

基于经验模态分解和能量熵判别的火成岩岩性识别方法 ——以春风油田石炭系火成岩储层为例

韩玉娇¹,袁超¹,范宜仁²,葛新民²,范卓颖³,杨文超⁴

[1. 中国石油勘探开发研究院 测井与遥感所,北京 100080; 2. 中国石油大学(华东) 地球科学与技术学院,山东 青岛 266580;
3. 中国石油大学(北京) 地球科学学院,北京 102249; 4. 中国石化胜利石油工程有限公司测井公司,山东 东营 257096]

摘要:火成岩储层具有“喷发模式多样化、岩性成因多元化、矿物组合多变化”的特征,岩性精细识别难度大,严重制约了储层参数的计算及后续油气开发。以准噶尔盆地春风油田石炭系储层为例,结合岩心和薄片等分析测试资料将储层发育的岩性分为5类:玄武岩、玄武质安山岩、安山岩、凝灰岩和火山角砾岩。在明确不同岩性测井响应特征的基础上,采用“逐级剥离”的思想,利用交会图法识别出了凝灰岩和火山角砾岩。针对较难识别的火山熔岩,引入经验模态分解算法将常规测井资料转化为多个频带的本征模态函数集,得到了各熔岩不同测井参数经验模态函数的能量熵,应用判别算法实现了火成岩岩性的精细识别。区块应用结果表明:该方法岩性识别整体符合率高达93.7%,有效提高了岩性识别精度。

关键词:经验模态分解;能量熵;岩性识别;火成岩;春风油田

中图分类号:TE122.2 **文献标识码:**A

Identification of igneous reservoir lithology based on empirical mode decomposition and energy entropy classification: A case study of Carboniferous igneous reservoir in Chunfeng oilfield

Han Yujiao¹, Yuan Chao¹, Fan Yiren², Ge Xinmin², Fan Zhuoying³, Yang Wenchao⁴

[1. Department of Well Logging and Remote Sensing Technology, PetroChina Research Institute of Petroleum Exploration and Development, Beijing 100080, China; 2. School of Geosciences, China University of Petroleum (East China), Qingdao, Shandong 266580, China;
3. College of Geosciences, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China; 4. Shengli Well Logging Co. Ltd., SINOPEC, Dongying, Shandong 257096, China]

Abstract: Igneous reservoirs are characterized by diversity of eruption patterns and lithology geneses, and variation in mineralogy assemblage. It is really difficult to identify lithology in details, which in turn will greatly hinder the correct calculation of reservoir parameters, as well as subsequent hydrocarbon development strategies. Therefore, the study took a case study of the carboniferous igneous reservoirs in Chunfeng oilfield, Junggar Basin. The lithological categories of the reservoirs are basalt, basaltic andesite, andesite, tuff and volcanic breccias. A combination of core, thin section and other tests' data were used in the study. Then the logging response characteristics of different lithologies were clarified. The tuff and volcanic breccia were identified with the cross plot technique and “progressive stripping” concept. For the hard-to-identify volcanic lava, we used the empirical mode decomposition algorithm to convert the conventional logging data into multiple band sets of intrinsic mode functions, and attained the energy entropy of empirical mode function of various logging parameters for lavas. Then the precise identification of igneous lithologies was realized by using the discriminant algorithm. In applying the method to the block, we found that the overall matching rate of the proposed method is 93.7%, which has greatly improved the accuracy of lithological identification.

Key words: empirical mode decomposition, energy entropy, lithology identification, igneous rock, Chunfeng oilfield

收稿日期:2017-08-29;修订日期:2018-06-25。

第一作者简介:韩玉娇(1990—),女,博士研究生,测井方法原理与储层解释评价。E-mail:524167987@qq.com。

基金项目:中国石油天然气集团公司科学研究与技术开发项目(2015A-3601)。

随着世界对油气资源需求量的持续增加,火成岩油气藏越来越受到大家的重视^[1-3]。由于岩浆的性质、不同喷发模式及后期构造成岩作用等影响,该类储层岩性和岩相复杂多样,纵横向变化大,岩性识别较为困难,提高岩性识别符合率一直是火成岩储层评价中的一个难题。应用最为广泛的岩性识别方法是利用常规测井响应和力学参数等做交会图^[4-5],但简单的交会图法反映的信息有限,识别精度还有待提高。在此基础上发展了深入挖掘测井响应信息的数学识别方法,主要包括主成分分析法、Fisher 判别法、神经网络法和支撑向量机等^[6-9]。该类方法识别精度相对提高,但其适用性很大程度上取决于样本的代表性。随着成像测井和元素测井技术的广泛应用,可以通过识别岩石的矿物成分、结构和构造等建立相应的识别图版,可大幅度提高测井岩性识别的解释精度^[10-12],但该类方法由于成本较高难以普及。

EMD(经验模态分解)是一种新型自适应信号处理方法。依据数据自身的时间尺度特征将复杂信号分解成一系列表征时间尺度的分量,与小波变换、傅里叶变换具有本质差别,在处理非平稳随机信号上具有独特优势^[13-14]。本文针对准噶尔盆地石炭系火成岩储层岩性复杂多样、常规测井识别难度大的问题,引入了

EMD 算法,对测井曲线处理得到岩性的敏感信号,从而实现火成岩岩性的精确识别。

1 火成岩岩相特征及岩性分类

准噶尔盆地西北缘由于多期的火山活动、构造运动等因素的影响,该区内部普遍发育多期次岩性与岩相旋回现象(图1)^[15]。依据岩石的成分和结构,结合该区的薄片、岩心鉴定以及元素测井等资料可将准噶尔盆地石炭系主要发育的岩性分为两大类:火山熔岩(玄武岩、玄武质安山岩和安山岩)和火山碎屑岩(凝灰岩和火山角砾岩)。岩性的发育主要受控于不同的火成岩岩相,火山熔岩主要发育在溢流相,以中基性为主,从基性的玄武岩到中性的安山岩, SiO_2 含量依次增加;凝灰岩发育在火山沉积相,以中酸性为主;火山角砾岩主要发育在爆发相,以中基性为主。

2 火成岩测井响应特征

依据研究区 26 口有准确薄片定名及取心验证的火成岩井段信息,对玄武岩、玄武质安山岩、安山岩、凝灰岩和火山角砾岩 5 类岩性的常规测井、成像、岩心及

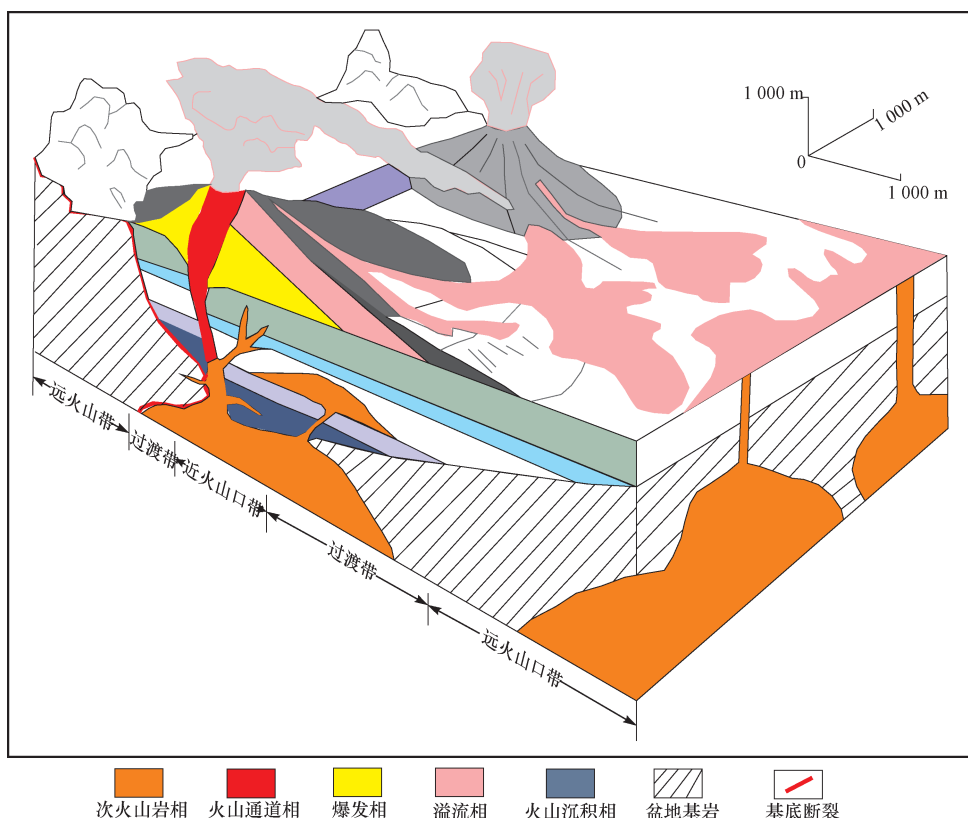


图1 准噶尔盆地西北缘火山机构及喷发模式

Fig. 1 Volcanic edifice and eruption pattern in the northwestern margin of the Junggar Basin

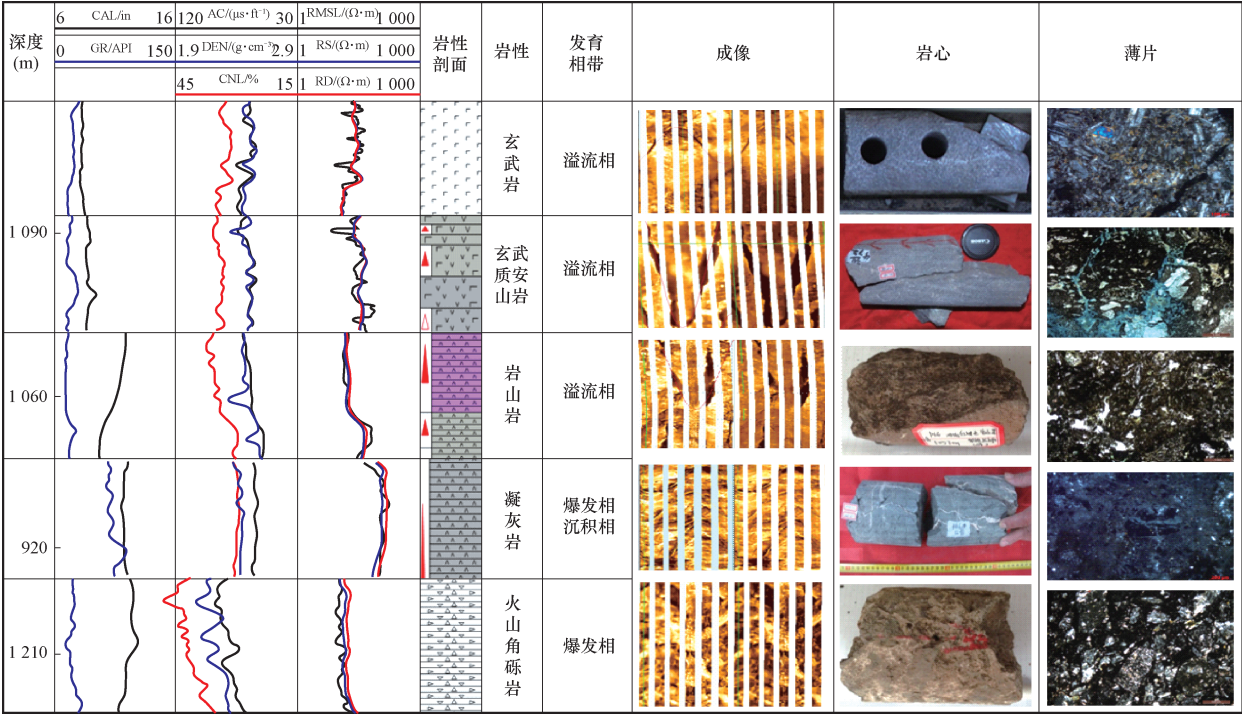


图 2 春风油田 5 类火山岩测井特征综合图

Fig. 2 Logging characteristics of five kinds of volcanic rocks in Chunfeng oilfield

薄片特征进行了分析(图 2)。玄武岩岩心较致密,成像显示为块状构造,裂缝较为发育,镜下薄片显示多为斑状结构,矿物以基性斜长石、辉石和隐晶质为主,孔

隙多为溶蚀、粒间孔隙;玄武质安山岩溶蚀和裂缝均较发育,镜下薄片显示岩石多具斑状结构,斑晶多为斜长石和辉石等,基质呈间隐结构,见杏仁构造,充填方解石、沸石等矿物;安山岩溶蚀和裂缝十分发育,镜下薄片显示岩石呈交织结构,主要矿物为斜长石和少量辉石组成,局部有绿泥石充填,气孔和基质溶孔较为发育;凝灰岩岩心较致密,发育少量裂缝,镜下薄片显示凝灰结构和碎屑结构,孔隙空间主要为粒间孔隙、粒间收缩缝,部分被沥青充填;火山角砾岩具角砾和碎屑结构,基质以凝灰质为主,角砾多为安山、玄武岩等岩屑组成,岩心及成像测井显示溶蚀孔隙最为发育。

表 1 春风油田不同岩性常规测井值分布范围

Table 1 Distribution of conventional logging values for different lithologies in Chunfeng oilfield

岩性	GR/API	CNL/ %	DEN/ (g·cm ⁻³)	AC/ (μs·ft ⁻¹)	RD/ (Ω·m)
玄武岩	10~40	5~30	2.4~2.8	45~80	7~120
玄武质安山岩	10~40	10~30	2.4~2.7	55~80	20~51
安山岩	10~50	5~35	2.4~2.8	55~80	14~103
凝灰岩	50~90	5~35	2.3~2.8	55~70	86~1630
火山角砾岩	10~30	35~55	2.0~2.4	85~100	13~21

结合不同岩性常规测井响应分布范围和交会图可知(表 1;图 3),凝灰岩的自然伽马值呈明显的高

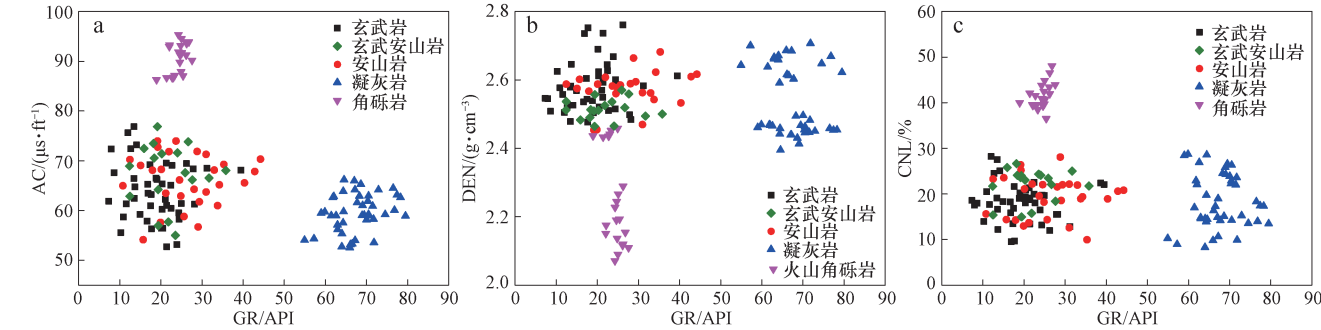


图 3 春风油田 5 类火成岩常规测井响应交会图

Fig. 3 Cross plot of conventional logging response of five types of igneous rocks in Chunfeng oilfield

a. GR - AC 交汇图; a. GR - DNE 交汇图; a. GR - CNL 交汇图

值(50~90 API),火山角砾岩表现为低密度值(2~2.4 g/cm³)、高中子值(35%~55%)和高声波值(85~100 μs/ft)的特征。这两种岩性的常规测井响应特征与其他岩性存在较大的差异,在交会图上较易区分。而火山熔岩类(玄武岩、玄武质安山岩和安山岩)各种测井响应值较为接近,交会图上显示为大面积的重叠,且3类火山熔岩在成像测井图上均呈块状构造特征,依靠主要对火成岩结构进行区分的成像测井也难以对火山熔岩进行准确识别。

3 火成岩岩性识别方法建立

基于以上分析,本文采用“逐级剥离”的思想,先利用交会图法识别出凝灰岩和火山角砾岩。对于火山熔岩,采用经验模态分解及能量熵判别算法进行识别,下面对岩性识别方法的建立进行详细阐述。

3.1 测井信号的经验模态分解

经验模态分解法(EMD)是一种新型自适应信号时频处理方法,其目的是将非线性、非平稳信号分解为有限个表征信号特征时间尺度的固有模态函数之和,得到具有明显物理意义的瞬时频率,已广泛应用于机械^[16]、地震^[17]和航空遥感^[18]等学科。

本研究引入经验模态分解算法对火山熔岩的测井曲线进行处理,以期得到对岩性敏感的信号。首先找出原始信号 $s(t)$ 所有的极大值和极小值点,用3次样条函数拟合出原始信号的包络线。并计算包络线的均值,记为 $m_1(t)$,那么原信号的第1个本征模态函数(IMF)可写为:

$$h_1(t) = s(t) - m_1(t) \quad (1)$$

理论上, $h_1(t)$ 是1个IMF,一般不满足IMF分量条件。为此,对 $h_1(t)$ 重复进行上述过程 k 次,直到 $h_1(t)$ 符合IMF的定义要求,所得到的均值趋于零为止,这样就得到了第1个IMF分量 $c_1(t)$,它代表信号 $s(t)$ 中最高频率的分量。

$$\begin{aligned} h_{1(k-1)}(t) - m_{1k}(t) &= h_{1k}(t) \\ c_1(t) &= h_{1k}(t) \end{aligned} \quad (2)$$

将 $c_1(t)$ 从 $s(t)$ 中分离出来,即得到一个去掉高频分量的差值信号 $r_1(t)$,即有

$$r_1(t) = s(t) - c_1(t) \quad (3)$$

将 $r_1(t)$ 作为原始信号,重复步骤(1),(2)和(3),得到第2个IMF分量 $c_2(t)$,重复 n 次,得到 n 个IMF分量,这样就有

$$\begin{cases} r_1(t) - c_2(t) = r_2(t) \\ \vdots \\ r_{n-1}(t) - c_n(t) = r_n(t) \end{cases} \quad (4)$$

当 $c_n(t)$ 或 $r_n(t)$ 满足给定的终止条件[通常使 $r_n(t)$ 成为1个单调函数]时,循环结束。由公式(3)和公式(4)可得到

$$s(t) = \sum_{j=1}^n c_j(t) - r_n(t) \quad (5)$$

其中: $r_n(t)$ 为残余函数,代表整个信号的平均趋势; $c_1(t), c_2(t), \dots, c_n(t)$ 为各个IMF分量。

构建EMD分解流程图如图4所示,可以看出模态函数必须满足极值点数目和过0点数目相等或相差1且在任意点处最大最小包络线的均值为0。该条件既保证了数据局部最大值为正,最小值为负,同时也剔除了瞬时频率中波形不对称引起的震荡。

3.2 基于IMF的能量熵计算

首先选取能反应岩性变化的敏感测井曲线:GR, DEN, CNL, AC和RD。对各测井信号 $s(t)$ 分别进行上述经验模态分解后,可得到一系列的固有模态函数(IMF),且每个IMF包括一个残余函数 $r_n(t)$ 和 n 个IMF分量 $c_1(t), c_2(t), \dots, c_n(t)$ ^[19]。分解得到的各个

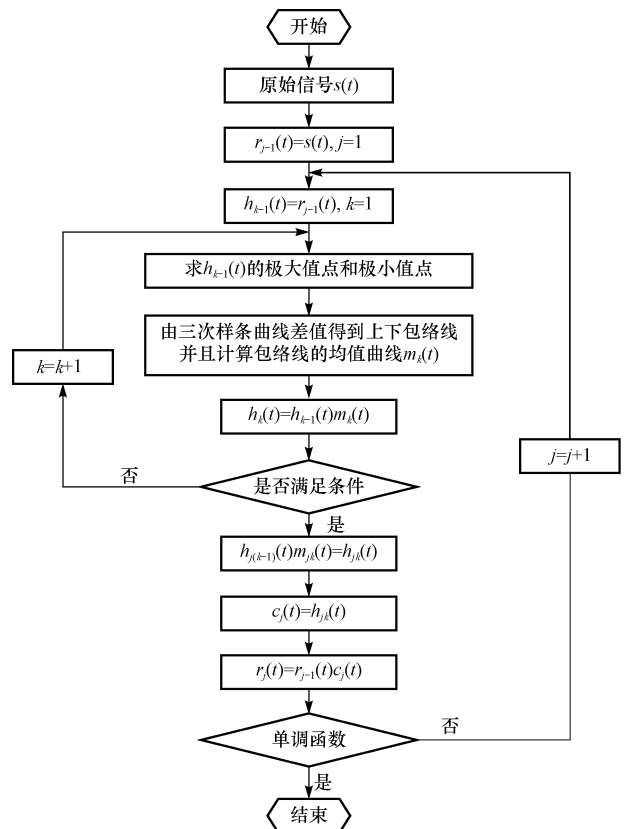


图4 EMD分解流程

Fig. 4 A flow chart of EMD decomposition

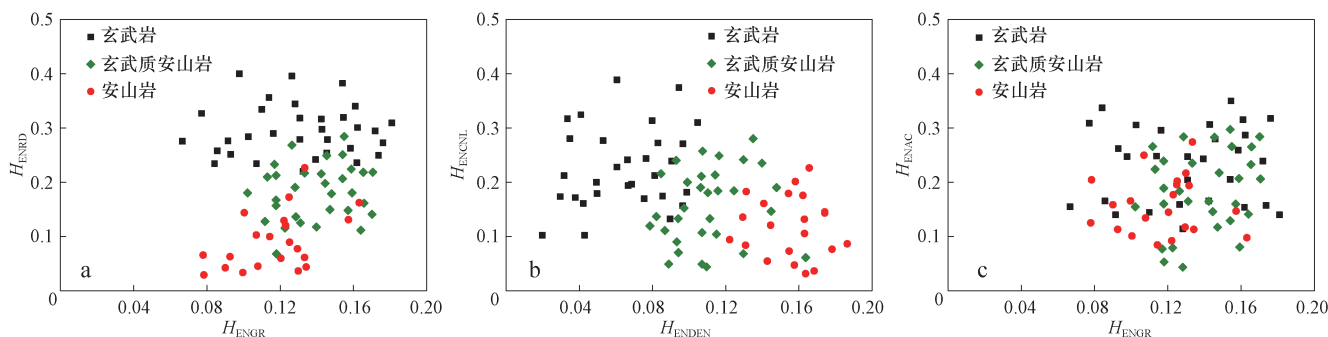


图5 春风油田不同岩性经验模态能量熵计算结果

Fig. 5 Energy entropy calculation results for different lithologic empirical modes in Chunfeng oilfield

a. 伽马和电阻率经验模态能量熵交会图; b. 密度和中子经验模态能量熵交会图; c. 伽马和声波经验模态能量熵交会图

IMF 分量既包含了原始信号的局部特征,也包含了不同的特征时间尺度信息从而通过不同分辨率表达信号的特征信息并精确地给出信号能量随频率和时间的联合分布情况^[20]。

IMF 分量的能量 E_i 则可以由式(6)计算得到,

$$E_i = \int |c_i(t)|^2 dt, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (6)$$

由于 EMD 分解的正交性,在忽略残余量 $r_n(t)$ 的情况下, n 个 *IMF* 的分量能量之后等于原始信号 $s(t)$ 的总能量。 n 个 *IMF* 分量分别包含了不同的频率成分,即 *IMF* 的能量向量 $E = [E_1, E_2, \dots, E_n]$ 是单一测井信号能量在频率域的一种自动划分。将上面的能量向量做归一化处理,则有:

$$E' = [p_1, p_2, \dots, p_n] \quad (7)$$

其中: $E = \left(\sum_{i=1}^n E_i^2 \right)^{1/2}$; $p_i = E_i / E$; $i = 1, 2, \dots, n$; p_i 反应了每一个 *IMF* 在总能量中所占的权重。

从而可以将该测井信号的模态能量熵定义为:

$$H_{EN} = - \sum_{i=1}^n p_i \lg p_i \quad (8)$$

表2 春风油田不同岩性经验模态能量熵分布

Table 2 Distribution of energy entropy in different lithologies' empirical modes in Chunfeng oilfield

岩性	H_{ENGR}	H_{ENAC}	H_{ENDEN}	H_{ENCL}	H_{ENRD}
玄武岩	0.06 ~ 0.18 0.13	0.11 ~ 0.35 0.23	0.02 ~ 0.10 0.06	0.10 ~ 0.39 0.23	0.22 ~ 0.40 0.30
玄武质安山岩	0.10 ~ 0.17 0.14	0.04 ~ 0.30 0.18	0.08 ~ 0.16 0.11	0.04 ~ 0.28 0.15	0.07 ~ 0.28 0.18
安山岩	0.07 ~ 0.16 0.12	0.08 ~ 0.27 0.17	0.12 ~ 0.18 0.15	0.04 ~ 0.30 0.17	0.02 ~ 0.22 0.09

注: $\frac{A \sim B}{C}$ 中, A 为最小值, B 为最大值, C 为平均值。

在岩心刻度测井的基础上,选取工区 87 个典型岩性段(玄武岩 31 个,玄武质安山岩为 34 个,安山岩为 22 个)的测井数据进行计算,得到自然伽马、声波、密度、中子和深侧向电阻率经验模态能量熵,分别表示为: H_{ENGR} , H_{ENAC} , H_{ENDEN} , H_{ENCL} 和 H_{ENRD} (表 2)。总体来说, H_{ENGR} , H_{ENDEN} , H_{ENCL} 和 H_{ENRD} 对岩性的变化较为敏感,但 H_{ENAC} 对岩性的区分效果一般。图 5 为 3 种熔岩的能量熵交会图。对比可知,不同岩性在能量熵交会图中的分布特征较为明显,所提取的能量熵对不同岩性具有较好的表征能力。

3.3 岩性识别标准的建立及应用

引入判别算法对火山熔岩的能量熵矩阵 $X = [H_{ENGR}, H_{ENCL}, H_{ENDEN}, H_{ENRD}]$ 进行判别分析,得到每类岩性的判别模式,最终通过程序语言实现火成岩岩性的自动判别。

图 6 是经主成分分析降维后,得到的第一、第二主成分的二维投影,不同岩性在交会图中分布区域界线明显,质心分离显著,该图版对随机样本的 87

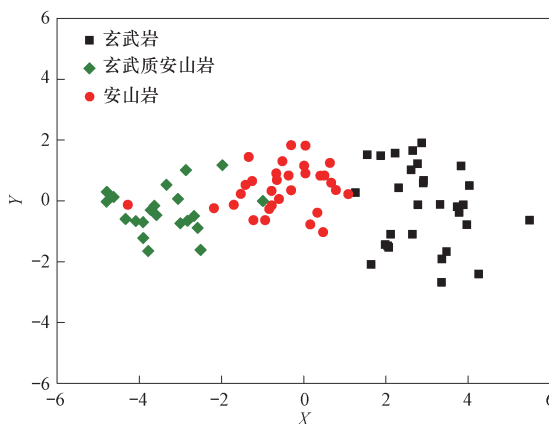


图6 春风油田熔岩主成分分析二维投影图

Fig. 6 Two-dimensional projection of lava principal component analysis in Chunfeng oilfield

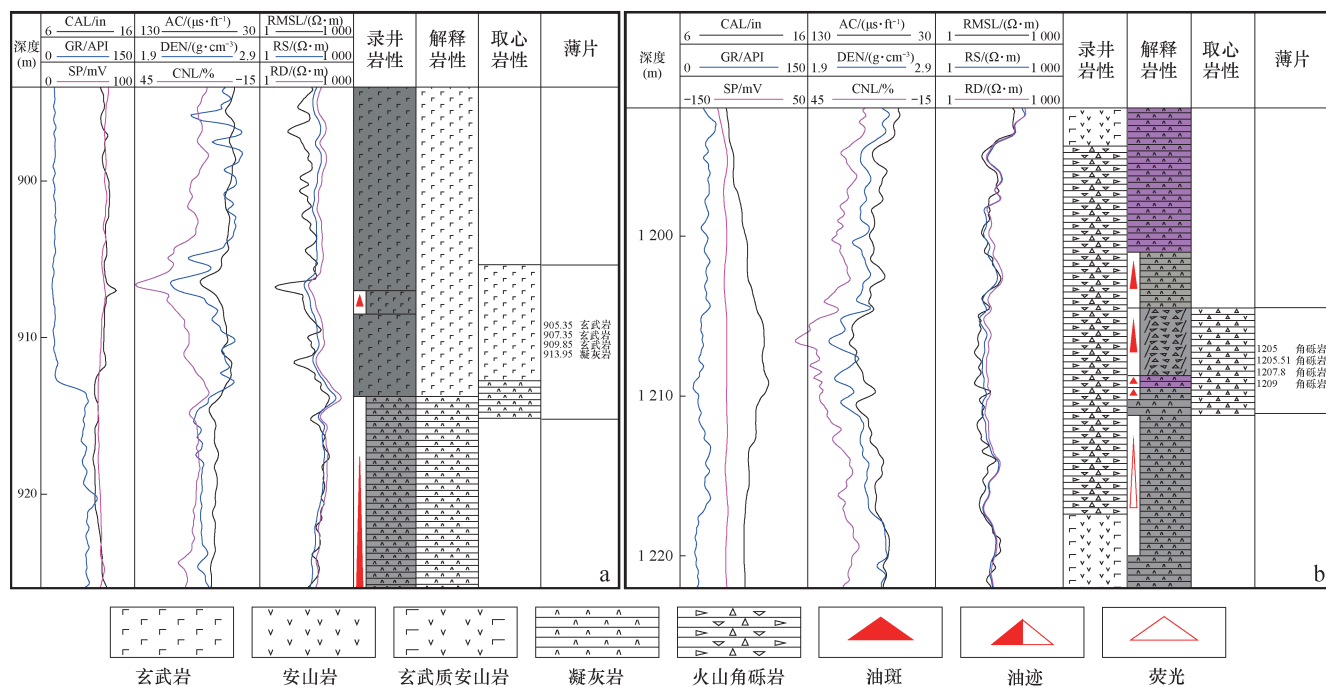


图7 春风油田岩性综合识别效果

Fig. 7 Comprehensive identification plot of lithologies in Chunfeng oilfield

a. 玄武岩和凝灰岩; b. 火山角砾岩

个数据点回判正确率高达96.5%,说明结合Fisher判别法可以有效的进行岩性划分。3类岩性的判别公式如下(F_1 , F_2 和 F_3 分别代表玄武岩、玄武质安山岩和安山岩):

$$F_1 = 169.53H_{ENGR} + 120.61H_{ENCNL} + 46.24H_{ENDEN} + 103.46H_{ENRD} - 36.73 \quad (9)$$

$$F_2 = 198.30H_{ENGR} + 230.38H_{ENCNL} + 26.36H_{ENDEN} + 55.00H_{ENRD} - 34.78 \quad (10)$$

$$F_3 = 175.96H_{ENGR} + 332.57H_{ENCNL} + 13.41H_{ENDEN} + 20.69H_{ENRD} - 39.01 \quad (11)$$

将未参与建模的另外48个样本点进行判别分析,仅有3个样本点判别错误,各岩性平均解释符合率达93.7%。识别效果如图7所示,解释岩性与岩心和薄片的定名结果均较一致。说明应用该方法岩性判识的可信度较高。将本次研究成果应用于地质研究,同区域认识吻合,为后续深入解释评价提供了有力支撑。

4 结论

1) 识别凝灰岩最为敏感的曲线是GR曲线,AC, CNL及DEN测井曲线对火山角砾岩的识别均较敏感,火山熔岩类(玄武岩、玄武质安山岩和安山岩)从常规

测井和成像测井都较难区分。

2) EMD经验模态分解在处理非平稳随机信号上具有独特优势,该方法摒弃了以往大都依靠单层取值的不确定性,更加细致地提取了层内测井响应的变化规律,为复杂岩性地层的测井解释开辟了新的思路。

3) 该方法在解决火成岩岩性识别问题中取得了较好的地区应用效果,岩性解释符合率高于93%,有效地提高了火成岩岩性识别的精度。

参考文献

- [1] 石磊,李书兵,黄亮,等.火山岩储层研究现状与存在的问题[J].西南石油大学学报(自然科学),2009,31(5):68-72.
Shi Lei, Li Shubing, Huang Liang, et al. Current research situation and the problems of volcanic rock reservoirs[J]. Journal of South west Petroleum University (Science & Technology Edition), 2009, 31(5):68-72.
- [2] 江怀友,鞠斌山,江良冀,等.世界火成岩油气勘探开发现状与展望[J].特种油气藏,2011,18(2):1-6,135.
Jiang Huaiyou, Ju Binshan, Jiang Liangji, et al. Current situation and prospect of global igneous reservoir exploration and development[J]. Special Oil and Gas Reservoirs, 2011, 18(2):1-6, 135.
- [3] 卫平生,潘建国,谭开俊,等.世界典型火成岩油气藏储层[M].北京:石油工业出版社,2015.
Wei Pingsheng, Pan Jianguo, Tan Kaijun, et al. Typical oil & gas res-

- ervoirs of igneous rocks in the World[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2015.
- [4] Sanyal S K, Juprasert S, Jusbasche M. An evaluation of rhyolite-basalt-volcanic ash sequence from well logs[R]. Tulsa, Oklahoma: SPWLA 20th Annual Logging Symposium, 1979.
- [5] Khatchikian A. Log evaluation of oil-bearing igneous rocks[R]. Corpus Christ, Texas: SPWLA 23th Annual Logging Symposium, 1982.
- [6] 赵武生, 谭伏霖, 王志章, 等. 准噶尔盆地腹部火成岩岩性识别[J]. 天然气工业, 2010, 30(2): 21–25.
- Zhao Wusheng, Tan Fulin, Wang Zhizhang, et al. Identification of the lithology of igneous rocks in central of the Junggar Basin[J]. Natural Gas Industry, 2010, 30(2): 21–25.
- [7] 潘保芝, 闫桂京, 吴海波. 对应分析确定松辽盆地北部深层火成岩岩性[J]. 大庆石油地质与开发, 2003, 22(1): 7–9.
- Pan Baozhi, Yan Guijing, Wu Haibo. Determining lithology of igneous rocks in deep northern songliao basin using correspondence analysis[J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2003, 22(1): 7–9.
- [8] 朱怡翔, 石广仁. 火山岩岩性的支持向量机识别[J]. 石油学报, 2013, 34(2): 312–322.
- Zhu Yixiang, Shi Guangren. Identification of lithologic characteristics of volcanic rocks by support vector machine[J]. Acta Petrolei Sinica, 2013, 34(2): 312–322.
- [9] 张平, 潘保芝, 张莹, 等. 自组织神经网络在火成岩岩性识别中的应用[J]. 石油物探, 2009, 48(1): 53–56.
- Zhang Ping, Pan Baozhi, Zhang Ying, et al. Application of self-organization maps network in identifying the lithology of igneous rock[J]. Geophysical Prospecting for petroleum, 2009, 48(1): 53–56.
- [10] 刘传平, 郑建东, 杨景强. 徐深气田深层火山岩测井岩性识别方法[J]. 石油学报, 2006, 27: 62–65.
- Liu Chuanping, Zheng Jiandong, Yang Jingqiang. Lithology identification of well logging for deep volcanic reservoir in XUshen Gas Field[J]. Acta Petrolei Sinica, 2006, 27: 62–65.
- [11] 谭伏霖, 王志章, 隆山, 等. 准噶尔盆地滴西地区火成岩岩性识别方法研究[J]. 石油天然气学报(江汉石油学院学报), 2011, 33(4): 92–95.
- Tan Fulin, Wang Zhizhang, Long Shan, et al. Igneous rock lithologic identification in Dixi area of Jungger Basin[J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2011, 33(4): 92–95.
- [12] 陈钢花, 范宜仁, 代诗华. 火山岩储层测井评价技术[J]. 中国海上油气(地质), 2000, 14(6): 422–428.
- Chen Ganghua, Fan Yiren, Dai Shihua. An evaluation technique for Volcanic Reservoir using well logging data[J]. China Offshore Oil and Gas(Geology), 2000, 14(6): 422–428.
- [13] Huang N E, Shen Z, Long S R, et al. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis[J]. Mathematical Physical & Engineering Sciences, 1998, 454(1971): 903–995.
- [14] 徐小刚, 徐冠雷, 王孝通, 等. 经验模式分解(EMD)及其应用[J]. 电子学报, 2009, 37(3): 581–585.
- Xu Xiaogang, Xu Guanlei, Wang Xiaotong, et al. Empirical mode decomposition and its application[J]. Acta Electronica Sinica, 2009, 37(3): 581–585.
- [15] 刘喜顺, 许杰, 张晓平. 准噶尔盆地西北缘石炭系火山岩岩相特征及相模式[J]. 新疆地质, 2010, 28(1): 73–76.
- Liu Xishun, Xu Jie, Zhang Xiaoping. The volcano lithology characteristic and facies model in north-west of jungger basin[J]. Xinjiang Geology, 2010, 28(1): 73–76.
- [16] 邵忍平, 曹精明, 李永龙. 基于 EMD 小波阈值去噪和时频分析的齿轮故障模式识别与诊断[J]. 振动与冲击, 2012, 31(8): 96–101.
- Shao Renping, Cao Jingming, Li Yonglong. Gear fault pattern identification and diagnosis using time-frequency analysis and wavelet threshold de-noising based on EMD[J]. Journal of Vibration And Shock, 2012, 31(8): 96–101.
- [17] 钱昌松, 刘代志, 刘志刚, 等. 基于递归高通滤波的经验模态分解及其在地震信号分析中的应用[J]. 地球物理学报, 2010, 53(5): 1215–1225.
- Qian Changsong, Liu Daizhi, Liu Zhigang, et al. EMD based on recursive high pass filter and application on seismic signal analysis[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2010, 53(5): 1215–1225.
- [18] 孔丁科, 汪国昭. 基于 EMD 的快速活动轮廓图像分割算法[J]. 电子与信息学报, 2010, 32: 1094–1099.
- Kong Dingke, Wang Guozhao. Fast active contour model for image segmentation based on EMD[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2010, 32: 1094–1099.
- [19] 杨宇. 基于 EMD 和支持向量机的旋转机械故障诊断方法研究[D]. 湖南大学, 2005.
- Yang Yu. Research on fault diagnosis methods for rotating machinery based on empirical mode decomposition and support vector machine[D]. Hunan University, 2005.
- [20] Loh C H, Wu T C, Huang N E, et al. Application of the empirical mode decomposition: hilbert spectrum method to identify near-fault ground-motion characteristics and structural responses[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2001, 91(5): 1339–1357.

(编辑 张玉银)