/K、高 U 的特征。黏土矿物间的测井特征差异为利用自然伽马能谱测井信息准确计算黏土矿物含量提供了理论依据。

表 1 不同黏土矿物及岩性自然伽马能谱测井特征对照表
Table 1 Comparison of natural gamma-ray spectral logging characteristics by clay minerals and lithology

放射性元素	岩屑石英砂岩	岩屑砂岩	高岭石	蒙脱石	伊利石	绿泥石
Th/ 10^{-6}	7.16	8.28	6~19	0.8~2	10~25	0~8
K/%	1.41	1.74	0~0.5	0~1.5	3.51~8.31	0~0.3
Th/K	5.07	4.75	11~30	3.7~8.7	1.7~3.5	11~30
U/ 10^{-6}	1.6	1.56	4.4~7	4.3~7.7	8.7~12.4	17.4~36.2

2.3 苏里格北部盒 8 段黏土矿物分析结果对比

以苏里格北部盒 8 段 15 个取心样本的 X 衍射结

果作为 ELM 神经网络训练样本集,采用 more against one 法分析计算结果准确性,如表 2 所示。在分析结果中给出了两种计算方法的黏土矿物分析结果,一种是分岩性计算结果,另一种是未分岩性计算结果。可以看出,黏土矿物中绿泥石含量跨度较大,占比由 0~22.2% 均有。从结果对比来看,在含量较小的几个测点,其误差相对较大,但在含量超过 3% 后,其计算精度则大幅度提高,如表 2、图 4。特别是召 23 井 3071.17 m 样本,两种方法的计算结果基本与实测结果相同。高岭石和伊利石计算结果相似,未分岩性计算的黏土矿物结果普遍偏大,在图 4 的交会图中基本都分布于中线以上。在误差对比中,分岩性计算值/未分岩性计算值的相对误差均值分别为:绿泥石 21%/33%,高岭石 18%/25%,伊利石与伊蒙混层 22%/37%。

可以看出,岩石样本在未分岩性进行黏土矿物含量分析过程中,可能将部分长石等高放射成分识别成黏土矿物,使部分黏土矿物分析的结果与 X 衍射结果相差较大,而分岩性进行识别时可减小误差。

在证明了 ELM 黏土矿物含量分析准确性的基础上,利用已训练的 ELM 神经网络对苏 53 井进行了整井黏土矿物含量分析(图 5)。该井盒 8 段部分 3 个 X 衍射实验分析样本,其黏土矿物发育特征为高岭石基本不发育,主要为伊利石、伊/蒙混层和绿泥石,分析结果与实测基本吻合。在经过整井黏土矿物计算后,可进一步将计算结果与成岩作用识别相结合,为准确识别成岩作用提供理论支撑。

3 结论

1) 储层岩石具有的放射性并不完全由黏土矿物所产生,岩石成分的差异也会不同程度影响放射性能谱测井信息。在分析黏土含量过程中,应分地区、分地层及分岩性地训练多套神经网络,以提高黏土矿物含量计算的准确性。

2) 利用鄂尔多斯盆地苏里格地区 15 个 X 衍射结果训练 ELM 神经网络,通过实际对比,未分岩性计算的黏土矿物结果普遍偏大。因此在该区对黏土矿物准确计算时,对不同岩性进行分别计算是必要和有效的手段。

表 2 黏土矿物计算结果对照表

Table 2 Comparison of clay mineral calculation results

井名	深度/m	绿泥石			高岭石			伊利石+伊/蒙混层		
		实测	未分岩性	分岩性	实测	未分岩性	分岩性	实测	未分岩性	分岩性
苏 74	3237.92	0.49	0.92	0.7	0.07	1.2	0	0.07	0.11	0.02
苏 77	3148.89	2.01	3.1	1.43	0.57	0.8	0.6	0.56	0.98	0.07
苏 77	3152.46	7.69	6.52	5.57	1.48	3.32	2.39	2.72	4.67	2.58
召 23	3064.39	2.48	3.77	3.61	1.69	2.32	0.53	0.61	1.2	0.37
召 23	3071.17	22.2	25.68	22.12	6.8	6.56	6.96	3.44	4.3	3.54
召 36	3090.06	6.66	4.8	8.1	5.57	4.35	3.59	3.6	5.02	3.59
召 36	3098.93	3.89	4.2	3.32	0.85	1.56	1.22	0.81	1.08	0.99
召 36	3101.6	1.48	2.36	1.78	0.45	0.8	0.6	0.2	0.51	0.77
召 48	2908.69	8.64	8.87	8.41	1.8	2.65	2.39	3.28	4.56	3.16
召 51	2817.28	0	0.31	0	0.03	1.03	0.27	0.03	0.22	0.12
苏 53	3318.35	8.32	9.68	5.37	0	0.52	0.39	1.2	1.31	1.07
苏 53	3321.53	0.96	1.18	1.09	0	0.85	0	0.23	0.62	0.45
苏 53	3323.07	1.35	1.96	1.81	0	0.74	0	0.26	0.31	0.26
苏 53	3346.06	4.07	5.65	3.15	0.4	1.23	0.03	0.53	0.78	0.58
苏 53	3347.55	3.41	4.66	2.71	0.4	0.85	0	0.89	0.02	0

含量单位: %.

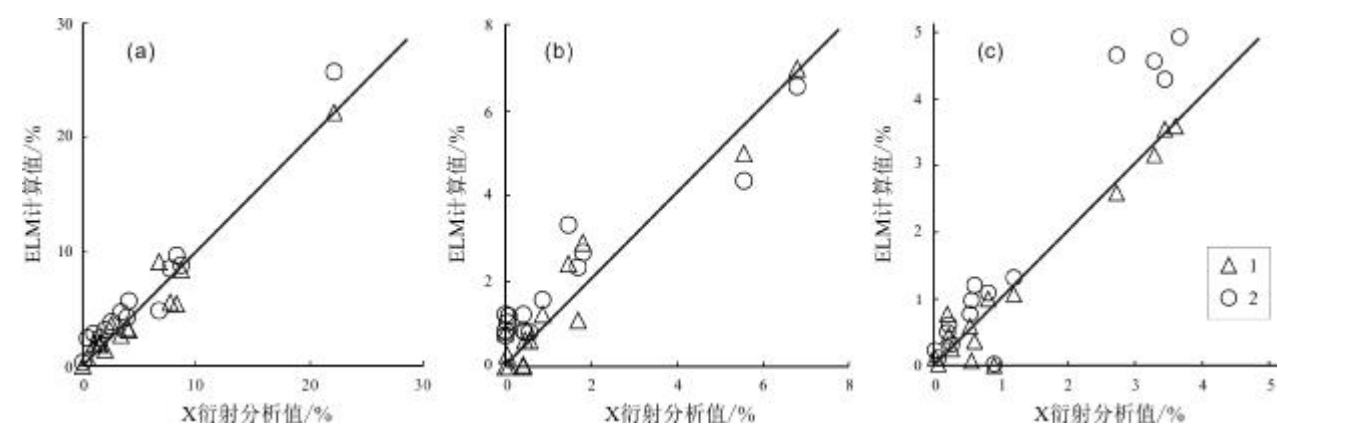


图 4 ELM 计算值与 X 衍射黏土矿物含量交会图

Fig. 4 Crossplots of ELM calculated value and clay mineral contents by X-ray diffraction

a—绿泥石 (chlorite); b—高岭石 (kaolinite); c—伊利石 (illite); 1—分岩性计算值 (calculated value of differential lithology); 2—未分岩性计算值 (calculated value of indifferential lithology)

参考文献 (References):

[1]白烨,薛林福,石玉江,等.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[J].中国石油大学学报(自然科学版),2013,37(1):35–41.
Bai Y, Xue L F, Shi Y J, et al. An automatic identification method of log diagenetic facies and its application in Sulige area, Ordos Basin [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2013, 37(1): 35–41.

[2]张海涛,时卓,石玉江,等.低渗透致密砂岩储层成岩相类型及测井识别方法——以鄂尔多斯盆地苏里格气田下石盒子组₈段为例

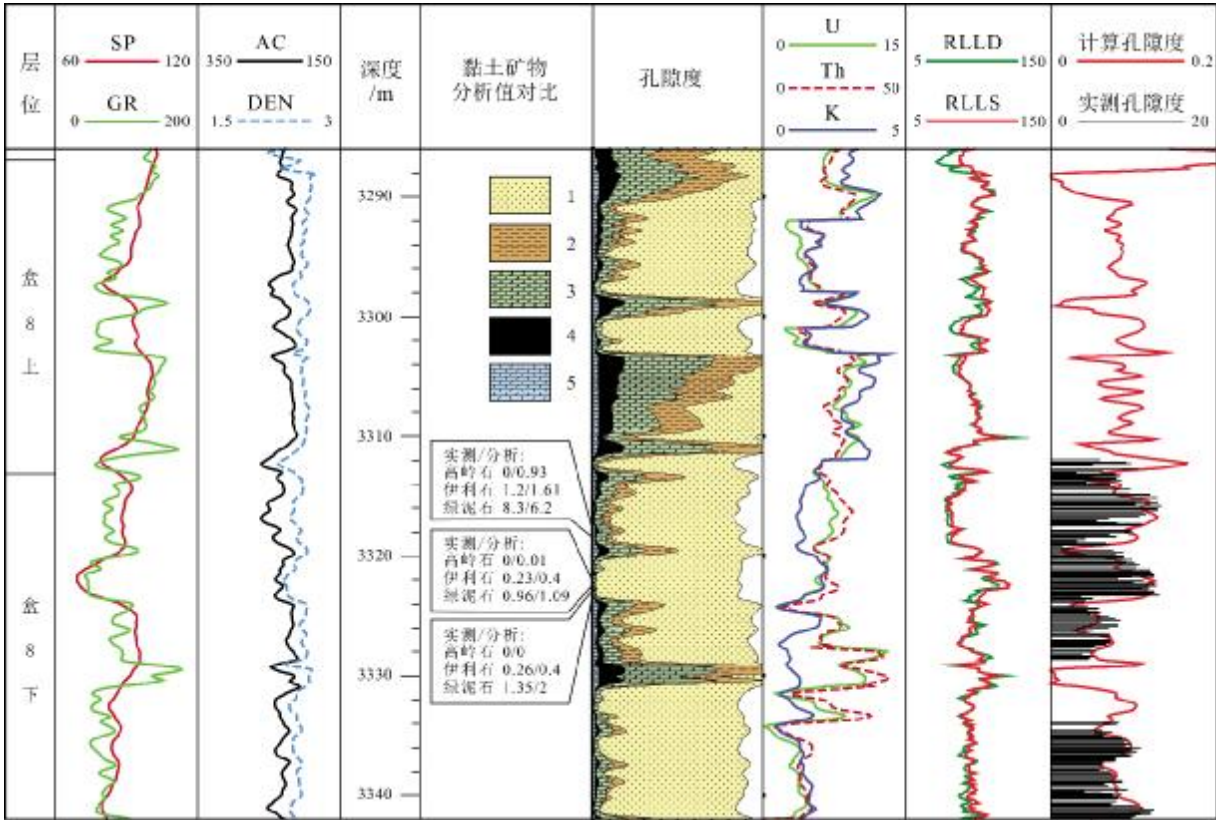


图 5 苏 53 井盒 8 段黏土矿物含量解释图

Fig. 5 Comprehensive interpretation of clay mineral contents in the 8th mem. of L. Shihezi fm. of Su53 well

1—砂岩(sandstone); 2—泥质(argillaceous); 3—绿泥石(chlorite); 4—高岭石(kaolinite); 5—伊/蒙混层(illite-smectite mixed layer)

[J]. 石油与天然气地质, 2012, 33(2): 256-264.

Zhang H T, Shi Z, Shi Y J, et al. Diagenetic facies types and logging identification methods for low-permeability tight sandstone reservoirs: A case study on the 8th member of Xiashihezi Formation in Sulige Gasfield, Ordos Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2012, 33(2): 256-264.

[3]牟传龙, 王秀平, 王启宇, 等. 关于苏里格气田东二区盒 8 段储层成岩相的再认识[J]. 沉积学报, 2016, 34(2): 346-355.

Mou C L, Wang X P, Wang Q Y, et al. The recognition of diagenetic facies on the case from the reservoir in He8 section of Shihezi Formation, East II part of Sulige gas field, Qrdos Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2016, 34(2): 346-355.

[4]王秀平, 牟传龙, 贡云云, 等. 苏里格气田 Z30 区块下石盒子组 8 段储层成岩演化与成岩相[J]. 石油学报, 2013, 34(5): 883-895.

Wang X P, Mu C L, Gong Y Y, et al. Diagenetic evolution and facies of reservoirs in Member 8 of Permian Xiashihezi Formation in the Z30 block of Sulige gasfield[J]. Acta Petrolei Sinica, 2013, 34(5): 883-895.

[5]徐同台, 王行信, 张有瑜, 等. 中国含油气盆地粘土矿物[M]. 北京: 石油工业出版社, 2003: 20-53.

Xu T T, Wang X X, Zhang Y Y, et al. Clay minerals of petroliferous basins in China[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2003: 20-53. (in Chinese)

[6]刘菁华, 王祝文, 易清平. 利用自然 γ 能谱测井资料确定粘土矿物的含量及其应用[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2010, 40(1): 215-221.

Liu J H, Wang Z W, Yi Q P. Determinating clay mineral content by natural gamma-ray spectral logging data[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2010, 40(1): 215-221.

[7]石强. 利用自然伽马能谱测井定量计算粘土矿物成分方法初探[J]. 测井技术, 1998, 22(5): 349-352.

Shi Q. Preliminary investigation on quantitative analysis of the composition of clay minerals using NGS log [J]. Well Logging Technology, 1998, 22(5): 349-352.

[8]郭影文. 自然伽马能谱测井在粘土矿物含量分析中的应用[J]. 石油天然气学报(江汉石油学院学报), 2008, 30(6): 268-270.

Guo Y W. Application of natural gamma ray spectroscopy log for analysis of clay mineral content[J]. Journal of Oil and Gas Technology (Journal of Jiangnan Petroleum Institute), 2008, 30(6): 268-270.

[9]谭廷栋. 测井解释粘土矿物[J]. 石油钻采工艺, 1987, 4(6): 25-32.

Tan T D. Log interpretation of clay minerals [J]. Oil Drilling & Production Technology, 1987, 4(6): 25-32. (in Chinese)

- [10]孙建孟, 李召成. 应用自然伽马能谱测井确定粘土矿物类型和含量[J]. 石油大学学报(自然科学版), 1999, 23(4): 29-32.
- Sun J M, Li Z C. Determination of clay types and contents by natural gamma-ray spectrum logging [J]. Journal of the University of Petroleum, China, 1999, 23(4): 29-32.
- [11]Schlumberger Wireline & Testing. Schlumberger log interpretation charts[M]. Houston: Schlumberger, 1997: 4-30.
- [12]张立明. 人工神经网络的模型及其应用[M]. 上海: 复旦大学出版社, 1993: 32-47.
- Zhang L M. Models and applications of artificial neural networks[M]. Shanghai: Fudan University Press, 1993: 32-47.
- [13]桂现才. BP神经网络在MATLAB上的实现与应用[J]. 湛江师范学院学报, 2004, 25(3): 79-83.
- Gui X C. Realization of BP networks and their applications on MATLAB [J]. Journal of Zhanjiang Normal College, 2004, 25(3): 79-83.
- [14]苏高利, 邓芳萍. 论基于MATLAB语言的BP神经网络的改进算法[J]. 科技通报, 2003, 19(2): 130-135.
- Su G L, Deng F P. On the improving backpropagation algorithms of the neural networks based on MATLAB language: A review [J]. Bulletin of Science and Technology, 2003, 19(2): 130-135.
- [15]黄丽. BP神经网络算法改进及应用研究[D]. 重庆: 重庆师范大学, 2008.
- Huang L. BP neural network algorithm improvement and application research[D]. Chongqing: Chongqing Normal University, 2008.
- [16]王娜娜. 神经网络在测井岩性识别中的应用[D]. 北京: 北京化工大学, 2009.
- Wang N N. The application of neural network in logging lithology identification [D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2009.
- [17]蔡磊, 程国建, 潘华贤. 极限学习机在岩性识别中的应用[J]. 计算机工程与设计, 2010, 31(9): 2010-2012.
- Cai L, Cheng J G, Pan H X. Lithologic identification based on ELM [J]. Computer Engineering and Design, 2010, 31(9): 2010-2012.
- [18]Huang G B, Zhu Q Y, Siew C K. Extreme learning machine: A new learning scheme of feedforward neural networks[C]//Proceedings of 2004 IEEE International Joint Conference on Neural Networks. Budapest, Hungary: IEEE, 2004.
- [19]白烨, 薛林福, 潘保芝, 等. 多方法融合判别复杂砂砾岩岩性[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2012, 42(S2): 442-451.
- Bai Y, Xue L F, Pan B Z, et al. Multi-methods combined identify lithology of glutenite [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2012, 42(S2): 442-451.
- [20]黄隆基. 放射性测井原理[M]. 北京: 石油工业出版社, 1985: 66-79.
- Huang L J. Principle of radioactive logging [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1985: 66-79. (in Chinese)

(上接第 484 页/Continued from Page 484)

- [19]李修成, 马致远, 张雪莲, 等. 陕西省关中盆地东大地热田成因机制分析[J]. 中国地质, 2016, 43(6): 2082-2091.
- Li X C, Ma Z Y, Zhang X L, et al. Genetic model of the Dongda geothermal field in Guanzhong Basin, Shaanxi Province[J]. Geology in China, 2016, 43(6): 2082-2091.
- [20]章旭, 郝红兵, 刘康林, 等. 西藏沃卡地堑地下热水水文地球化学特征及其形成机制[J]. 中国地质, 2020, 47(6): 1702-1714.
- Zhang X, Hao H B, Liu K L, et al. Hydrogeochemical characteristics and genetic model of Oiga graben geothermal waters system in Tibet [J]. Geology in China, 2020, 47(6): 1702-1714.
- [21]隋少强, 汪新伟, 周总瑛, 等. 天津岩溶地热田热储特征研究[J]. 地质与资源, 2019, 28(6): 590-594, 569.
- Sui S Q, Wang X W, Zhou Z Y, et al. Study on the thermal reservoir characteristics of karst geothermal fields in Tianjin city [J]. Geology and Resources, 2019, 28(6): 590-594, 569.