石油与天然气地质
第41卷 第4期 OIL & GAS GEOLOGY 2020年8月
文章编号:0253－9985(2020)04－0884－7 doi:10.11743/ogg20200420

基于图论聚类和最小临近算法的岩性识别方法
——以四川盆地西部雷口坡组碳酸盐岩储层为例

孔强夫[1],杨 才[2],李 浩[1],耿 超[3],邓 健[4]

(1. 中国石化 石油勘探开发研究院,北京 100083; 2. 中国石油集团 长城钻探工程有限公司 国际测井公司,北京 100083;
3. 中国石油 西南油气田分公司 蜀南气矿,四川 泸州 646000; 4. 中国石油 华北油田公司 勘探开发研究院,河北 任丘 062552)

摘要: 碳酸盐岩具有非均质性强、岩性变化快和岩石类型复杂的特征,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。以四川盆地西部雷口坡组碳酸盐岩储层为例,结合岩心和薄片等分析测试资料将储层发育的岩性分为8类:藻粘结白云岩、粉晶白云岩、泥晶白云岩、灰质白云岩、白云质灰岩、灰岩、膏质白云岩和石膏,明确了不同岩性的测井响应特征。采用机器学习的思想,将已知岩性定名样本作为训练数据,利用图论聚类分析方法建立岩性识别训练模型,在此基础上结合最小临近算法对未取心井岩性进行预测,实现了不同岩性的精细识别。区块应用结果表明:该方法岩性识别整体符合率高达91.3%,有效提高了岩性识别精度。

关键词: 测井响应; 机器学习; 图论聚类; 最小临近算法; 盲井预测; 岩性识别; 碳酸盐岩; 四川盆地西部
中图分类号: TE135.1 **文献标识码:** A

A lithology recognition method based on multi-resolution graph-based clustering and K-Nearest Neighbor: A case study from the Leikoupo Formation carbonate reservoirs in western Sichuan Basin

Kong Qiangfu[1], Yang Cai[2], Li Hao[1], Geng Chao[3], Deng Jian[4]

(1. *Petroleum Exploration & Production Research Institute, SINOPEC, Beijing* 100083, *China*;
2. *International Well Logging of Great-wall Drilling Company, CNPC, Beijing* 100083, *China*;
3. *Shu'nan Gas Field of Southwest Oil & Gas Field Company, PetroChina, Luzhou, Sichuan* 646000, *China*;
4. *Huabei Oilfield Company, PetroChina, Renqiu, Hebei* 062552, *China*)

Abstract: Carbonate rocks have the characteristics of strong heterogeneity, changing lithology and various rock types, which make it difficult to recognize their fine lithologic features and seriously restrict the calculation of reservoir parameters as well as subsequent oil/gas development. The carbonate reservoirs in the Leikoupo Formation in western Sichuan Basin were studied to deal with the problem. Core and thin slice observation and other analysis results revealed eight distinctive lithologic facies in the reservoirs: the algal bonded dolomite, crystal powder dolomite, dolomicrite, calcite dolomite, dolomitic limestone, limestone, gypsum dolomite and gypsum. Their log responses were also identified. In addition, machine learning was combined with multi-resolution graph-based clustering to establish a lithology identification training model by using the known and named lithologic samples as training data. Subsequently, the lithology of reservoirs in other wells was predicted with the K-Nearest Neighbor, thus realizing a fine identification of different lithologic facies. Field application of the method shows a 91.3% of overall coincidence rate of lithology recognition, indicating an improved accuracy in lithology identification.

Key words: log response, machine learning, graphic clustering, K-Nearest Neighbor, unknown well prediction, lithology identification, carbonate, western Sichuan Basin

---

收稿日期: 2019－04－19; **修订日期:** 2020－06－15。
第一作者简介: 孔强夫(1989—),男,工程师,测井数据处理与综合解释。**E-mail:** kongqf.syky@sinopec.com。
基金项目: 中国科学院A类战略性先导科技专项(XDA14010204);国家自然科学基金项目(41902149)。

雷口坡组是四川盆地重要的勘探层系之一，具有广阔的勘探前景[1-6]。由于川西海相碳酸盐岩地层埋藏深度大，岩性变化快，岩性的准确识别是碳酸盐岩储层评价中的一个关键难题。岩性识别对于储层评价及流体识别至关重要，目前测井岩性识别方法主要有交会图法[7-9]、数据挖掘识别法(主成分分析、Fisher 判别、神经网络及支持向量机)[10-13]和测井新技术识别法(成像测井及元素测井)等[14-18]。其中交会图方法应用最为广泛，但该类方法反映的岩性信息有限，识别精度有待进一步提高。数据挖掘方法相对交会图法识别精度高，但其适用性很大程度上取决于样本的代表性。测井新技术识别方法能够大幅度提高测井岩性识别的解释精度，但该类方法由于成本较高难以普及。

图论聚类(MRGC)是一种新型的机器学习方法，该方法基于最小临近算法(K-Nearest Neighbor，KNN)和图形数据表示的多维点阵图形识别，由于 KNN 较其他方法更适合类域的交叉或重叠较多的样本集[19-23]，因此本文首先针对川西雷口坡组碳酸盐岩储层岩性常规测井识别难度大的问题引入有监督 MRGC 机制，对已知定名岩性进行聚类生成训练模型，然后结合最小临近算法进行外推，对其他未取心井岩性进行全井段预测，从而实现碳酸盐岩岩性精确识别。

1　岩性分类

基于 4 类选样原则：①剔除井眼条件或钻井液质量差的样本；②尽量选择岩心归位好，岩性相对稳定，井眼相对平滑段的样本点；③尽量避免选择薄层和层界面处的样本；④部分岩心破碎结合丢失的样本点需重新归位。依据岩性成分结构特征，薄片和岩心鉴定等资料，将雷口坡组碳酸盐岩岩性归为藻粘结白云岩、粉晶白云岩、泥晶白云岩、灰质白云岩、白云质灰岩、灰岩、膏质白云岩和石膏共 8 大类。

2　常规测井响应特征

岩性对物性有明显的控制作用，白云质含量的多少(膏质白云岩除外)基本决定了储层质量的好与差。其中粉晶白云岩和藻粘结白云岩物性最好，该类岩性孔隙度大部分大于 5%，渗透率大于 $0.1\times10^{-3}\ \mu m^2$，且最容易发育溶蚀孔和裂缝。泥晶白云岩和灰质白云岩孔隙度小于 5%，几乎不发育溶蚀孔，部分储层发育裂缝；白云质灰岩、灰岩、膏质白云岩和石膏物性最差，不发育溶蚀孔，有少量储层发育裂缝，孔隙度大部分小于 2%，渗透率小于 $0.1\times10^{-3}\ \mu m^2$(图 1a)。

绝大部分的藻粘结白云岩、大部分泥晶白云岩和部分粉晶白云岩、灰质白云岩深侧向电阻率(RD)值小于 2 000 Ω·m，中子孔隙度(CNL)值介于 6% ~14%；大部分粉晶白云岩和部分灰质白云岩、少量的泥晶白云岩和藻粘结白云岩深侧向电阻率(RD)值介于 7 000 ~20 000 Ω·m，中子孔隙度(CNL)值介于 5% ~11%；白云质灰岩、灰岩、膏质白云岩和石膏深侧向电阻率(RD)值大于 7 000 Ω·m，中子孔隙度(CNL)值小于 6%(图 1b)。绝大部分藻粘结白云岩和粉晶白云岩伽马(GR)值介于35 ~70 API，声波时差值(AC)大于 49 μs/ft；大部分泥晶白云岩和部分藻粘结白云岩伽马(GR)值大于 70 API，声波时差(AC)值小于 50 μs/ft；白云质灰岩、石膏和部分膏质白云岩伽马(GR)值小于 35 API，声波时差(AC)值大于 50 μs/ft(图 1c)。

3　岩性识别方法建立

MRGC 方法是一种新型的机器学习方法，该方法采用向量空间模型，将优选的模型曲线和预测曲线转

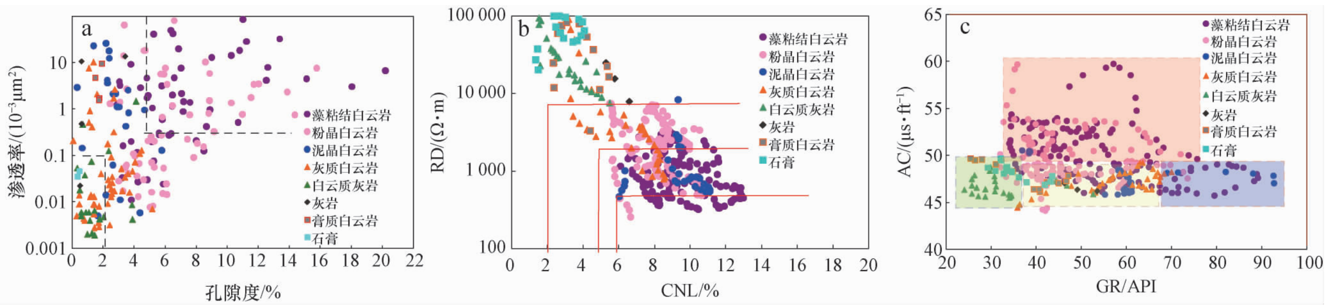

图 1　川西雷口坡组 8 类岩性常规测井响应特征

Fig. 1　Response characteristics of eight lithologic facies in the Leikoupo Formation of western Sichuan Basin during conventional logging

a. 孔隙度－渗透率交会图；b. CNL－RD 交会图；c. GR－AC 交会图

化为由若干个特征组成空间形式($t_1, t_2, \cdots, t_k$),再将各个特征样本在曲线数据上赋予的数值填充到向量空间中。最终一个样本数据 d_j 的数学表示形式为:$w_j(w_{1j}, w_{2j}, \cdots, w_{kj}, \cdots, w_{|T|j})$,其中 w_{kj} 表示特征 t_k 在样本数据 d_j 上的值,$|T|$ 表示特征向量的维数[16]。

设有2个特征向量 $X=(x_1, x_2, \cdots, x_{|T|})$ 和 $Y=(y_1, y_2, \cdots, y_{|T|})$,则2个样本数据之间的相似度采用欧几里德距离来表示,如公式(1)所示:

$$\mathrm{sim}(X,Y)=\frac{\sum_{i=1}^{|T|}x_i y_i}{\sqrt{\sum_{i=1}^{|T|}x_i^2}\cdot\sqrt{\sum_{i=1}^{|T|}y_i^2}} \tag{1}$$

利用高斯函数将公式(1)中计算的距离转换为权重,根据距离的远近对预测结果进行贡献值补偿,再通过每个最近邻乘以相应权重,然后将所得到的结果累加,并除以所有权重值的和,如公式(2)所示:

$$P=\sum_{i=1}^{k}S_i.w_i/\sqrt{\sum_{j=1}^{k}w_j} \tag{2}$$

式中:P 为最终的预测结果;S_i 为 k 个最近邻中的第 i 个;w_i 为 S_i 对应的权重值。

最小临近算法(KNN)是理论上比较成熟的方法,该方法思路是如果1个样本在特征空间中的 k 个最相似(即特征空间中最邻近)的样本中的大多数属于某一个类别,则该样本也属于这个类别。计算这个点与其它所有点之间的距离,取出与该点最近的 k 个点,然后统计这 k 个点里面所属比例最大的,则这点属于该分类。通过KNN算法,可以建立识别岩性聚类图版和测井曲线的联系。

本文引入机器学习的思想,先利用已知准确岩性定名的样本点进行监督,输入测井曲线作为训练数据,利用MRGC对样本数据进行聚类分析生成训练模型,得到不同岩性的聚类图版。为了实现未取心井全井段岩性识别,还需引入KNN算法对按照聚类图版的原则进行岩性预测。图2给出了岩性识别的技术流程。

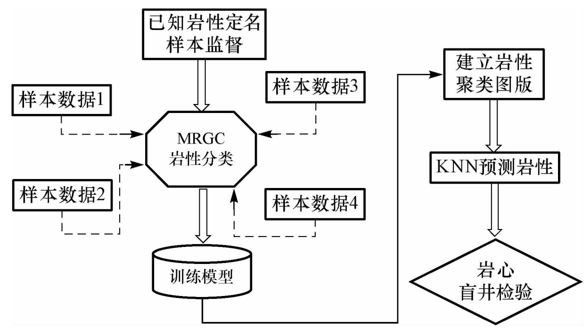

图2 岩性识别技术流程

Fig. 2 Flow chart of lithology identification

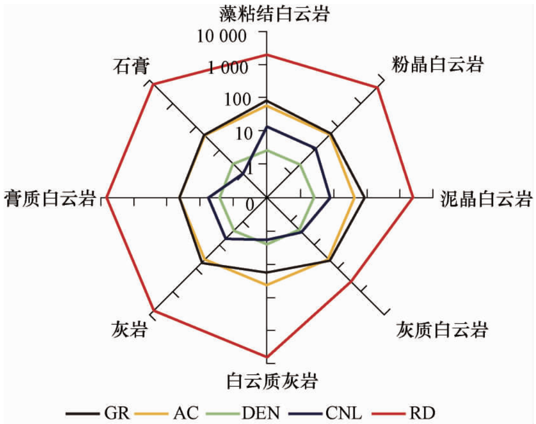

图3 川西雷口坡组8类岩性常规测井值分布范围

Fig. 3 Distribution ranges of conventional log values of eight lithologic facies in the Leikoupo Formation, western Sichuan Basin

图3给出了不同岩性常规测井值分布,可以看出不同岩性的测井响应具有一定的差异这为岩性识别提供了可靠的依据。因此优选了GR,DEN,CNL和RD 4条岩性敏感曲线作为训练数据,利用MRGC方法建立训练模型如图4所示,图5为训练模型得到的岩性识别图版。

基于同刻度分析(将岩性转换为相应的代码符号),利用KNN算法对识别图版进行学习。分别对川西雷口坡组彭州1井、羊深1井、鸭深1井、彭州103井和彭州115井5口井260个样本点进行了单井验证,整体符合率91.3%(表1)证明了该方法的可行性。对于岩性相对稳定,无明显扩径层段,测井识别岩性与薄片定名一致,如图6倒数第三道为藻粘结白云岩(5 785~5 789 m)和粉晶白云岩(5 793~5 798 m)典型镜下照片,倒数第二道(EFAC)为测井识别岩性代号,最后一道(DM)为薄片定名岩性代号,从识别效果来看,整体一致性较好。但在薄片定名样本点少,井况条件差的情况下识别效果较差,如彭州115井6 328.4 m样本点测井识别为灰质白云岩(DM=4),薄片定名为藻粘结白云岩(图7)。整体来看,白云岩类(藻粘结白云岩、粉晶白云岩、泥晶白云岩和灰质白云岩)的识别符合率较灰岩类(白云质灰岩和灰岩)较高(表1)。

4 结论

1)岩性与物性、电性和含气性之间关系密切,岩性的准确识别是储层参数评价及流体识别的基础。

2)白云岩中的藻粘结白云岩和粉晶白云岩物性相对较好,灰岩的物性相对较差,石膏为非储层,中子、密度、电阻率和伽马对不同岩性具有一定的敏感性。

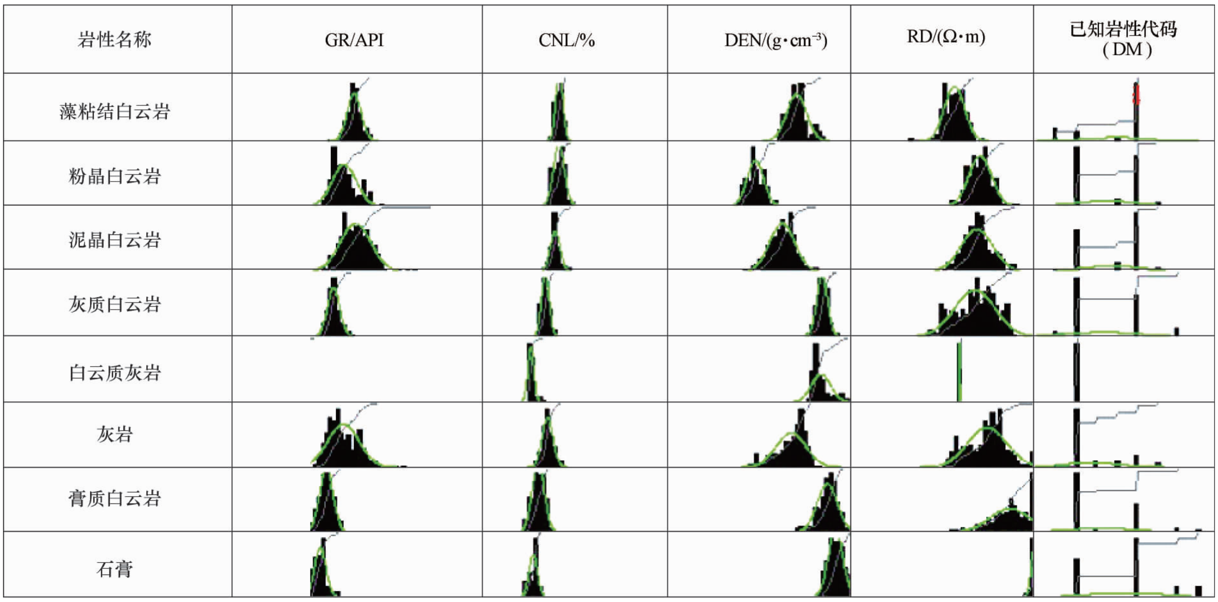

图 4　川西雷口坡组 8 类岩性 MRGC 训练模型

Fig. 4　MRGC training model for eight lithologic facies of the Leikoupo Formation in western Sichuan Basin

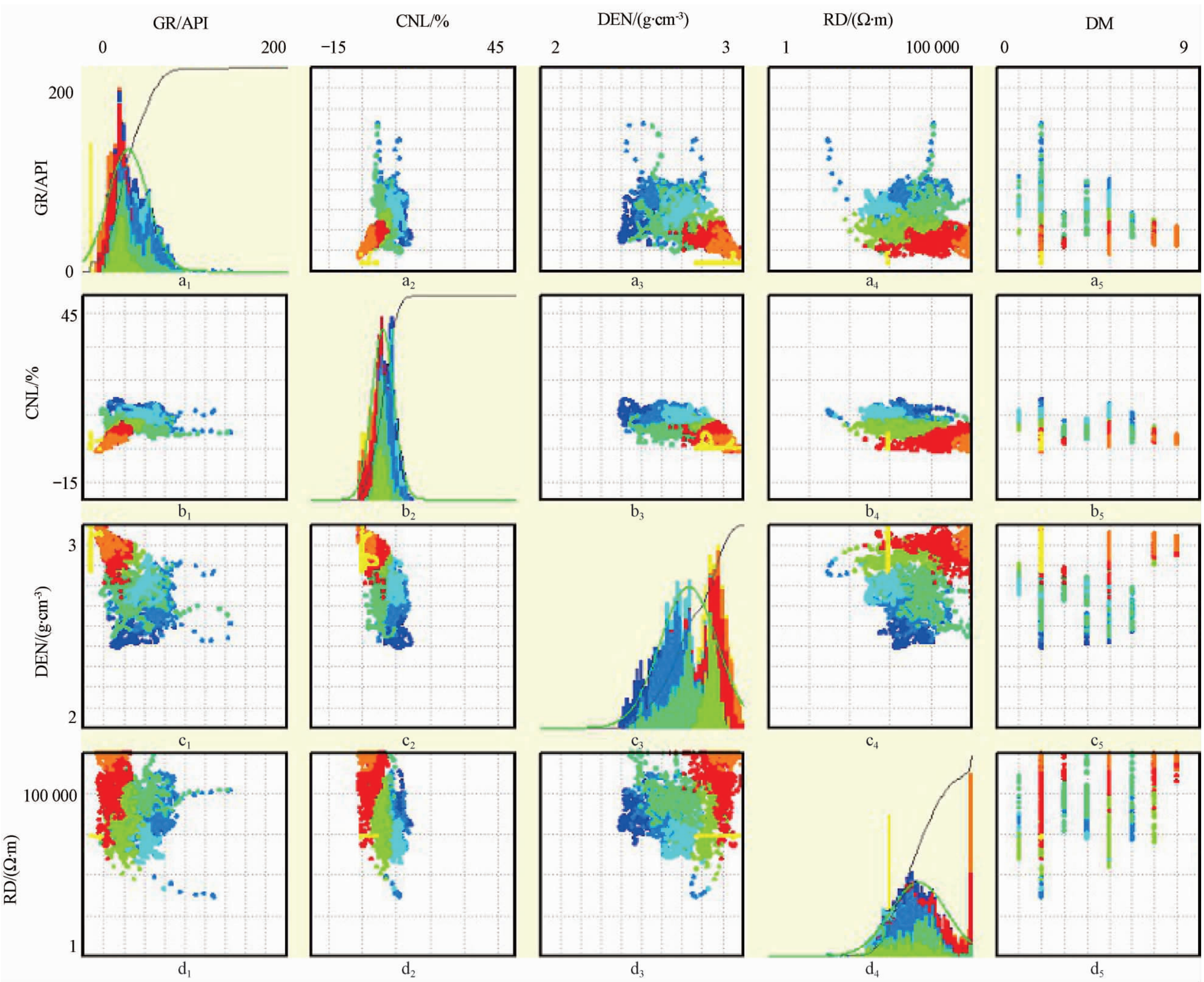

图 5　川西雷口坡组 8 类岩性聚类图版

Fig. 5　Clustering chart of eight lighologic facies in the Leikoupo Formation in western Sichuan Basin

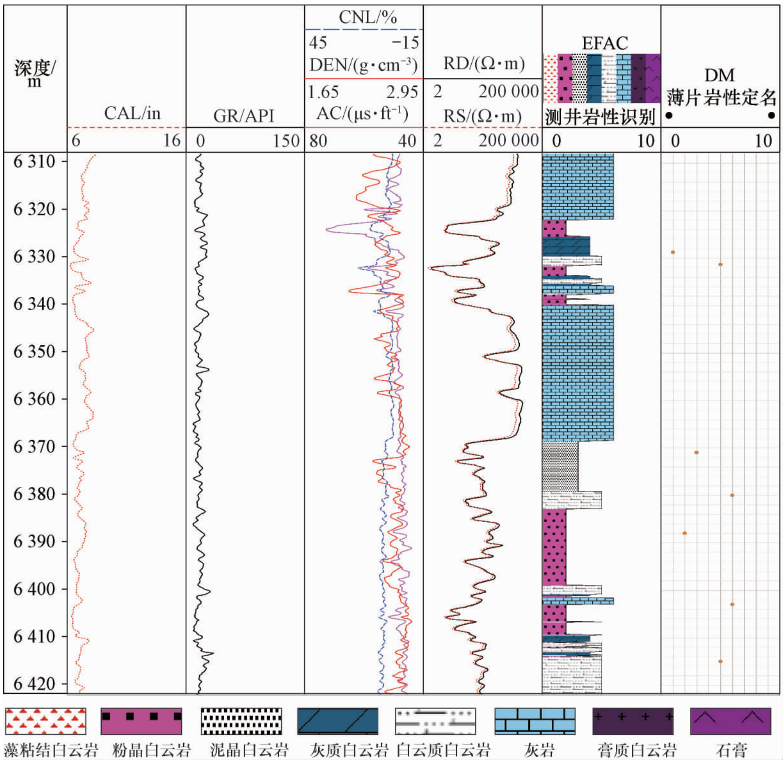

图 6 川西雷口坡组鸭深 1 井(5 770 ~ 5 800 m) 测井岩性识别与薄片定名对比

Fig. 6 Comparison of logging lithology identification and thin slice naming in Well Yashen 1 (5 770 – 5 800 m) in the Leikoupo Formation, western Sichuan Basin

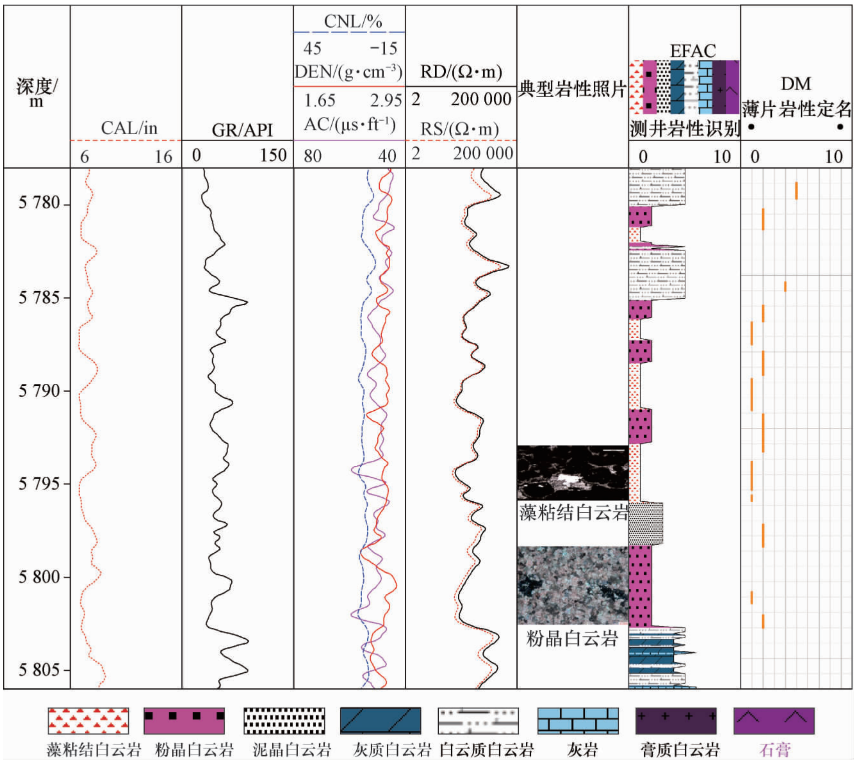

图 7 川西雷口坡组彭州 115 井(6 310 ~ 6 420 m) 测井岩性识别与薄片定名对比

Fig. 7 Comparison of logging lithology identification and thin slice naming in Well Pengzhou 115 (6 310 – 6 420 m) in the Leikoupo Formation, western Sichuan Basin

表 1　测井岩性识别与薄片定名符合率(部分数据)

Table 1　Coincidence rate between logging lithology identification and slice naming(part of data)

井名	顶深/m	测井岩性	薄片定名	是否符合
彭州 1 井	5 820.65	粉晶白云岩	粉晶白云岩	是
彭州 1 井	5 822.77	灰质白云岩	灰质白云岩	是
彭州 1 井	5 824.50	灰质白云岩	白云质灰岩	否
彭州 103 井	5 941.00	灰岩	灰岩	是
彭州 103 井	5 949.00	灰岩	灰岩	是
彭州 103 井	6 023.56	泥晶白云岩	灰质白云岩	否
彭州 103 井	6 043.65	粉晶白云岩	粉晶白云岩	是
彭州 115 井	6 331.36	白云质灰岩	白云质灰岩	是
彭州 115 井	6 371.00	泥晶白云岩	泥晶白云岩	是
彭州 115 井	6 380.00	灰岩	白云质灰岩	否
羊深 1 井	6 202.80	藻粘结白云岩	藻粘结白云岩	是
羊深 1 井	6 202.90	藻粘结白云岩	藻粘结白云岩	是
鸭深 1 井	5 771.50	粉晶白云岩	粉晶白云岩	是
鸭深 1 井	5 771.60	粉晶白云岩	粉晶白云岩	是
白云岩类符合率		94.6%	总体符合率	91.3%
灰岩类符合率		87.2%		

3) 5 口井的测井岩性识别与薄片定名对比效果表明，MRGC 聚类分析结合 KNN 方法在碳酸盐岩复杂岩性识别中具有一定的可行性。

参 考 文 献

[1] 吴世祥，李宏涛，龙胜祥，等. 川西雷口坡组碳酸盐岩储层特征及成岩作用[J]. 石油与天然气地质，2011，32(4)：542－550.
Wu Shixiang，Li Hongtao，Long Shengxiang，et al. A study on characteristics and diagenesis of carbonate reservoirs in the Middle Triassic Leikoupo Formation in western Sichuan Depression[J]. Oil & Gas Geology，2011，32(4)：542－550.

[2] 高恒逸，邓美洲，李勇，等. 川西彭州地区中三叠统雷口坡组四段储层特征及成岩作用[J]. 海相油气地质，2018，23(1)：37－46.
Gao Hengyi，Deng Mei，Li Yong，et al. Diagenesis and reservoir characteristics in the Middle Triassic Lei-4 Member of Leikoupo Formation in Pengzhou area of western Sichuan Basin[J]. Marine Origin Petroleum Geology，2018，23(1)：37－46.

[3] 王琼仙，宋晓波，王东，等. 川西龙门山前雷口坡组四段储层特征及形成机理[J]. 石油实验地质，2017，39(4)：491－497.
Wang Qiongxian，Song Xiaobo，Wang Dong，et al. Reservoir characteristics and formation mechanism of the 4th member of the Leikoupo Formation in Longmen mountain front[J]. Petroleum Geology & Experiment，2017，39(4)：491－497.

[4] 周凌方，钱一雄，宋晓波，等. 四川盆地西部彭州气田中三叠统雷口坡组四段上亚段白云岩孔隙表征、分布及成因[J]. 石油与天然气地质，2020，41(1)：177－188.
Zhou Lingfang，Qian Yixiong，Song Xiaobo，et al. Characteristics，distribution and origin of dolomite reservoir in the upper Lei 4 member of the Middle Triassic，Pengzhou gas field，western Sichuan Basin[J]. Petroleum & Gas Geology，2020，541(1)：177－188.

[5] 陈昱林，曾焱，段永明，等. 川西龙门山前雷口坡组四段白云岩储层孔隙结构特征及储层分类[J]. 石油实验地质，2018，40(5)：621－631.
Chen Yulin，Zeng Yan，Duan Yongming，et al. Pore structure characteristics and reservoir classification of dolomite reservoirs in fourth member of Leikoupo Formation，Longmen Mountain front，western Sichuan Basin[J]. Petroleum Geology & Experiment，2018，40(5)：621－631.

[6] 赵向原，胡向阳，肖开华，等. 川西彭州地区雷口坡组碳酸盐岩储层裂缝特征及主控因素[J]. 石油与天然气地质，2018，39(1)：30－39.
Zhao Xiangyuan，Hu Xiangyang，Xiao Kaihua，et al. Characteristics and major control factors of natural fractures in carbonate reservoirs of Leikoupo Formation in Pengzhou area，western Sichuan Basin[J]. Oil & Gas Geology，2018，39(1)：30－39.

[7] 王晓畅，张军，李军，等. 基于交会图决策树的缝洞体类型常规测井识别方法——以塔河油田奥陶系为例[J]. 石油与天然气地质，2017，38(4)：805－812.
Wang Xiaochang，Zhang Jun，Li Jun，et al. Conventional logging identification of fracture-vug complex types data based on crossplots-decision tree：A case study from the Ordovician in Tahe oilfield，Tarim Basin[J]. Oil & Gas Geology，2017，38(4)：805－812.

[8] Chang S K，Juprasert S，Jusbasche M. An evaluation of a rhyolite-basalt-volcanic ash sequence from well logs[C]. SPWLA 20th Annual Logging Symposium，Tulsa，Oklahorma，1979：SPWLA-1979-TT.

[9] Khatchikian A. Log evaluation of oil-bearing igneous rocks[C]. SPWLA 23th Annual Logging Symposium，Corpus Christ，Texas，1982：SPWLA-1982-AA.

[10] 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.

[11] 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.

[12] 张翔，王智，罗菊兰，等. 基于逐步判别与支持向量机方法的沉积微相定量识别[J]. 测井技术，2010，34(4)：365－369.
Zhang Xiang，Wang Zhi，Luo Julan，et al. Quantitative identification of microfacies based on stepwise discrimination and support vector machine[J]. Well Logging Technology，2010，34(4)：365－369.

[13] 张治国，杨毅恒，夏立显. 自组织特征映射神经网络在测井岩性识别中的应用[J]. 地球物理学进展，2005，20(2)：332－336.
Zhang Zhiguo，Yang Yiheng，Xia Lixian. The application of self-organizing feature map neural network to logging lithological identification[J]. Progress in Geophysics，2005，20(2)：332－336.

[14] 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(B12)：62－65.
Liu Chuanping，Zheng Jiandong，Yang Jingqiang. Lithology identification of well iogging for deep volcanic reservoir in Xushen gas field[J]. Acta Petrolei Sinica，2006，27(B12)：62－65.

[15] 王硕儒，范德江，汪丙柱. 岩相识别的神经网络计算[J]. 沉积学

报,1996,14(4):154-160.

Wang Shuru,Fan Dejiang,Wang Bingzhu. Facies recognition using the neural networks [J]. Acta Sedimentologica Sinica,1996. 14(4):154-160.

[16] 韩玉娇,袁超,范宜仁,等. 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[J]. 石油与天然气地质,2018,39(4):759-765.

Han Yujiao,Yuan Chao,Fan Yiren,et al. Identification of igneous reservoir lithology based on empirical mode decomposition and energy entropy classification: A case study of Carboniferous igneous reservoir in Chunfeng oilfield [J]. Oil & Gas Geology,2018,39(4):759-765.

[17] 李昌,乔占峰,邓兴梁,等. 视岩石结构数技术在测井识别碳酸盐岩岩相中的应用[J]. 油气地球物理,2017,15(1):29-35.

Li Chang,Qiao Zhanfeng,Deng Xingliang,et al. Application of apparent rock structure number technique in identifying carbonate lithofacies by well logging [J]. Geophysics of Oil and Gas,2017,15(1):29-35.

[18] Stowe L,Hock M. Facies analysis and diagenesis from well logs in the Zechstein carbonates of northern Germany [C]. SPWLA 29th Annual Logging Symposium,San Antonio,Texas,1988: SPWLA-1988-HH.

[19] Tanwi B,Kuwait,Robert D,et al. Automated facies estimation from integration of core,petrophysical logs and borehole images [C]. American Association of Petroleum Geologists Annual Meeting,Houston,2002: 1-7.

[20] Pabakhsh M,Ahmadi K,Riahi M A,et al. Prediction of PEF and LITH logs using MRGC approach [J]. Life Science Journal,2012,9(4):974-982.

[21] 吴进波. MRGC方法在储层分类及渗透率精细评价中的应用[J]. 海洋石油,2017,37(1):49-53.

Wu Jinbo. Application of reservoir classification and permeability elaborate evaluation with MRGC method [J]. Offshore Oil,2017,37(1):49-53.

[22] 李艳华,王红涛,王鸣川,等. 基于PCA和KNN的碳酸盐岩沉积相测井自动识别[J]. 测井技术,2017,41(1):57-63.

Li Yanhua,Wang Hongtao,Wang Mingchuan,et al. Automatic identification of carbonate sedimentary facies logging based on PCA and KNNusing Logs [J]. Well Logging Technology,2017,41(1):57-63.

[23] 田雨,徐洪,张兴阳,等. 基于图论多分辨率聚类分析的测井岩相识别研究——以阿姆河盆地台内滩气田为例[J]. 应用地球物理: 英文版,2016(4):598-607.

Tian Yu,Xu Hong,Zhang Xingyang,et al. Multi-resolution graph-based clustering analysis for lithofacies identification from well log data: Case study of intraplatform bank gas fields,Amu Darya Basin [J]. Applied Geophysics,2016(4):598-607.

(编辑 梁 慧)

(上接第823页)

[32] 潘树新,陈彬滔,刘华清,等. 陆相湖盆深水底流改造砂: 沉积特征、成因及其非常规油气勘探意义[J]. 天然气地球科学,2014,25(10):1577-1585.

Pan Shuxin,Chen Bintao,Liu Huaqing,et al. Deepwater bottom current rework sand(BCRS) in lacustrine basins: sedimentary characteristics,identification criterion,formation mechanism and its significance for unconventional oil/gas exploration [J]. Natural Gas Geoscience,2014,25(10):1577-1585.

[33] 邓宏文,钱凯. 深湖相泥岩的成因类型和组合演化[J]. 沉积学报,1990,8(3):1-20.

Deng Hongwen,Qian Kai. The genetic types and association evolution of deep lacustrine facies mudstones [J]. Acta Sedmentologica Sinica,1990,8(3):1-20.

[34] Yang T,Cao Y,Wang Y,et al. Status and Trends in Research on Deep-Water Gravity Flow Deposits [J]. Acta Geologica Sinica(English Edition),2015,89(2):610-631.

[35] Zolitschka B,Francus P,Ojala A E K,et al. Varves in lake sediments-a review [J]. Quaternary Science Reviews,2015,117:1-41.

[36] 陈世悦,张顺,刘惠民,等. 湖相深水细粒物质的混合沉积作用探讨[J]. 古地理学报,2017,19(2):271-284.

Chen Shiyue,Zhang Shun,Liu Huimin,et al. Discussion on mixing of fine-grained sediments in lacustrine deep water [J]. Journal of Palaeogeography,2017,19(2):271-284.

[37] 朱光有,金强,张水昌,等. 济阳坳陷东营凹陷古近系沙河街组深湖相油页岩的特征及成因[J]. 古地理学报,2005,7(1):59-69.

Zhu Guangyou,Jin Qiang,Zhang Shuichang,et al. Characteristics and origin of deep lake oil shale of the Shahejie Formation of Paleogene in Dongying Sag,Jiyang Depression [J]. Journal of Palaeogeography,2005,7(1):59-69.

[38] 马义权,杜学斌,刘惠民,等. 东营凹陷沙四上亚段陆相页岩岩相特征、成因及演化[J]. 地球科学-中国地质大学学报,2017,42(7):1195-1208.

Ma Yiquan,Du Xuebin,Liu Xuebin,et al. Characteristics,depositional processes,and evolution of shale lithofaceis of the upper submember of Es^4 in the Dongying Depression [J]. Earth Science,2017,42(7):1195-1208.

[39] 吴靖,姜在兴,潘悦文,等. 湖相细粒沉积模式——以东营凹陷古近系沙河街组四段上亚段为例[J]. 石油学报,2016,37(9):1080-1089.

Wu Jing,Jiang Zaixing,Pan Yuewen,et al. Lacustrine fine-grained depositional model: a case study of the upper submember of the fourth Member of Paleogene Shahejie Formation in Dongying Sag [J]. Acta Petrolei Sinica,2016,37(9):1080-1089.

[40] 鄢继华,邓远,蒲秀刚,等. 渤海湾盆地沧东凹陷孔二段细粒混合沉积岩特征及控制因素[J]. 石油与天然气地质,2017,38(1):98-109.

Yan Jihua,Deng Yuan,Pu Xiugang,et al. Characteristics and controlling factors of fine-grained mixed sedimentary rocks from the 2nd Member of Kongdian Formation in the Cangdong Sag,Bohai Bay Basin [J]. Oil & Gas Geology,2017,38(1):98-109.

(编辑 卢雪梅)