

Study on Complex Lithology Logging Identification Technology of the Fourth Member of Leikoupo Formation in Yuanba Area

Jie Ren^{1,2}

¹College of Energy Resources, Chengdu University of Technology, Chengdu Sichuan

²Well Logging Branch, Southwest Petroleum Engineering Co. Ltd. of Sinopec, Chengdu Sichuan

Email: 358421899@qq.com

Received: Oct. 31st, 2019; accepted: Nov. 15th, 2019; published: Nov. 22nd, 2019

Abstract

The lithology of Leikoupo Formation in Yuanba area is complex, and the reservoir quality is controlled by the mineral type and lithologic structure. The core mineral analysis data in the study area are few and the logging data are rich, so the accurate identification of its lithology by using logging data is the basis for efficient reservoir evaluation and oil and gas exploration and development research. In this paper, the lithological characteristics of the fourth member of Lei formation in Yuanba area are comprehensively analyzed; the limitations of the intersection method of porosity curve of conventional logging data in identifying the content of siliceous minerals and pyrite and other special minerals in the formation is analyzed, and the PE curve is comprehensively used to eliminate the influence of barite mud and other factors, so as to identify dolomite in a certain way; the lithologic structural characteristics of the formation are analyzed by using the electric imaging logging data, so as to identify complex ones; the element capture logging data to were used to quantitatively calculate the percentage of formation mineral content and accurately draw the formation lithology profile. Finally, by using the principle of combining all kinds of comprehensive logging data, the complex lithology identification and reservoir identification of the fourth member of Leikoupo Formation in Yuanba area are successfully solved, which provides technical support for logging evaluation of the crust of weathering gas reservoir in the fourth member of Leikoupo Formation in Yuanba area.

Keywords

Yuanba Area, The Fourth Member of Leikoupo Formation, Complex Lithology Identification, Conventional Logging, Imaging Logging, Element Capture Logging

元坝地区雷四段复杂岩性测井识别技术研究

任 杰^{1,2}

¹成都理工大学能源学院, 四川 成都

²中石化西南石油工程有限公司测井分公司, 四川 成都

Email: 358421899@qq.com

收稿日期: 2019年10月31日; 录用日期: 2019年11月15日; 发布日期: 2019年11月22日

摘 要

元坝地区雷口坡组岩性复杂, 储层品质受地层矿物类型、岩性结构等因素控制。研究区岩心矿物分析资料较少, 测井资料丰富, 因此利用测井资料准确识别其岩性是进行储层高效评价、油气勘探开发研究的基础。本文综合分析了元坝地区雷四段地层岩性特征, 分析了常规测井资料孔隙度曲线交会法在识别地层硅质矿物含量及黄铁矿等特殊矿物的局限性, 综合利用了PE曲线排除重晶石泥浆等因素影响, 定性识别白云岩; 利用电成像测井资料分析地层岩性构造特征, 识别复杂岩性; 利用元素俘获测井资料, 定量计算地层矿物含量百分数, 准确绘制地层岩性剖面。最终采用各种综合测井资料相结合的原则, 成功解决了元坝地区雷四段地层复杂岩性识别、储层识别等难题, 为元坝地区雷四段风化壳气藏测井评价提供了技术支持。

关键词

元坝地区, 雷四段, 复杂岩性识别, 常规测井, 成像测井, 元素俘获测井

Copyright © 2019 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

由于地质条件的复杂性以及实际地层分布的非均质性, 传统的岩性识别方法已不能满足实际生产需要。自 1982 年 Wolff 等人首次提出根据测井资料自动判定地层岩相的方法以来, 国内外测井工程技术人员, 在利用测井资料信息进行岩性识别方面, 进行了大量的研究与探索, 取得了丰硕的成果, 并在实际中得到了应用。元坝地区构造位置位于南秦岭米仓山推覆构造带南缘、大巴山弧形冲断构造带的西南侧。元坝地区的北侧为九龙山背斜构造带、东北侧为通南巴背斜构造带、西南部为川中隆起。通过沉积特征研究, 结合中三叠系雷口坡组区域沉积背景, 认为研究区雷口坡组沉积相为陆表海型碳酸盐岩台地[1] [2] [3], 总体上处于半干旱-干旱、炎热的气候条件下, 蒸发作用基本上处于主导地位, 以发育局限-蒸发台地相为典型特征, 其中雷四段岩性特征: 深灰、灰色白云岩、含灰质白云岩与灰白色硬石膏岩略等厚互层, 夹灰色残余砂屑白云岩、亮晶砂屑白云岩等各类白云岩。通过岩心分析资料统计, 雷四储层物性较差, 基质孔隙度主要分布在 2% 以下, 渗透率主要集中在 0.01~0.1 Md [4] [5] [6], 由于成岩后期长期处于暴露环境, 风化作用较强, 溶蚀现象发育, 并伴随有较高的泥质含量。雷四主要的储集空间类型有: 残余粒间孔、粒间溶孔为主的类型; 其次是晶间孔和晶间溶孔类型, 除此以外还有裂缝和溶孔[7] [8] [9]。沉积相为: 蒸发台地相的潮坪亚相沉积环境(局部为台内滩、泻湖亚相), 可分为云坪、灰云坪、膏云坪、

膏灰坪及云膏坪等沉积微相，云坪、灰云坪、藻屑滩为有利沉积微相。

2. 岩性识别方法介绍

典型岩性测井响应特征总结：以岩心、岩屑资料为依据，对不同岩性的测井响应特征进行标定，建立标准岩性的测井响应模式。

孔隙度曲线交会法识别岩性及其适用条件：一般以中子-密度交会法为主，也可采用声波-中子交会。但交会法无法识别黄铁矿，也不能准确计算硅质含量。

PE 曲线识别岩性及其适用条件：该法可定性识别白云岩，在不受重晶石影响的情况下可以比较准确地计算白云岩和灰岩的地层段的岩石成分百分含量。

电成像测井识别岩性及其适用条件：对常规测井特征类似的泥灰岩、泥质灰岩和致密灰岩等近似岩性，可以利用电成像图像反映的岩石结构和层理特征差异进行识别。

元素俘获测井识别岩性及其适用条件：该方法可以准确识别碳酸盐岩岩性，提供比较可靠的岩石百分含量，对含量较低的黄铁矿和硅质含量也适用，但对百分含量低于 5% 的成分，其计算结果有一定误差。

3. 各类识别方法及实例分析

3.1. 常规测井识别岩性

雷四段岩性较为复杂，有白云岩、灰质白云岩、含泥白云岩、石膏质白云岩、石膏岩、灰岩、含泥灰岩等。雷四顶部风化壳储层岩性主要以云岩、泥质云岩和灰质云岩为主。各种岩性反映在测井曲线上有不同的响应特征。

白云岩：受泥质含量较重的影响，雷四段泥质云岩测井响应特征与纯云岩存在一定差异，自然伽马值较高，在 30~45 API 之间，声波时差值在 50 $\mu\text{s}/\text{ft}$ 左右；随泥质含量增大而增大，补偿中子 CNL 的值一般大于 5%，且随着物性变好，中子测井值也相应增大；补偿密度 DEN 的值主要取决于岩石的物性条件，在致密层，密度测井值一般在 2.86 g/cm^3 左右，储层发育段一般低于 2.8 g/cm^3 ；致密层电阻率值一般大于 1000 $\Omega\cdot\text{m}$ ，随物性和泥质含量的增大而减小，如图 1 所示 4638.0~4642.0 米为元坝 12 井雷四顶部发育的白云岩。

黄铁矿：除常规碳酸盐岩和硬石膏外在雷四顶部还不连续发育含黄铁矿的薄夹层，其测井响应特征为低自然伽马值，声波和中子值中等、高密度和低电阻率值，易将其判断为物性较好的含水储层，如图 1 元坝 12 井雷四顶部 4651.0~4652.5 米密度值较高，电阻率值较低，为典型黄铁矿特征，需结合电成像甚至岩心或岩屑资料进行判别。

灰岩：灰岩在雷四段也普遍发育，测井响应特征为：自然伽马值较高，在 30~40 API 之间变化，声波时差在 50 $\mu\text{s}/\text{ft}$ 以上，中子值为 0%~2%、密度值 2.65~2.73 g/cm^3 ，电阻率值较高，在致密纯灰岩段可达 20,000 $\Omega\cdot\text{m}$ 以上，如图 1 所示 4705.0~4710.0 米为元坝 12 井灰岩发育段。

硬石膏：在元坝雷四段沉积有硬石膏(或云质石膏、膏质云岩)夹层，硬石膏层比较容易识别，其测井响应特征通常为：自然伽马极低值，一般在 15 API 以下，密度测井高值，纯石膏层高于 2.95 g/cm^3 ；中子测井值为低值，一般在-2%~0%之间；声波时差一般在 51 $\mu\text{s}/\text{ft}$ 之间，深侧向电阻率一般是在中低阻背景下增高，其增高的幅度与岩石中硬石膏的含量成正比，其电阻率值一般在几千甚至上万欧姆米。如图 2 为元坝 11 井雷四段中部硬石膏发育段，其中 5007.0~5013.0 米硬石膏含量较纯，密度值在 2.98 g/cm^3 左右，电阻率高值接近 50,000 $\Omega\cdot\text{m}$ 。

3.2. 利用 PE 曲线识别岩性

不同岩石的有效光电吸收截面指数值具有明显的差别，而且孔隙中流体对 PE 值的影响较小。表 1

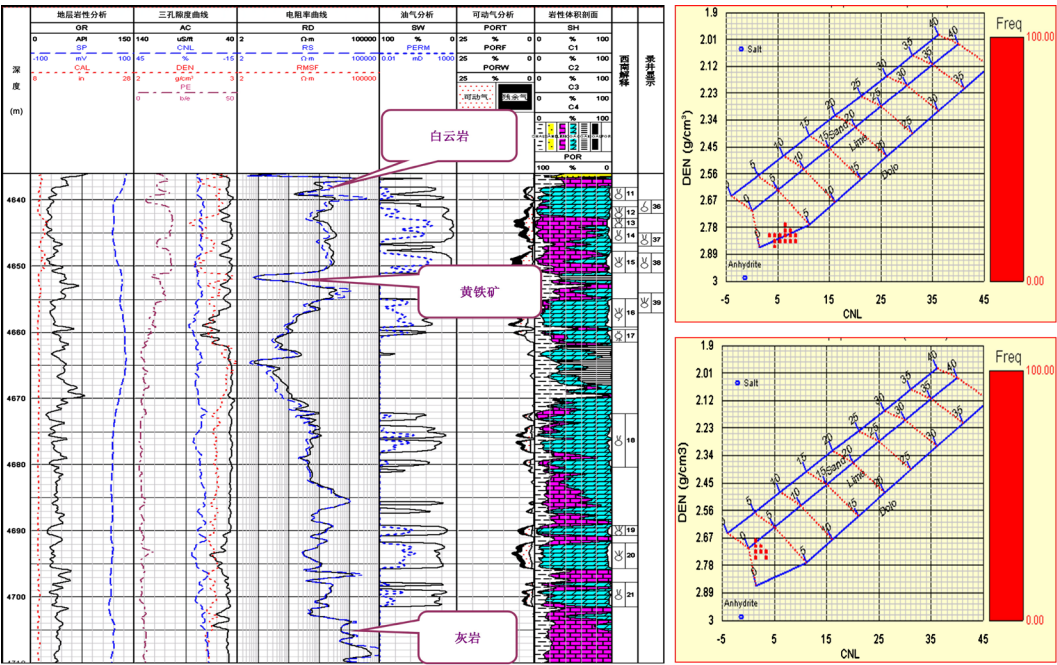


Figure 1. Logging response characteristics of dolomite and limestone in the fourth member of Leikoupo Formation of well Yuanba 12
图 1. 元坝 12 井雷四段云岩和灰岩测井响应特征

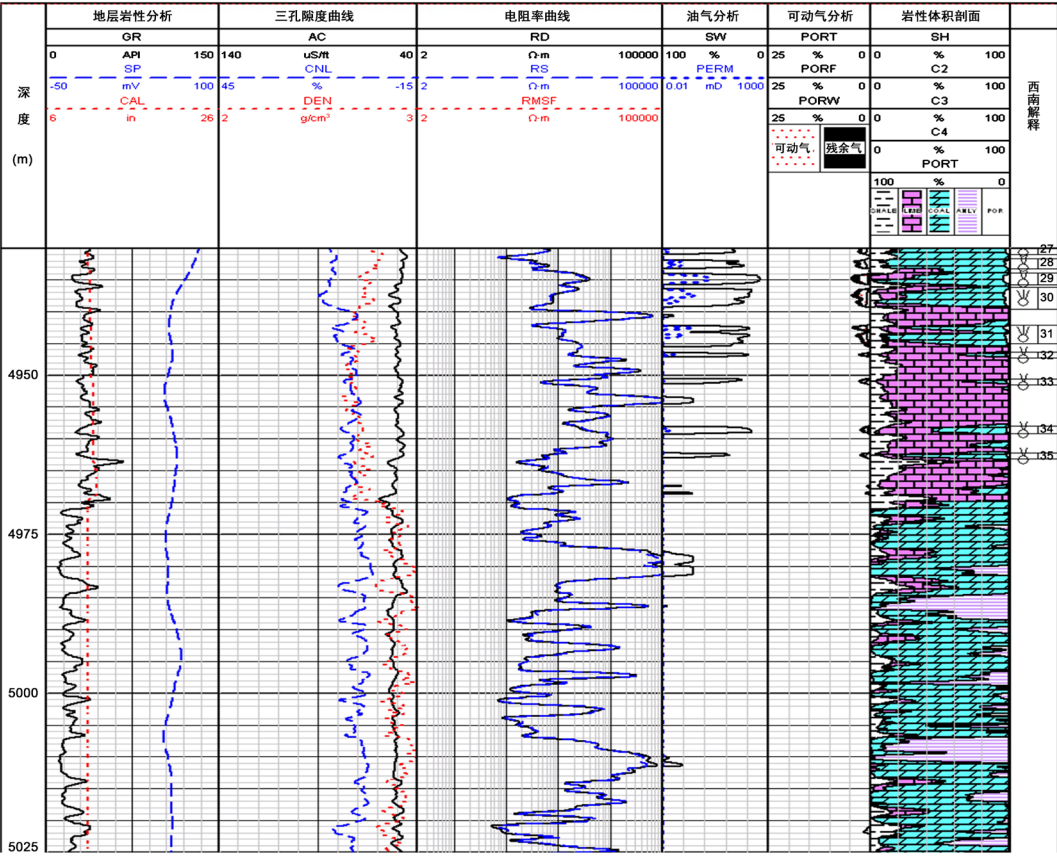


Figure 2. Logging response characteristics of anhydrite in the fourth member of Leikoupo Formation of well Yuanba 11
图 2. 元坝 11 井雷四段硬石膏测井响应特征

是几种常见岩石和矿物的体积密度 ρ_b 、有效光电吸收截面指数 PE 和体积光电吸收截面指数 U。

由表 1 中数据分析可知：各矿物岩石之间的 PE (或 U)值具有明显区别，并且油、气、水的 PE (或 U)值与矿物岩石之间一般都差一个数量级以上。因此，用 PE (或 U)曲线能有效的区分地层岩性。分析表中数据，可以看出，硬石膏与石灰岩的 PE 值相近，差别就在补偿密度上，单纯的利用有效光电吸收截面指数 PE 是无法识别硬石膏和灰岩的。根据现场的实际情况，储层发育段岩性主要为白云岩和灰岩，而白云岩和灰岩的 PE (或 U)值具有明显区别，这就为只利用有效光电吸收截面指数 PE 判别储层段的岩性提供了有利的条件。

Table 1. ρ_b 、PE、U values of several common rocks and minerals
表 1. 几种常见岩石和矿物的 ρ_b 、PE、U 值

岩石、矿物	ρ_b (g/cm ³)	PE (b/e)	U (b/cm ³)
砂岩	2.65	1.81	4.78
石灰岩	2.71	5.08	13.8
白云岩	2.87	3.14	9.01
硬石膏	2.98	5.05	14.93
盐岩	2.04	4.65	9.45
重晶石	4.09	267	1070
伊利石	2.52	3.65	8.73
黄铁矿	4.99	16.97	84.68

在雷四段岩性主要以白云岩和灰岩为主，图 3 为元坝 2 井雷四段顶部测井曲线成果图，图中第三道为 PE 曲线，该井 4818.0~4824.0 米 PE 值较低，为纯云岩特征，常规曲线显示该段密度值较高，在 2.8 g/cm³ 左右，中子值较大，声波值在 46 μ s/ft 左右，显示岩性为云岩；图中 4828.0~4838.0 米 PE 值较高，为灰岩特征。由于受井眼条件和泥浆的影响，PE 值整体较高，因此在利用 PE 进行岩性识别时不能只看绝对值，要看其相对变化并结合其他曲线一起使用。

3.3. 利用成像测井识别岩性

除了上述几种直观识别岩性的方法外，成像测井也可作为岩性识别的一种技术手段，主要依据成像测井静、动态图像颜色深浅变化以及层理的发育程度来识别岩性。图 4 为阆中 2、元坝 12、元坝 103 井雷四段泥质含量相对较重层段，层理较发育，在成像动态和静态图上主要表现为明暗相间的条纹。

图 5 为阆中 2、元坝 103、元坝 12 井致密灰岩段成像测井成果图，静态图像上表现为浅黄色夹杂黑色，因含有泥质，在动态图像上在浅色块状背景下的深色团块特征，图 6 为阆中 2、元坝 103、元坝 12 井云岩发育层段成像测井成果图，由于云岩普遍含有泥质，部分井有溶蚀现象，在静态和动态图像为暗色块状伴随深色条带状特征。图 7 为阆中 2、元坝 103、元坝 12 井石膏发育层段成像测井成果图，静态图像上表现为亮黄色到白色，在动态图像浅色片状特征。

3.4. 利用 ECS 识别岩性

ECS 测井是通过快中子在地层中与一些元素发生非弹性散射，经过几次非弹性碰撞快中子变为热中子，最终被周围的原子俘获，元素通过释放伽马射线回到初始状态，由 BGO 晶体组成的探测器探测到伽马射线能谱，主要是由 H、Cl、Si、Ca、Fe、S、Ti、Gd 元素的谱所组成[10] [11] [12]。H 和 Cl 在地层中

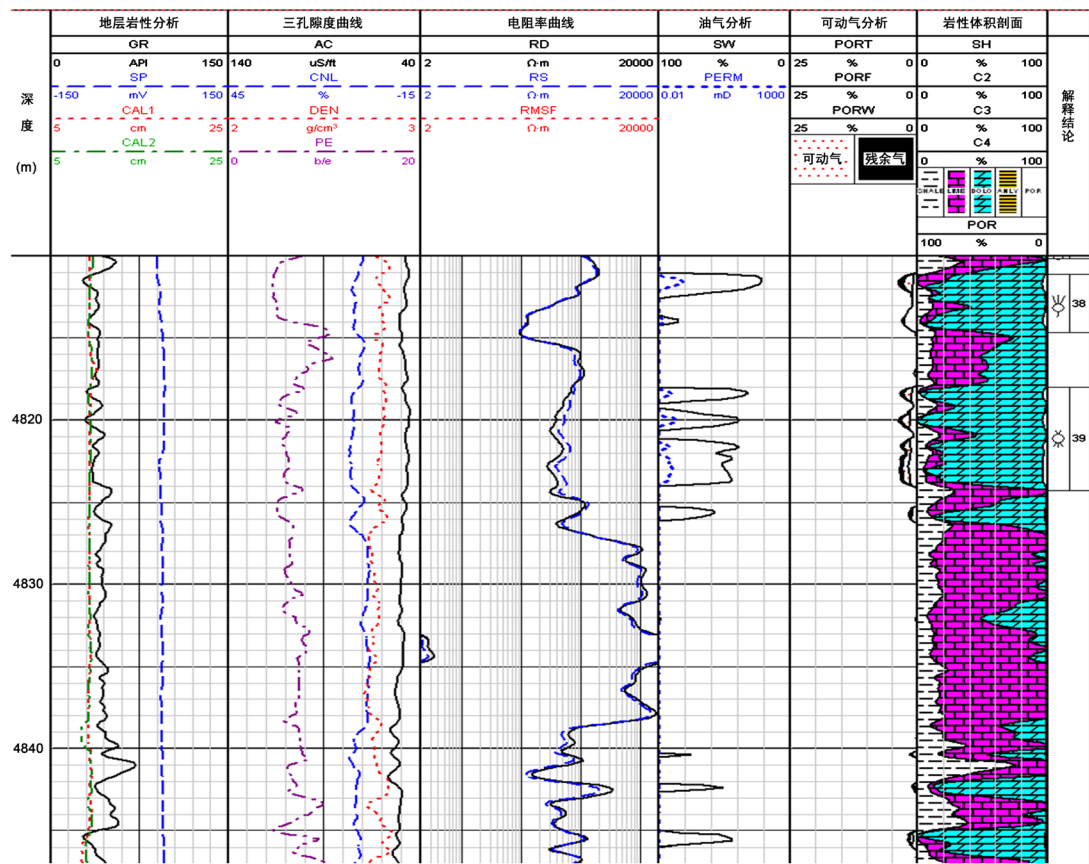


Figure 3. Identifying lithology by PE curve of well Yuanba 2
图 3. 元坝 2 井 PE 曲线识别岩性

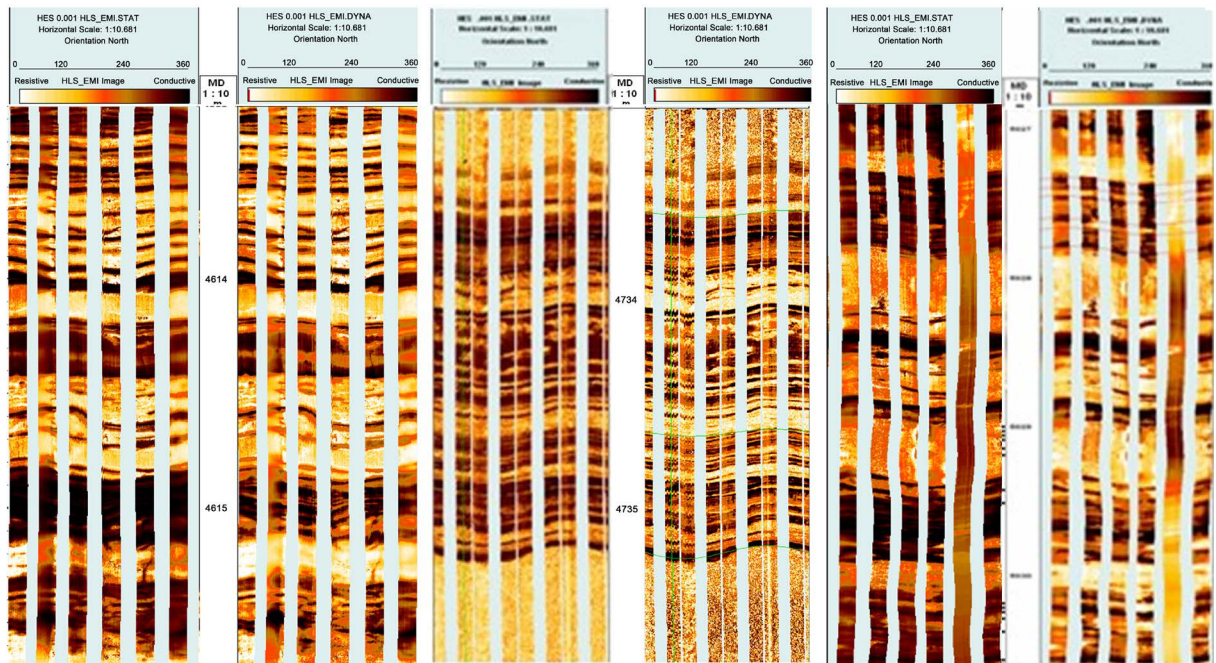


Figure 4. Identification of mudstone by imaging logging
图 4. 电成像识别泥岩

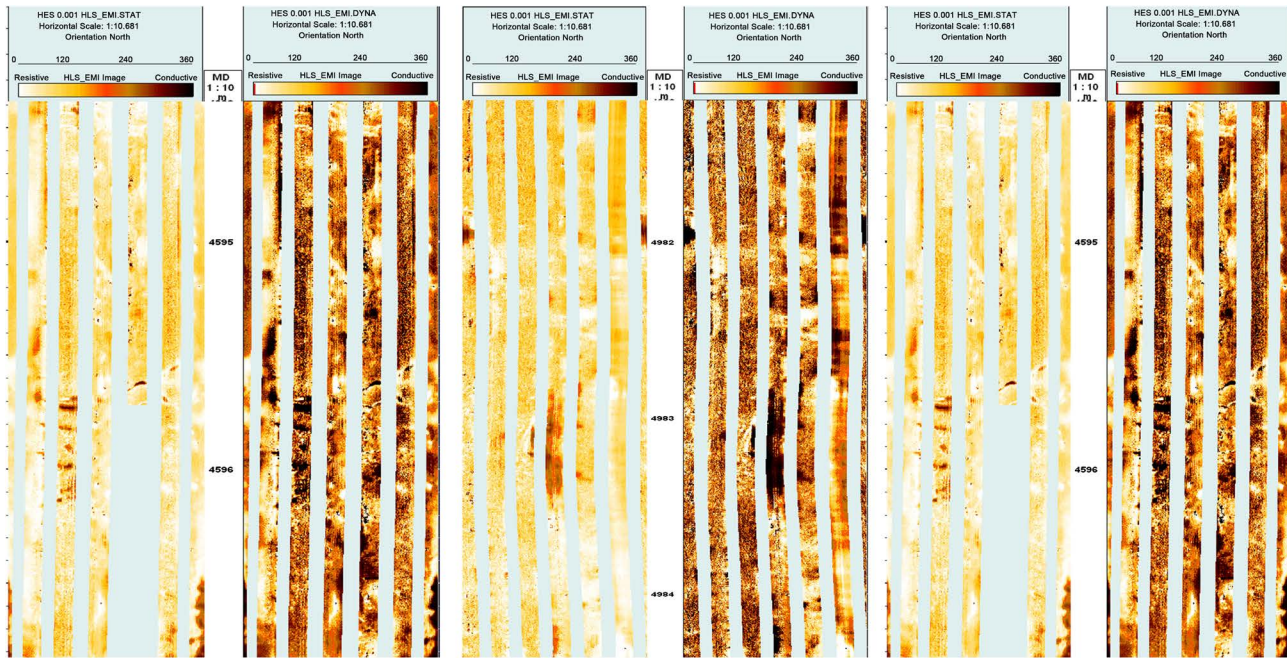


Figure 5. Identification of limestone by imaging logging
图 5. 电成像识别灰岩

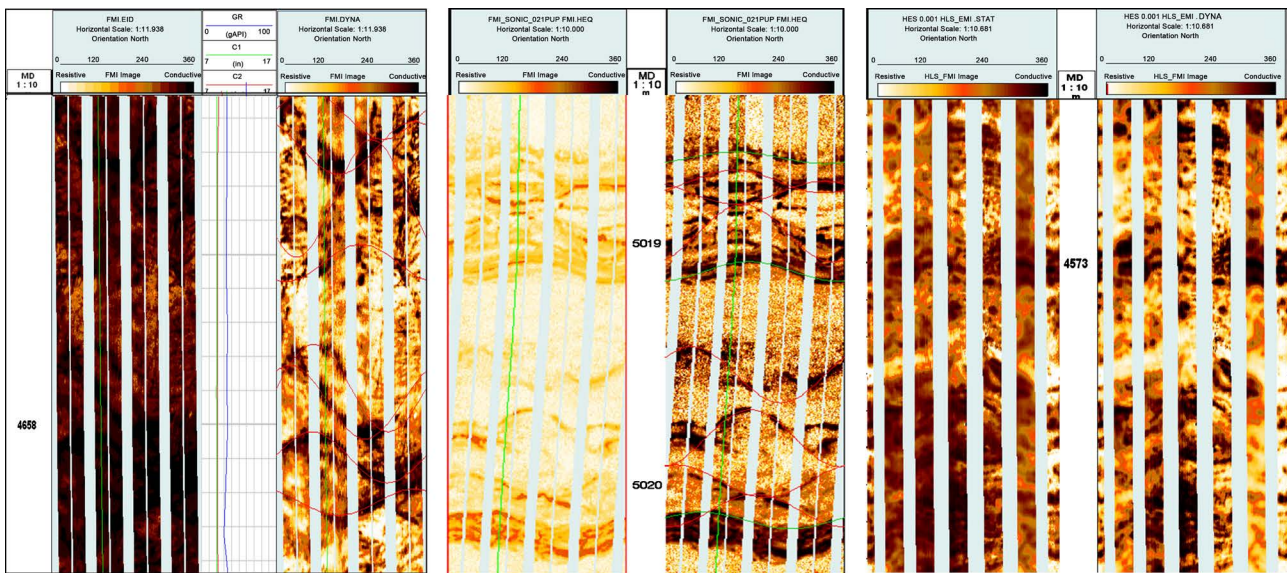


Figure 6. Identification of dolomite by imaging logging
图 6. 电成像识别云岩

和井眼中都存在，而其它的元素一般只出现在地层骨架矿物中，其中元素 Si、Ca、Fe、S、Ti、Gd 是 ECS 谱数据解释的关键数据。

其中 Si 主要与石英关系密切，Ca 与方解石和白云石密切相关，利用 Si 和 Ca 可以计算石膏的含量，Fe 与黄铁矿和菱铁矿等有关系，铝元素与粘土含量密切相关，因此 ECS 是通过 Si、Ca、Fe 等元素来计算复杂岩石的矿物含量。

如图 8 为阆中 1 井 6400.0~6650.0 米 ECS 处理成果图，其中第一道为剥谱后计算出的岩性剖面，第

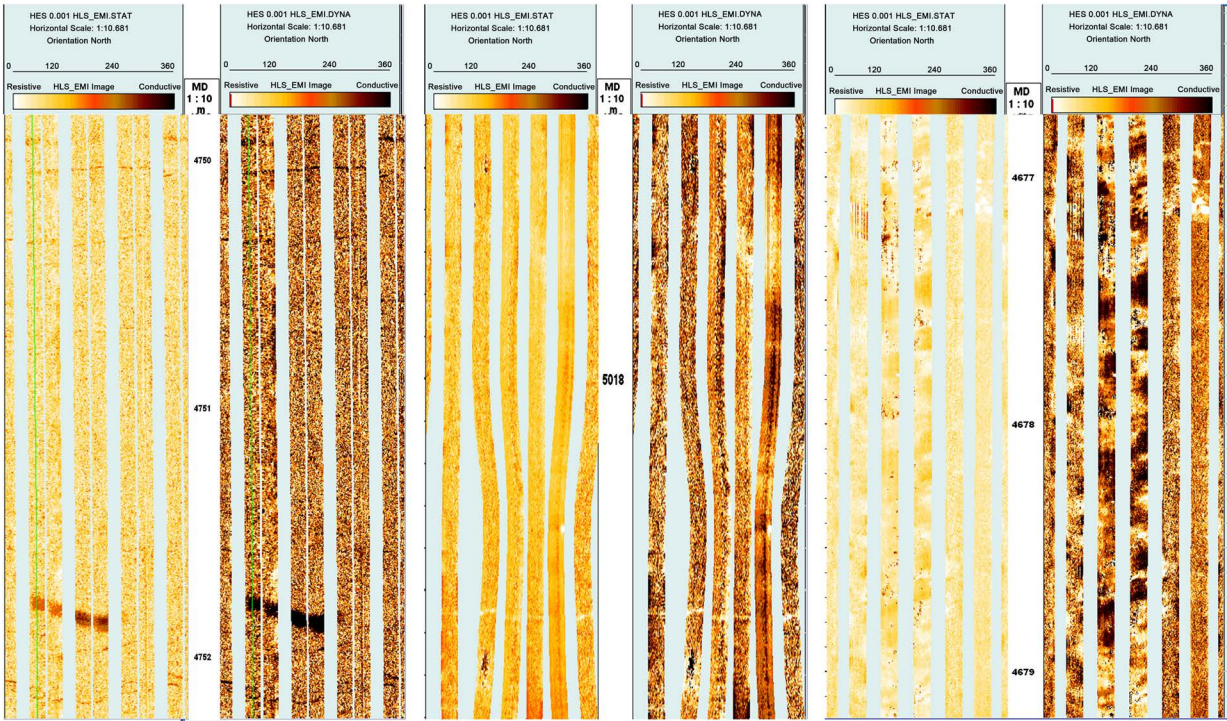


Figure 7. Identification of anhydrite by imaging logging
图 7. 电成像识别石膏

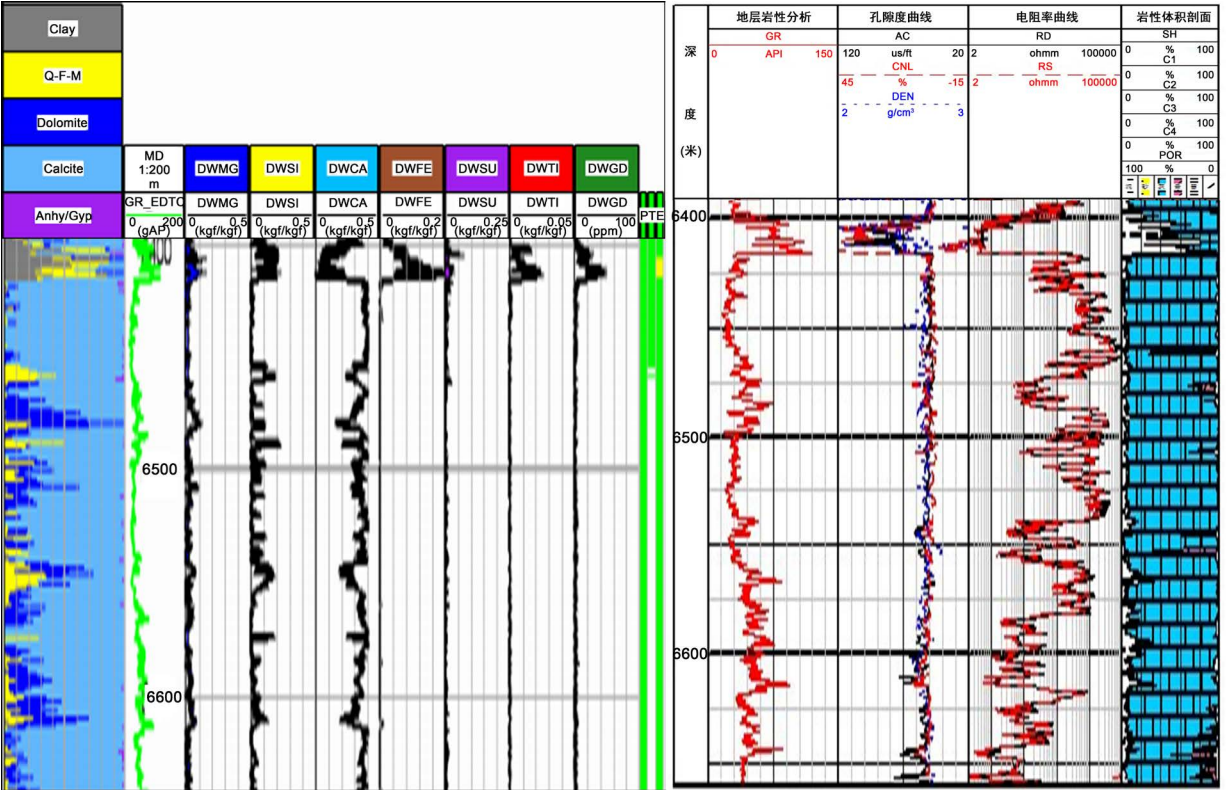


Figure 8. ECS calculated mineral content
图 8. ECS 计算矿物含量

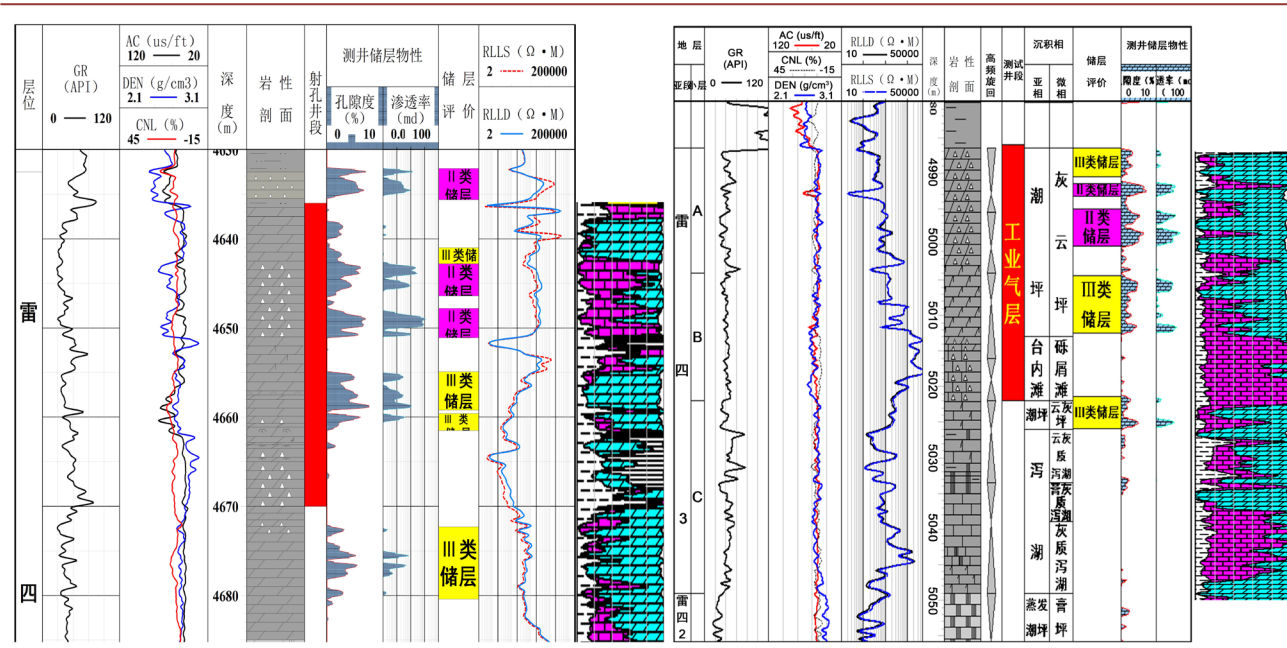


Figure 9. Analysis and comparison of rock mineral composition by logging curve and rock thin section
图 9. 测井分析岩石矿物成分与岩石薄片分析对比图

三到九道为各种元素的含量，从处理剖面看，该段主要为灰质，与常规测井计算岩性剖面相一致。

通过研究，形成了阆中 - 元坝地区雷四段地层岩性识别技术，经岩石薄片标定，利用测井资料计算的岩石矿物成分与地层实际情况一致，因此，在测井资料标准化的基础上，利用中子 - 密度交会能准确计算雷口坡组的岩石矿物成分。如图 9 为元坝 12 井、元坝 4 井岩石矿物成分与岩石薄片分析对比图。

3.5. 各方法对比分析

常规测井识别岩性，受井眼影响较大，在识别地层硅质矿物含量以及黄铁矿等特殊矿物时有一定的局限性，但却是最普遍实用的一种岩性识别方法，因其施工费用相对较低，做为探井、开发井的基本测井项目。利用 PE 曲线识别岩性，能够定性识别白云岩，但受泥浆中重晶石的影响相对较大。利用成像测井识别岩性，能够更加高效的分析地层岩性构造特征，识别复杂岩性，但对井况要求相对较高。利用 ECS 识别岩性，能够准确识别碳酸岩岩性，定量计算地层矿物含量百分数，但施工费用非常昂贵，所以并不可能普及到生产之中。

4. 结论

- 1) 元坝地区雷口坡组岩性复杂，现有岩心矿物分析资料较少，运用综合测井资料，能较准确地识别其岩性，为元坝地区雷四段风化壳气藏测井评价提供了技术支撑。
- 2) 不同测井资料蕴含测井信息及侧重点不同，针对该区复杂岩性，识别时要采取相结合的方法，这样才能达到更准确、精细的评价效果。
- 3) 通过将常规测井资料计算的岩性剖面与 ECS 测井资料、岩石薄片分析对比研究及标定，得出在缺乏该类特殊资料的情况下，运用常规测井资料也能较好地计算复杂岩性剖面。

参考文献

[1] 孙春燕, 胡明毅, 胡忠贵, 等. 四川盆地中三叠统雷口坡组沉积特征及有利储集相带[J]. 石油与天然气地质,

- 2018, 39(3): 498-512.
- [2] 张天骏, 陈安清, 钟怡江, 等. 川西中三叠统雷四段微相特征及沉积充填模式[J]. 煤炭技术, 2018, 37(5): 115-117.
 - [3] 秦川. 川中南部地区中三叠统雷口坡组储层特征[D]: [硕士学位论文]. 成都: 成都理工大学, 2009.
 - [4] 胡杨, 王兴志, 曾德铭, 等. 四川盆地北部雷口坡组四段储集层研究[J]. 新疆石油地质, 2012(5): 547-549.
 - [5] 曾德铭, 王兴志, 张帆, 等. 四川盆地西北部中三叠统雷口坡组储层研究[J]. 古地理学报, 2007, 9(3): 253-266.
 - [6] 曾德铭. 川西北地区中三叠统雷口坡组储层研究[D]: [硕士学位论文]. 成都: 西南石油大学, 2005.
 - [7] 丁熊, 谭秀成, 李凌, 等. 四川盆地西南部雷口坡组储层特征及控制因素[J]. 现代地质, 2015, 29(3): 644-652.
 - [8] 田瀚, 唐松, 张建勇, 等. 川西地区中三叠统雷口坡组储层特征及其形成条件[J]. 天然气地球科学, 2018, 29(11): 37-46.
 - [9] 陈昱林, 曾焱, 吴亚军, 等. 川西雷口坡组气藏储层类型及孔隙结构特征[J]. 断块油气田, 2018, 25(3): 284-289.
 - [10] 赵军, 杨阳, 陈伟中, 等. 基于 ECS 测井的岩性识别方法[J]. 地球物理学进展, 2015, 30(5): 2342-2348.
 - [11] 程华国, 袁祖贵. 用地层元素测井(ECS)资料评价复杂地层岩性变化[J]. 核电子学与探测技术, 2005, 25(3): 233-238.
 - [12] 袁祖贵, 楚泽涵, 纪玉民. 地层元素测井(ECS)的原理及地质应用[C]//全国第四届核仪器及其应用学术会议. 全国第四届核仪器及其应用学术会议论文集. 2003: 18-23+7.