

引文: 文士豪, 李忠诚, 田彦玲, 等. 四川盆地南部地区茅口组碳酸盐岩储层有效性评价及流体识别新方法[J]. 天然气工业, 2024, 44(12): 15-26.
WEN Shihao, LI Zhongcheng, TIAN Yanling, et al. Reservoir effectiveness evaluation and new fluid identification method of Maokou Formation carbonate rocks in southern Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 2024, 44(12): 15-26.

四川盆地南部地区茅口组碳酸盐岩储层有效性评价 及流体识别新方法

文士豪¹ 李忠诚¹ 田彦玲¹ 白玉玲¹ 刘小红¹ 孙国翔¹ 孙建孟² 潘为良²

1. 中国石油吉林油田公司 2. 中国石油大学(华东)地球科学与技术学院

摘要: 四川盆地南部(以下简称川南)地区二叠系茅口组茅二段—茅口组顶主要为缝洞体发育、非均质性强的石灰岩储层,且存在储层电阻率响应机理复杂、储层有效性评价及气水层识别困难等问题。为有效评价缝洞型碳酸盐岩储层,提高其流体识别精度,在物性建模的基础上,重点研究了常规电阻率曲线、电成像测井孔隙度谱均值和方差等特征参数以划分储层有效性,并应用合成横波时差叠加法、纵横波速度比值重叠法和纵横波等效弹性模量差比法等建立了综合流体识别指数,再结合电阻率谱均值和方差等参数开展了流体识别研究。研究结果表明:①首次采用滑动变窗口电阻率归一化曲线和电成像孔隙度谱均值、方差等参数建立了储层有效性分类指数(AVRT),并根据划分标准将储层划分为3类,对研究区155个层段进行解释,测井解释符合率为91.1%;②采用合成横波时差叠加法、纵横波速度比值重叠法、纵横波等效弹性模量差比法等多种方法加权平均,构建了流体判别指数,储层流体识别符合率为85.7%;③结合视地层水电阻率谱均值和方差参数,从各个参数对流体类型影响的机理出发,建立了基于AVRT和视地层水电阻率谱均值的流体识别图版,经验证储层流体识别符合率达100%。结论认为,该新方法中滑动变窗口归一化的电阻率能突出显示储层质量较好的薄层,流体判别指数对风化壳和断溶体气层识别效果较好,该新方法大幅提升了缝洞型碳酸盐岩储层评价及其流体识别精度,有效解决了强非均质性缝洞型碳酸盐岩储层流体识别难的问题。

关键词: 四川盆地; 二叠系茅口组; 碳酸盐岩; 孔隙度谱; 储层有效性评价; 视地层水电阻率谱; 流体识别

中图分类号: TE155 文献标识码: A DOI: 10.3787/j.issn.1000-0976.2024.12.002

Reservoir effectiveness evaluation and new fluid identification method of Maokou Formation carbonate rocks in southern Sichuan Basin

WEN Shihao¹, LI Zhongcheng¹, TIAN Yanling¹, BAI Yuling¹, LIU Xiaohong¹, SUN Guoxiang¹, SUN Jianmeng², PAN Weiliang²

(1. PetroChina Jilin Oilfield Company, Songyuan, Jilin 138000, China; 2. School of Geosciences, China University of Petroleum - East China, Qingdao, Shandong 266580, China)

Natural Gas Industry, Vol.44, No.12, p.15-26, 12/25/2024. (ISSN 1000-0976; In Chinese)

Abstract: The interval from the second member to the top of the Permian Maokou Formation in southern Sichuan Basin is dominated by limestone reservoir with developed fractures and vugs and strong heterogeneity, which has complex resistivity response mechanisms and faces difficulties in reservoir effectiveness evaluation and gas/water layer identification. In order to effectively evaluate the fractured-vuggy carbonate reservoir and improve its fluid identification accuracy, this paper studies the characteristic parameters such as conventional resistivity curves and means and variances of electrical imaging logging porosity spectrum based on physical property modeling, to classify reservoir effectiveness. A comprehensive fluid identification index is established by applying the synthetic S-wave time-difference stacking method, the P-S wave velocity ratio overlap method, and the P-S wave equivalent elastic modulus difference ratio method. Additionally, fluid identification is researched based on the means and variances of resistivity spectrum. The following results are obtained. First, it is for the first time that a reservoir effectiveness classification index (AVRT) is established by using parameters such as the normalized resistivity curve of sliding variable windows and the mean and variance of electrical imaging porosity spectrum. According to the classification standard, the reservoirs are classified into three types, and 155 intervals in the study area are interpreted, with a logging interpretation coincidence rate reaching 91.1%. Second, a fluid identification index is constructed based on the weighted average of multiple methods such as the synthetic S-wave time-difference stacking method, the P-S wave velocity ratio overlap method, and the P-S wave equivalent elastic modulus difference ratio method, and its coincidence rate of reservoir fluid identification is 85.7%. Third, a fluid identification chart based on AVRT and mean apparent formation water resistivity spectrum is developed based on the influencing mechanism of each parameter on fluid type, combined with the mean and variance of apparent formation water resistivity spectrum. It is verified to have a coincidence rate of reservoir fluid identification up to 100%. In conclusion, in the new method, the normalized resistivity of sliding variable windows can highlight the thin layers with high reservoir quality, and the fluid identification index can better identify weathered crust and fractured-vuggy gas reservoirs. This new method significantly improves fractured-vuggy carbonate reservoir evaluation and its fluid identification accuracy, and effectively overcomes the difficulties in fluid identification in fractured-vuggy carbonate reservoirs of strong heterogeneity.

Keywords: Sichuan Basin; Permian Maokou Formation; Carbonate rock; Porosity spectrum; Reservoir effectiveness evaluation; Apparent formation water resistivity spectrum; Fluid identification

基金项目: 中国石油天然气集团有限公司科技项目“四川盆地风险勘探领域和目标研究、工程技术攻关及现场试验”(编号: 2023YQX10104)。

作者简介: 文士豪, 1976年生, 高级工程师, 硕士, 中国石油吉林油田公司副总经理; 主要从事油气田勘探开发与管理等方面的工作。地址: (138000) 吉林省松原市宁江区沿江东路1219号。ORCID: 0009-0002-4942-3453。E-mail: wenshh@petrochina.com.cn

通信作者: 潘为良, 1999年生, 博士研究生; 主要从事复杂储层测井解释等研究工作。地址: (266580) 山东省青岛市黄岛区长江西路66号。ORCID: 0009-0002-6016-3293。E-mail: 2401069709@qq.com

0 引言

四川盆地天然气资源丰富,发育震旦系灯影组、寒武系龙王庙组、二叠系栖霞组和茅口组、三叠系飞仙关组等多套海相碳酸盐岩含气层系^[1-4],资源潜力大,其中以生屑石灰岩为主的二叠系茅口组是四川盆地中部和南部(以下简称川南)的重点勘探层系^[5-10]。近年来,川南地区茅口组勘探开发证实,区内茅口组二段(以下简称茅二段)发育一套具有一定勘探开发潜力和经济效益的石灰岩储层;例如 YJ2 井在茅二段测试获 $60 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 的高产工业天然气气流,后期在 LS1 井也钻揭这套石灰岩储层^[11]。本次研究区位于四川盆地南部,主体位于川南低陡褶皱带,区内茅二段岩相较为单一,主要为石灰岩,偶见泥质和白云质夹杂;茅二段缝洞体较发育、非均质性强,储层类型及有效性评价难;储层孔隙结构和岩电关系复杂,电阻率响应影响因素多,导致气水层识别难度大。

储层有效性测井评价方面:常规碳酸盐岩储层主要通过岩性、物性、储层储集空间类型等因素评价有效性^[12]。田翰等^[13-14]从宏观和微观的角度,利用岩性、物性和测井响应等参数,建立储层有效性评价指标。本次研究区茅二段为碳酸盐岩储层,岩性单一,孔隙度为 2%~4%。测井曲线反映井眼扩径,三孔隙度曲线(补偿声波、补偿密度、补偿中子)变化较小且存在失真,现有方法应用效果差。电成像测井资料识别碳酸盐岩地层缝洞具有独特优势。张峰等^[15-18]利用电成像测井资料提取孔隙度谱均值、方差等参数,利用孔隙度谱形态识别储层有效性,并取得较好应用效果。

储层流体测井识别方面:近年国内外的流体识别方法主要依赖于常规测井和特殊测井资料^[19]。研究区缝洞型碳酸盐岩储层电阻率响应影响因素较多,电阻率曲线识别流体效果差。研究区储层流体主要为天然气,声波时差测井响应较为敏感。边会媛等^[20-23]利用偶极横波测井资料,计算纵横波时差比、等效弹性模量等参数识别气层,并对比确定不同方法的优劣。除声波时差测井外,气测电导率的变化也能一定程度指示气层。张攀等^[24-25]利用出入口电导率与气测重烃比值、轻烃比值和烃气密度指数确定气层、气水同层、水层。电成像视地层水电阻率谱在一定程度上可定性评价气层和水层。李庆峰等^[26]利用电成像测井视地层水电阻率谱均值和方差等参数建立特低孔隙度、特低渗透率储层流体识别图版,气层

识别符合率达 91.7%。

针对上述问题,本文在物性建模基础上,重点探讨常规电阻率曲线、电成像测井孔隙度谱均值和方差等特征参数划分储层有效性。应用合成横波时差叠加法、纵横波速度比值重叠法和纵横波等效弹性模量差比法等确定综合流体识别指数,并结合电阻率谱均值和方差等参数开展流体识别研究。研究结果大幅提高缝洞型碳酸盐岩储层有效性评价及流体识别精度。

1 储层有效性评价基础研究

岩心、电成像等资料研究发现,研究区茅二段碳酸盐岩储层空间主要以孔隙和裂缝为主,洞次之。为了准确求取孔隙度和渗透率并评价有效性,下面讨论总孔隙度、基质孔隙度、裂缝孔隙度、总渗透率、基质渗透率和裂缝渗透率等 6 个参数的计算。

1.1 孔隙度模型

1.1.1 基于常规测井资料的总孔隙度和基质孔隙度模型

根据测井测量原理^[27],当地层发育裂缝等次生储集空间时,中子测井和密度测井通常反映其探测范围内孔隙和裂缝的总体积占比,即总孔隙度,因此可利用中子测井孔隙度和密度测井孔隙度开方建立总孔隙度计算模型[式(1)];而声波时差测井仅反映岩石基质孔隙,不能反映次生孔隙,故计算的孔隙度反映原生粒间孔,即基质孔隙度,本文中采用怀利公式进行计算[式(2)]。

$$\phi_{\text{总}} = \sqrt{\frac{\phi_{\text{N}}^2 + \phi_{\text{D}}^2}{2}} \quad (1)$$

$$\phi_{\text{B}} = \frac{DT - DT_{\text{M}}}{(DT_{\text{F}} - DT_{\text{M}}) \times CP} - SH \times \frac{DT_{\text{SH}} - DT_{\text{M}}}{DT_{\text{F}} - DT_{\text{M}}} \quad (2)$$

式中 $\phi_{\text{总}}$ 、 ϕ_{N} 、 ϕ_{D} 、 ϕ_{B} 分别表示总孔隙度、中子孔隙度、密度孔隙度、基质孔隙度; DT 表示声波时差, $\mu\text{s}/\text{ft}$ ($1 \text{ ft} = 0.3048 \text{ m}$, 下同); DT_{M} 、 DT_{F} 、 DT_{SH} 分别表示岩石骨架、流体和泥质的声波时差, $\mu\text{s}/\text{ft}$; CP 表示压实校正系数,无量纲; SH 表示泥质含量。

1.1.2 基于电成像资料提取的裂缝孔隙度

电成像测井资料能够直观地反映地层裂缝发育程度,斯伦贝谢公司 Techlog 平台下的 Poro Tex 模块可以通过电成像测井资料拾取裂缝,得到裂缝孔隙度^[28]。该方法的最大优势在于能够识别并定量计算所有规则及不规则裂缝,但其仅能拾取成

像图中的裂缝孔隙度，无法获得连续的裂缝孔隙度曲线。

1.1.3 基于常规测井的裂缝孔隙度模型

除可利用电成像测井资料提取裂缝孔隙度外，前人对裂缝孔隙度的定量计算已开展大量研究。李善军等^[29]提出了利用双侧向电阻率计算裂缝孔隙度。实际应用中，为提高计算时效性，满足计算精度，通常利用其简化公式^[30]计算裂缝孔隙度[式(3)、(4)]。由于电成像测井成本较高，开发井中通常无电成像测井，因此有必要通过常规双侧向测井计算裂缝孔隙度。深、浅侧向电阻率的差值还受基质孔隙度、地层流体类型、含水饱和度、钻井液性能等因素影响，可借助电成像测井提取的裂缝孔隙度进行校正，消除部分非地质因素影响。

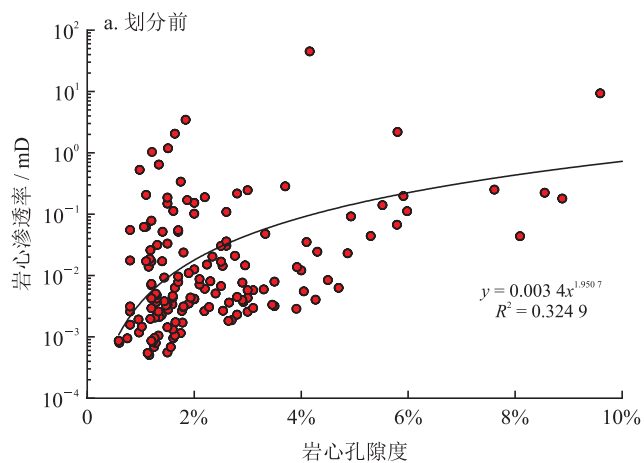
$$Y = \frac{R_{LLD} - R_{LLS}}{\sqrt{R_{LLD} \times R_{LLS}}} \tag{3}$$

$$\phi_f = \left(\frac{A_1}{R_{LLS}} + \frac{A_2}{R_{LLD}} + A_3 \right) \times R_{mf} \tag{4}$$

式中 Y 表示裂缝状态的参数， $Y < 0$ 时，为低角度裂缝； $0 \leq Y \leq 0.1$ ，为倾斜裂缝； $Y > 0.1$ 时，为高角度裂缝； ϕ_f 表示裂缝孔隙度； R_{LLD} 、 R_{LLS} 、 R_{mf} 分别表示深、浅侧向和钻井液滤液电阻率， $\Omega \cdot m$ ； A_1 、 A_2 、 A_3 分别表示与裂缝类型相关的参数，具体取值见表 1。

表 1 裂缝孔隙度解释模型常数取值表

裂缝类型	Y	A_1	A_2	A_3
低角度裂缝	< 0	-0.992 417	1.972 470	0.000 318
倾斜裂缝	$0 \sim 0.1$	-17.633 200	20.364 510	0.000 931
高角度裂缝	> 0.1	8.522 532	-8.242 788	0.000 712



1.2 基于流动单元的渗透率模型

1.2.1 裂缝、基质和总渗透率模型

对于裂缝发育的储层，裂缝渗透率比孔隙渗透率大，而裂缝的渗透率主要受裂缝张开度的控制。尚锁贵等^[31]等研究显示，裂缝开度与渗透率为立方关系，且随裂缝开度的增加，渗透率的数值由孔隙度和裂缝共同主导变为由裂缝开度主导^[32-33]。本文基于 Techlog 软件提取的裂缝张开度建立渗透率模型：

$$K_f = 1.647 \times 10^{-3} B^3 \tag{5}$$

式中 K_f 表示裂缝渗透率， $10^{-3} mD$ ；当 $R_{LLD} > R_{LLS}$ 时， $B = 2\,800 \times R_{mf} \times \left(\frac{1}{R_{LLD} - R_{LLS}} \right)$ ；当 $R_{LLD} < R_{LLS}$ 时， $B = 2\,800 \times R_{mf} \times \left(\frac{1}{R_{LLS}} - \frac{1}{R_{LLD}} \right)$ ；当 $R_{LLD} = R_{LLS}$ 时， $B = 0$ ，无量纲。

对于基质渗透率，则采用孔渗单相关的方式确定，结合岩心数据，得到基质渗透率计算公式：

$$K_b = 0.002\,9 \times e^{0.695\,6\phi_b} \tag{6}$$

式中 K_b 表示基质渗透率， $10^{-3} mD$ 。

对于双重孔隙介质储层，其渗透率包括裂缝渗透率和基质渗透率，地层的总渗透率为两部分之和，因此总渗透率为：

$$K = K_f + K_b \tag{7}$$

式中 K 表示总渗透率， $10^{-3} mD$ 。

1.2.2 基于流动单元的渗透率模型

实际应用中裂缝渗透率因缺乏电成像测井难以准确求取，为了提高常规测井渗透率计算精度选择流动单元法。流动单元受储层矿物成分和结构控制^[34]，可根据孔喉特征的不同将储集层划分成不同流动单元^[35]。如图 1 所示，划分不同流动单元后，渗透率

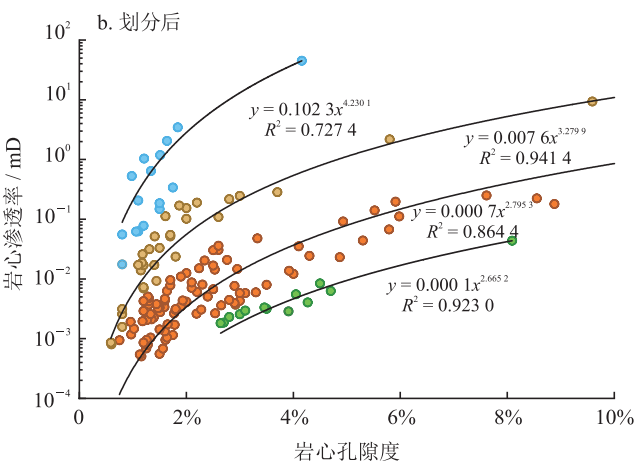


图 1 划分流动单元前后孔渗交会图

模型的相关系数有了显著提升。

$$RQI = 0.0314 \sqrt[4]{\frac{K}{\phi_e}}$$

(8)

$$\phi_z = \frac{\phi_e}{1 - \phi_e}$$

(9)

$$FZI = \frac{RQI}{\phi_z}$$

(10)

式中 RQI 表示储层品质因子, 无量纲; ϕ_z 表示标准化孔隙度指标, 无量纲; ϕ_e 表示有效孔隙度; FZI 表示流动单元指数, 无量纲。

2 储层有效性评价研究

常规碳酸盐岩主要通过岩性、物性、储层储集空间类型等评价储层有效性^[12], 其中储层孔隙度是反映表征碳酸盐岩物性特征的重要参数。本节利用电阻率曲线, 建立储层有效性评价参数。

2.1 滑动窗口的电阻率归一化

研究区茅二段至茅顶储层主要分为 2 种类型: 第一种储层电阻率曲线呈箱形分布, 储层厚度较大, 该类储层主要分布在茅二上亚段和茅口组顶部; 第二种储层电阻率曲线呈漏斗状, 储层厚度较小, 主要分布在茅三段和茅二下亚段。2 种储层类型测井差异主要体现在电阻率背景值, 其原因为电阻率呈漏斗状的储层厚度较小, 受围岩影响较大, 而电阻率呈箱形储层厚度较大, 受围岩影响小。为解决此问

题, 采用滑动变窗口的电阻率归一化方法 [式 (11)], 通过当前深度点上下范围内的电阻率测量值进行归一化处理。这种方法能够突出显示电阻率曲线的局部变化, 减少围岩的影响。

$$RT_x = \frac{RT - \text{MIN}(RT_{\frac{x}{2}}, RT_{\frac{x}{2}})}{\text{MAX}(RT_{\frac{x}{2}}, RT_{\frac{x}{2}}) - \text{MIN}(RT_{\frac{x}{2}}, RT_{\frac{x}{2}})}$$

(11)

式中 RT_x 表示归一化后的电阻率, $\Omega \cdot m$; RT 表示当前深度点的电阻率, $\Omega \cdot m$; $RT_{\frac{x}{2}}$ 表示当前深度增加 $x/2 m$ 处点的电阻率, $\Omega \cdot m$; $RT_{-\frac{x}{2}}$ 表示前深度减小 $x/2 m$ 处点的电阻率, $\Omega \cdot m$; $\text{MIN}(RT_{\frac{x}{2}}, RT_{-\frac{x}{2}})$ 表示当前深度点上、下 $x/2 m$ 电阻率的最小值, $\Omega \cdot m$; $\text{MAX}(RT_{\frac{x}{2}}, RT_{-\frac{x}{2}})$ 表示当前深度点上、下 $x/2 m$ 电阻率的最大值, $\Omega \cdot m$; x 表示归一化的窗口, 经处理分析认为取 15 m 较合适。

如图 2-a 所示, 该井 2 952.3 ~ 2 955.8 m 段的平均电阻率为 800 $\Omega \cdot m$, 如图 2-b 所示, 3 056.6 ~ 3 063.5 m 段的平均电阻率为 25 $\Omega \cdot m$, 归一化后, 2 952.3 ~ 2 955.8 m 段的电阻率 (RT_{NOR}) 与 3 056.6 ~ 3 063.5 m 段接近, 数值主要为 0 ~ 0.5。根据现场生产资料, 2 952.3 ~ 2 955.8 m 段的日产气量为 $10.5 \times 10^4 m^3$, 3 056.6 ~ 3 063.5 m 段的日产气量为 $8.5 \times 10^4 m^3$, 都具备一定的生产潜力。故此方法解决了有一定生产潜力, 但电阻率曲线特征不明显的气层识别问题, 对于

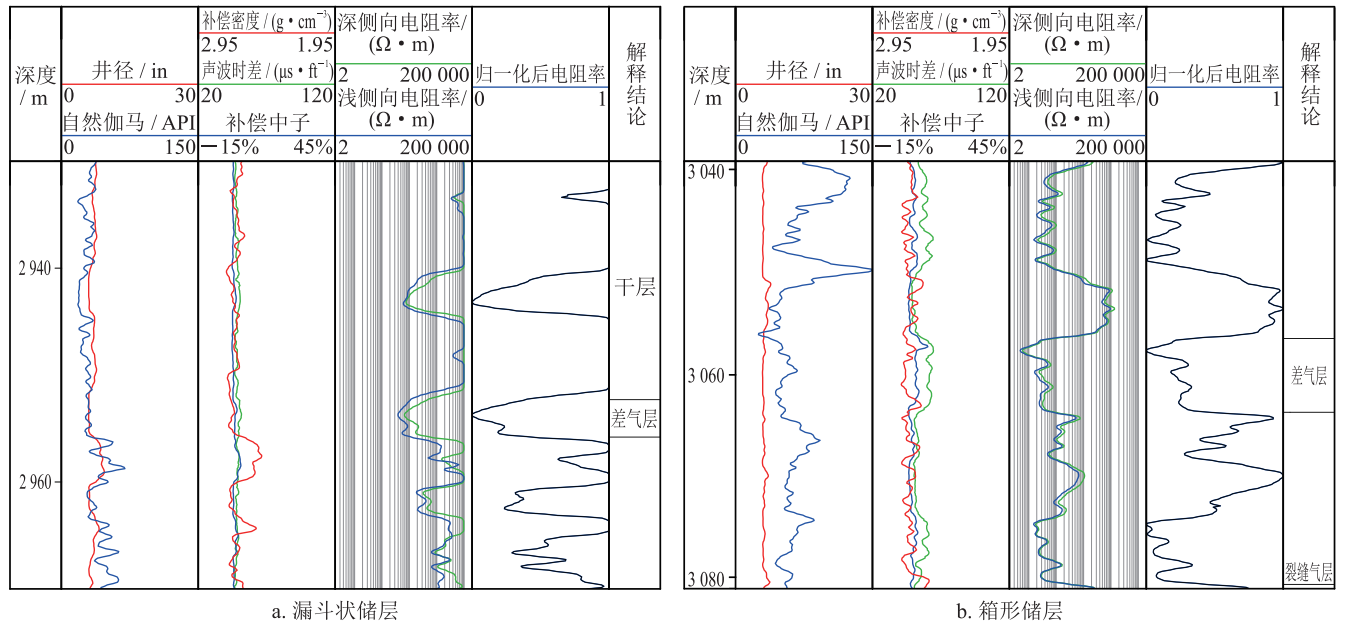


图 2 茅口组滑动变窗口归一化电阻率曲线示意图

注: 1 in=0.025 4 m, 下同。

其他储层物性不好的小层，这种方法也会着重显示，因此还需结合其他能够反映储层孔隙的储层特征参数评价有效性。

2.2 孔隙度谱参数提取

研究区碳酸盐岩储集空间主要由裂缝和孔隙组成。常规孔隙度计算模型只能计算总孔隙度，无法区分原生孔隙度和次生孔隙度。次生孔隙度的表征通常借助 2 种资料：核磁共振 T_2 谱和电成像测井。研究区核磁共振测井资料质量较差，故只借助电成像孔隙度谱指示次生孔隙发育程度。

利用式 (12)、(13)，可以计算孔隙度谱均值和方差。孔隙度谱均值和方差是定性反映原生孔隙和次生孔隙发育程度的重要参数。通常孔隙度谱可分为 3 种形态：①窄单峰，主要反映原生孔隙；②后移单峰，主要反映次生孔隙；③多峰，包括原生和次生孔隙度。当为窄单峰和后移单峰时，利用孔隙度谱均值可识别原生孔隙和次生孔隙；当为多峰存在时，孔隙度谱

方差值较大。故可通过不同的孔隙谱分布反映裂缝、孔洞等次生构造^[16]。

$$\bar{\phi} = \sum_{i=1}^n \phi_i P_{\phi_i} / \sum_{i=1}^n P_{\phi_i}$$

(12)

$$\sigma_{\phi}^2 = \sum_{i=1}^n (\phi_i - \bar{\phi})^2 P_{\phi_i} / \sum_{i=1}^n P_{\phi_i}$$

(13)

式中 $\bar{\phi}$ 、 ϕ_i 分别表示电成像的孔隙度均值、孔隙度； P_{ϕ_i} 表示相应孔隙度的频数，无量纲； σ_{ϕ} 表示孔隙度分布谱方差，无量纲； n 表示孔隙度份额，采用千分孔隙度，取值范围为 0 ~ 1 000，无量纲。

2.3 储层有效性评价综合参数

根据测试和解释资料，部分物性较好井的压裂测试层均产气。对研究区具有电成像资料的 11 口井开展孔隙度谱的均值和方差处理，并绘制均值-方差图版(图 3-a)。孔隙度谱均值反映孔隙度值的大小，孔隙度谱方差代表孔隙发育程度，方差值越大，原生和次生孔隙度越发育。孔隙度谱的均值和方差与储层发育程度呈正相关关系。

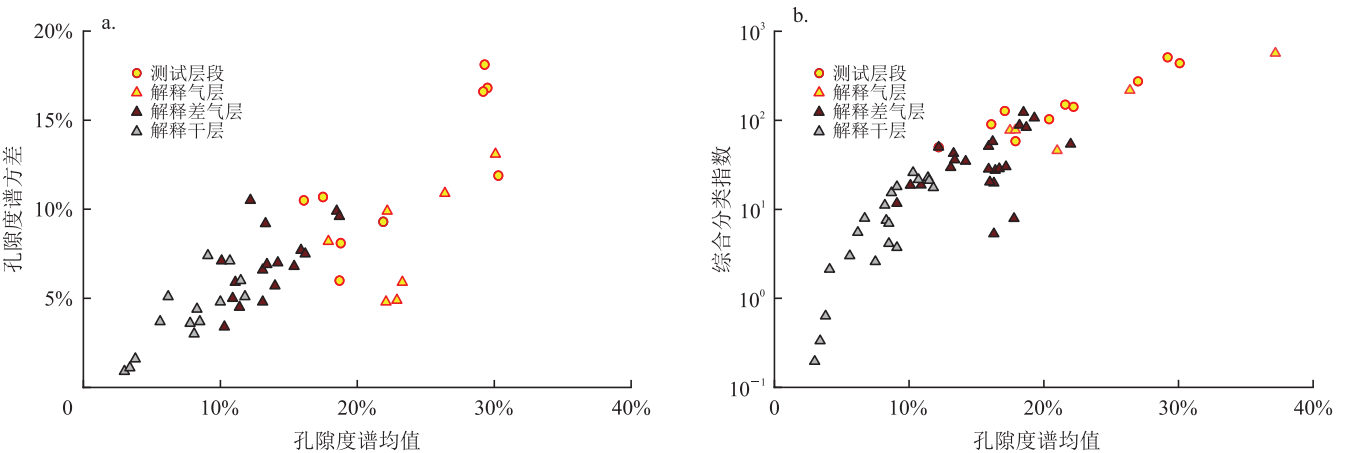


图 3 孔隙度谱均值-方差和储层有效性划分图版

结合孔隙度谱方差和均值、滑动变窗口归一化的电阻率曲线，建立储层有效性划分的综合分类指数 ($AVRT$)。统计不同测试层段和解释结论的综合分类指数 ($AVRT$) (图 3-b)，将储层分为一类储层、二类和三类储层。

$$AVRT = \frac{\phi_{MEA} \times \phi_{VAR}}{R_{TNOR}}$$

(14)

式中 ϕ_{MEA} 表示孔隙度谱均值； ϕ_{VAR} 表示孔隙度谱方差，无量纲； R_{TNOR} 表示滑动变窗口归一化后的电阻率曲线， $\Omega \cdot m$ 。

最终得到储层有效性划分参数表 (表 2)。不同储层类型的电阻率、归一化后的电阻率、孔隙度谱均值和方差取值范围存在重叠，而不同储层 $AVRT$ 能够得到相对明显的界限。

表 2 储层有效性划分参数表

储层类型	电阻率 / ($\Omega \cdot m$)	归一化后电阻率	孔隙度谱平均值	孔隙度谱方差	综合分类指数
一类	< 5 000	< 0.3	> 16%	> 4%	> 70
二类	1 000 ~ 10 000	0.2 ~ 0.5	10% ~ 14%	4% ~ 10%	20 ~ 70
三类	> 2 500	0.4 ~ 1.0	< 12%	< 6%	< 20

2.4 储层有效性评价参数应用实例

图 4 为研究区 A 井茅口组的储层有效性划分成果图。图中的第 7 和第 8 道分别为应用深侧向电阻率对数值和滑动变窗口归一化后的电阻率值储层分类结果。如图 4 所示，基于深侧向电阻率的储层分类结

果，2 952.3 ~ 2 955.8 m 层段为二类储层，据此钻探初期解释为差气层。基于变窗口归一化电阻率的储层分类结果为一类储层，测试日产气量为 $10.5 \times 10^4 \text{ m}^3$ ，测试结果显示为一类层。因此，应用滑动变窗口归一化的储层有效性分类指数效果更好。

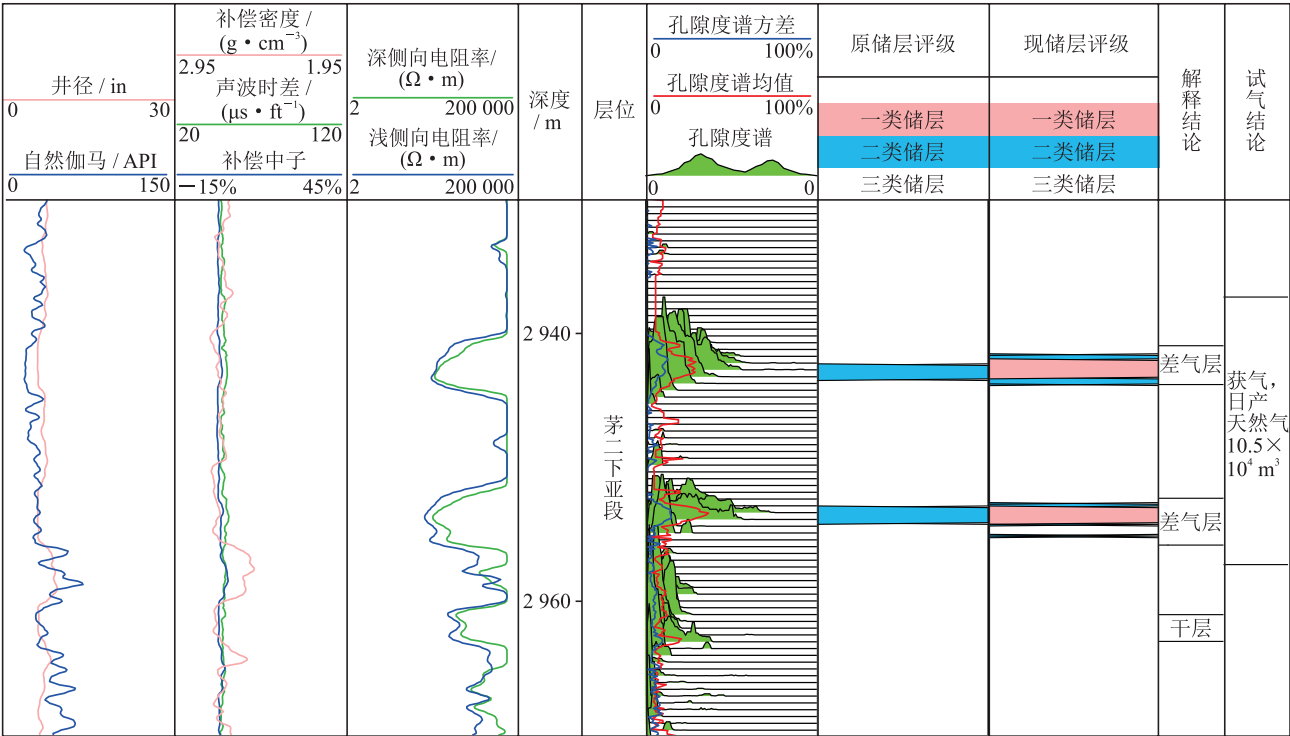


图 4 研究区 A 井茅口组储层分类对比图

将综合分类指数 ($AVRT$) 应用于研究区 155 个储层段评价中。应用深侧向电阻率储层有效性分类指数开展评价, 123 个层段评价结果与试油结果相符, 符合率为 79.4%, 而应用滑动变窗口归一化电阻率的储层分类指数开展评价, 有 141 个层段评价结果与试油结果相符, 符合率达到 91.1%, 符合率有显著提升。

3 流体识别新方法研究

碳酸岩储层流体识别难点是钻井液侵入深造成单一测井方法流体识别效果差。本文基于谭廷栋^[36-37]提出的背景值找气理论和方法, 本着发现差别和制造差别的原则, 探讨几种天然气识别方法, 并尝试形成一种流体识别综合指数, 以克服单一方法缺陷, 达到气体识别目的。研究区缺乏岩电实验资料, 故本部分利用试油资料和多种新技术测井资料, 进行流体识别方法的验证。

3.1 元素测井重构骨架值

在传统的碳酸盐岩地层矿物计算时, 白云岩和石灰岩的三孔隙度骨架值通常使用默认值, 这对大多数层段影响较小。然而, 研究区的石灰岩致密且三孔隙度曲线变化较小, 而储层较好段岩性通常存在白云岩化和硅化现象。因此, 本文结合斯伦贝谢公司的岩性扫描测井仪 (Litho Scanner) 测量得到的钙、镁、铝等元素含量, 通过氧闭合模型反演得到矿物组分含量^[38-39]。然后, 结合默认骨架值, 求得随元素测井岩性剖面变化的声波时差骨架值和密度骨架值。

$$DT_M = \frac{V_{DOL} \times DT_{DOL} + V_{CAL} \times DT_{CAL} + V_{QUA} \times DT_{QUA}}{V_{DOL} + V_{CAL} + V_{QUA}} \quad (15)$$

$$DEN_M = (V_{DOL} \times DEN_{DOL} + V_{CAL} \times DEN_{CAL} + V_{QUA} \times DEN_{QUA}) / (V_{DOL} + V_{CAL} + V_{QUA}) \quad (16)$$

式中 DT_M 表示重构的声波时差骨架值, $\mu\text{s}/\text{ft}$; DEN_M 表示重构后的密度骨架值, g/cm^3 ; V_{DOL} 、 V_{CAL} 、 V_{QUA} 分别表示元素测井得到的白云石、方解石和石英的

含量； DT_{DOL} 、 DT_{CAL} 、 DT_{QUA} 分别表示默认的白云岩、石灰岩、砂岩的声波时差骨架值，分别取值 43.5 $\mu\text{s}/\text{ft}$ 、47.5 $\mu\text{s}/\text{ft}$ 、55.5 $\mu\text{s}/\text{ft}$ ； DEN_{DOL} 、 DEN_{CAL} 、 DEN_{QUA} 分别表示默认的白云岩、石灰岩、砂岩的密度骨架值，分别取值 2.87 g/cm^3 、2.71 g/cm^3 、2.64 g/cm^3 。

3.2 基于纵横波的测井流体识别

3.2.1 合成横波时差叠加法

通常情况下，饱和水岩石纵波时差小于饱和气岩石纵波时差，饱和油岩石的纵波时差接近于饱和水岩石的纵波时差，而饱和水岩石的横波时差大于饱和气岩石的横波时差，饱和油岩石的横波时差接近于饱和水岩石的横波时差^[40]，即

$$DT_{pw} < DT_{pg}, DT_{pw} \approx DT_{po} \quad (17)$$

$$DT_{sw} > DT_{sg}, DT_{sw} \approx DT_{so} \quad (18)$$

式中 DT_{pw} 、 DT_{pg} 、 DT_{po} 分别表示饱和水、气、油时岩石的纵波时差， $\mu\text{s}/\text{ft}$ ； DT_{sw} 、 DT_{sg} 、 DT_{so} 分别表示饱和水、气、油时岩石的横波时差， $\mu\text{s}/\text{ft}$ 。

若直接使用纵波与横波时差测井曲线重叠，不能直观地识别气层。为提高气层识别分辨率，把测量的纵波时差测井曲线转换成合成横波时差，其本质仍为纵波和横波重叠识别气层。

$$\Delta DT_{s,\text{syn}} = \frac{\Delta DT_c - \Delta DT_{ma}}{\Delta DT_w - \Delta DT_{ma}} \Delta t_{sw} + \left(1 - \frac{\Delta DT_c - \Delta DT_{ma}}{\Delta DT_w - \Delta DT_{ma}}\right) \Delta DT_{sma} \quad (19)$$

式中 $\Delta DT_{s,\text{syn}}$ 表示合成横波时差， $\mu\text{s}/\text{ft}$ ； ΔDT_{sw} 表示孔隙中地层水的等效横波时差， $\mu\text{s}/\text{ft}$ ； ΔDT_{sma} 表示骨架的横波时差， $\mu\text{s}/\text{ft}$ ； ΔDT_c 表示纵波时差， $\mu\text{s}/\text{ft}$ ； ΔDT_w 表示孔隙中地层水的纵波时差， $\mu\text{s}/\text{ft}$ ； ΔDT_{ma} 表示骨架的纵波时差， $\mu\text{s}/\text{ft}$ 。

当测量横波时差小于合成横波时差时，指示气层；当测量横波时差等于合成横波时差时，指示非气层。

3.2.2 纵横波速度比值重叠法

纵横波速度比是识别气层的基础，其取决于岩石的体变模量和体密度，以及岩石的孔隙度和孔隙流体性质，而岩石的剪切模量仅与岩石的孔隙度相关，与孔隙流体无关^[41]。在储层岩性和孔隙度相同时，气层纵波速度小于水层纵波速度，而气层横波速度大于水层横波速度。地层完全饱和水时的纵横波速度比值作为背景值，与岩石孔隙度和围限压力有关，可利用下式获得：

$$R^* = R_{ma}^* + m\varphi \quad (20)$$

式中 R^* 表示纵横波速度比，无量纲； R_{ma}^* 表示骨架的纵横波速度比，无量纲； m 表示与围限压力有关的经验转换系数，无量纲； φ 表示地层孔隙度。

测量的横波时差反映了地层的横波特征，而合成横波时差则反映了地层的纵波特征。当测量的横波时差曲线与合成横波时差曲线重叠，但幅度有差异时，指示为气层；而当两者没有明显的差别时，则指示为非气层。

3.2.3 等效弹性模量差比法

纵波等效弹性模量是杨氏模量和泊松比的函数^[32]：

$$E_c = \frac{DEN_b}{\Delta DT_c^2} \times 10^{16} \quad (21)$$

式中 E_c 表示纵波等效弹性模量， $\text{g} \cdot (\text{ft}/\mu\text{s}) \cdot \text{cm}^{-3}$ ； ΔDT_c 表示纵波时差， $\mu\text{s}/\text{ft}$ ； DEN_b 表示体积密度， g/cm^3 。

岩石的等效模量差比值等于水层岩石的等效弹性模量减去目的层骨架的等效弹性模量，然后除以目的层骨架的等效弹性模量，表示为：

$$DR = \frac{E_{cw} - E_c}{E_c} \quad (22)$$

式中 DR 表示油气判别系数，无量纲； E_{cw} 表示水层岩石的等效弹性模量， $\text{g} \cdot (\text{ft}/\mu\text{s}) \cdot \text{cm}^{-3}$ ； E_c 表示目的层的等效弹性模量， $\text{g} \cdot (\text{ft}/\mu\text{s}) \cdot \text{cm}^{-3}$ 。

当 $DR > 0$ ，指示是气层；当 $DR < 0$ ，指示是非气层。通常，裂缝性油气层的等效弹性模量差比大于或等于 0.15，0.15 可作为下限值。

3.2.4 流体识别综合指数

针对上述 3 种流体识别方法，利用最大值加权平均的方式建立流体识别综合指数。最大值加权 (Maximum Likelihood Weighting, MLW) 是一种统计方法，通过对合成横波时差叠加法、纵横波速度比值法、纵波等效弹性模量差比法得到的流体识别最大指标赋予权重，通过平均加权方式综合得到流体识别指数。最大值加权能够有效地综合多种测井参数，提供更加可靠和精确的识别结果。

$$HC = \sum_{i=1}^3 A \text{MAX}(HC_i) \quad (23)$$

式中 HC 表示基于测井曲线的流体识别指数，无量纲； HC_i 分别表示合成横波时差叠加法、纵横波速度比值重叠法、纵波等效弹性模量差比法，无量纲； A 表示流体指标权重，此取平均加权值，0.50。

如图 5 为 B 井测试层段，第 7～9 道分别为合成横波时差叠加法、纵横波速度比值法、纵波等效弹性模量差比法的流体识别结果，第 10 道为综合流

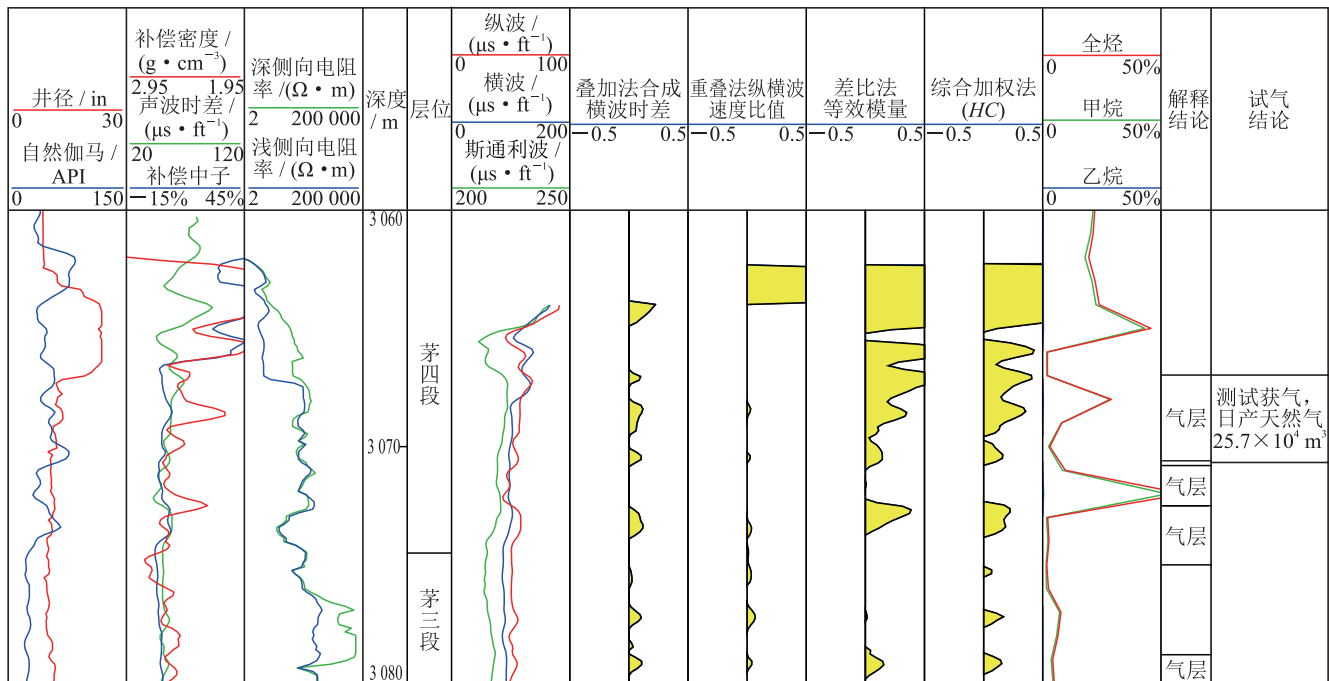


图 5 研究区 B 井茅口组测井流体识别综合评价图

体识别指数道。图 5 显示纵横波速度比值法在此段的流体识别结果较差,合成横波时差叠加法和等效弹性模量差比法的识别效果较好,流体综合识别指数识别目的层流体效果较好,为气层。

3.3 基于电阻率谱特征参数的流体识别

研究区缝洞非均质性强,钻井过程中低电阻率的钻井液会沿缝洞等通道进入地层。在含气层段,由于其本身为高电阻率,钻井液会使电阻率呈现随机分布的特点;相反,在水层中,由于其本身电阻率较低,钻井液的影响较小,因此视地层水电阻率变化相对较小^[26]。基于此,借助阿尔奇公式可以计算得到视地层水电阻率值(R_{wa})。通过计算和统计一定深度窗长的 R_{wa} 值,并以 R_{wa} 值为横轴、频率为纵轴,绘制视地层水电阻率分布谱,从而根据不同幅度分布区分气层和水层。

电成像测井资料经过浅侧向电阻率测井资料刻度后,可以根据视地层水电阻率谱特征判别储层流体性质。根据水层和油气层在电阻率谱分布上的差异,通过式(24)、(25)计算电阻率谱的均值和方差。结合 $AVRT$,以 $AVRT$ 为横轴表征储层有效性,以视地层水电阻率谱均值为纵轴表征流体性质,最终得到茅口组气层、水层、干层划分图版,简称 $A-R$ 图版,如图 6 所示。

$$\overline{RT} = \frac{\sum_{i=1}^n R_{wai} P_{R_{wai}}}{\sum_{i=1}^n P_{R_{wai}}} \quad (24)$$

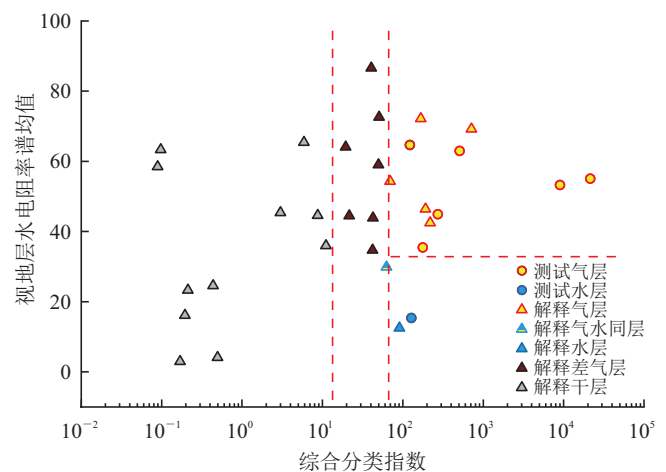


图 6 研究区综合分类指数—视地层水电阻率谱均值流体划分图版

$$\sigma_{RT}^2 = \frac{\sum_{i=1}^n P_{R_{wai}} (R_{wai} - \phi_{R_{wai}})^2}{\sum_{i=1}^n P_{R_{wai}}} \quad (25)$$

式中 $\overline{RT}$ 表示电成像的地层水电阻率均值, $\Omega \cdot m$; R_{wai} 表示计算的成像视地层水电阻率, $\Omega \cdot m$; $P_{R_{wai}}$ 表示相应的视地层水电阻率频数, 无量纲; σ_{RT}^2 表示视地层水电阻率分布方差, 无量纲。

图 6 利用综合分类指数($AVRT$)和视地层水电阻率谱均值 2 个参数将数据点分为 4 部分: 当 $AVRT > 70$ 时, 随着视地层水电阻率谱均值的增加, 主要的流体由水层、气水同层、气层过渡; 当 $AVRT < 70$ 时, 随 $AVRT$ 增加, 主要的流体由于层向差气层过渡。

3.4 流体识别应用实例

结合研究区 6 口井 7 个测试层段，针对研究茅口组发育风化壳、内幕岩溶和断溶体 3 类储层，得出上述 5 种流体识别方法适用分析（表 3）。综合流

体识别指数的符合率为 85.7%，其准确率明显大于合成横波时差叠加法、纵横波速度比值法、纵波等效弹性模量差比法；而基于 $A-R$ 图版的流体识别符合率为 100%，结果全部吻合。

表 3 不同方法流体识别结果汇总表

方法	风化壳		内幕岩溶		断溶体		
	自贡 1 井气层	自贡 1 井水层	吉富 1 井气层	吉富 2 井气层	吉富 6 井气层	吉富 7 井气层	吉富 8 井气层
合成横波时差叠加法	✓			✓	✓	✓	✓
纵横波速度比值重叠法				✓	✓	✓	✓
纵波等效弹性模量差比法		✓		✓	✓	✓	✓
流体综合识别法	✓	✓		✓	✓	✓	✓
电阻率谱流体识别法	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓

图 7 为研究区新测试井，前期解释后认为 2 895.8 ~ 2 907.0 m 和 2 908.3 ~ 2 919.4 m 段为气层，且厚度较大、电阻率值较低，但该段前期测试为干层。利用本文的方法二次解释后，认为 2 884.0 ~ 2 887.0 m 段也具有一定的开发潜力。图 7 中 2 884.0 ~ 2 887.0 m

段虽然气测值较低，但其孔隙度谱和电阻率谱的均值和方差值较大，为气层特征。而经过试气后，获日产 $24.5 \times 10^4 \text{ m}^3$ 的天然气气流，故该层的测试结果验证了 $A-R$ 图版和综合分类指数识别流体准确性。

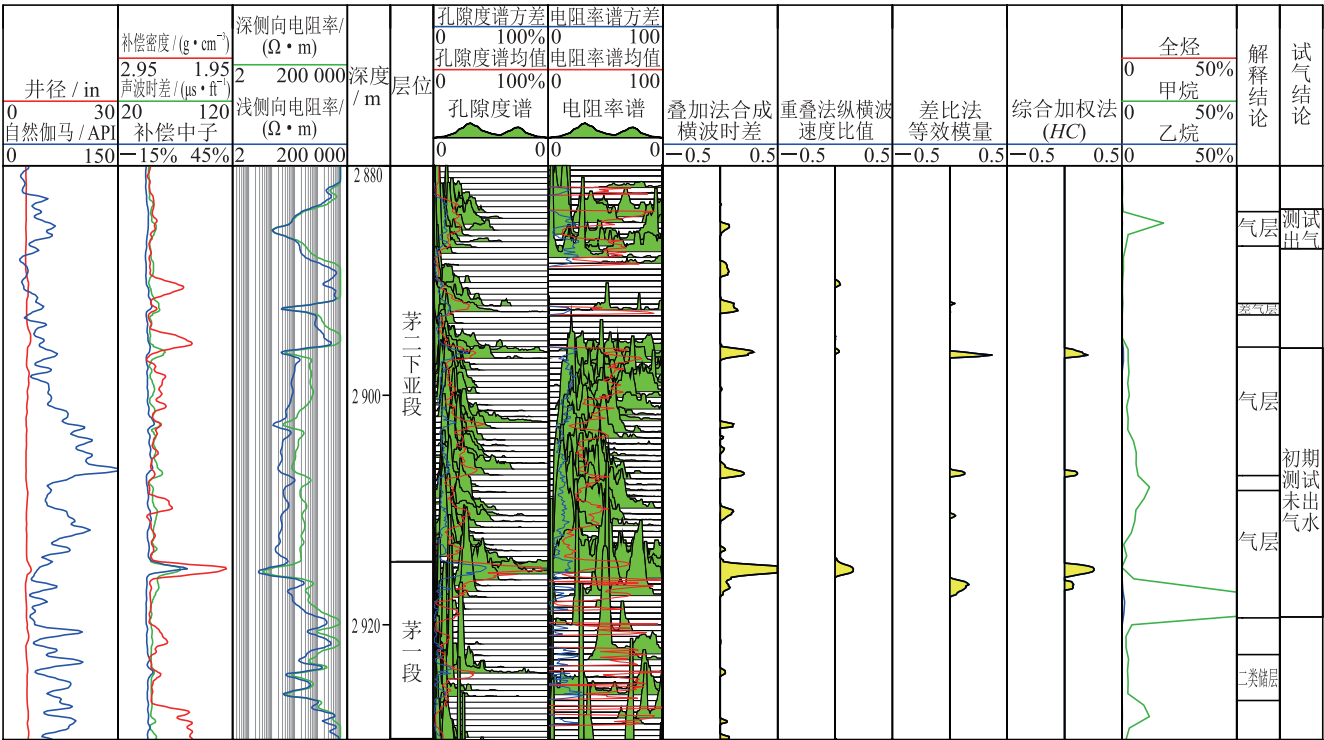


图 7 研究区 C 井茅口组测井综合解释图

4 结论

1) 川南地区茅二上碳酸盐岩的储层类型较为复杂，储层有效性评价困难。本文结合滑动变窗口归一

化后的深侧向电阻率曲线、电成像孔隙度谱的均值和方差参数，建立了储层有效性评价参数 $AVRT$ ，将研究区储层划分为一类储层、二类储层和三类储层，并对研究区 155 个层段进行解释，结果显示符合率

为 91.1%。

2) 利用合成横波时差叠加法、纵横波速度比值重叠法、纵横波等效弹性模量差比法等多种纵横波曲线, 储层流体性质进行判别, 并通过最大值加权平均的方式得到基于测井曲线的流体识别 HC 参数, 流体识别符合率为 85.7%; 并结合视地层水电阻率谱均值和方差参数, 从各个参数对流体类型影响的机理出发, 建立基于 $AVRT$ 和视地层水电阻率谱均值的流体识别图版, 流体识别符合率为 100%。

3) 对研究区 7 个新井测试层段应用本文方法, 结果显示新井试油层段符合率为 100%。但由于研究区内拥有电阻率谱的测试层段较少, 电阻率谱均值和 $AVRT$ 流体识别图版仍需进一步检验和完善。

参 考 文 献

- [1] 文龙, 谢继容, 张本健, 等. 四川盆地德阳—安岳裂陷西侧大探 1 井震旦系灯影组天然气勘探重大突破及意义 [J]. 天然气工业, 2023, 43(11): 7-18.
WEN Long, XIE Jirong, ZHANG Benjian, et al. Well Datan 1 in west side of Deyang—Anyue rift, Sichuan Basin: Great breakthrough in natural gas exploration in Sinian Dengying Formation and its significance[J]. Natural Gas Industry, 2023, 43(11): 7-18.
- [2] 王国锋, 张大伟, 邓守伟, 等. 四川盆地自贡区块茅口组岩溶储层发育特征及其主控因素 [J]. 天然气工业, 2022, 42(9): 63-75.
WANG Guofeng, ZHANG Dawei, DENG Shouwei, et al. Development characteristics and main controlling factors of Maokou Formation karst reservoirs in Zigong Block of the Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 2022, 42(9): 63-75.
- [3] 杨雨, 谢继容, 文龙, 等. 四川盆地东北部飞仙关组台缘早期鲕滩带的发现及宣探 1 井天然气勘探突破意义 [J]. 天然气工业, 2023, 43(9): 1-13.
YANG Yu, XIE Jirong, WEN Long, et al. Discovery of early platform-margin oolitic shoal zone of Feixianguan Formation in the northeastern Sichuan Basin and natural gas exploration breakthrough in Well Xuantan 1[J]. Natural Gas Industry, 2023, 43(9): 1-13.
- [4] 周刚, 罗冰, 张新, 等. 四川盆地德阳—安岳凹槽形成机理及灯影组沉积新格局 [J]. 天然气工业, 2024, 44(8): 13-28.
ZHOU Gang, LUO Bing, ZHANG Xin, et al. Formation mechanism of Deyang—Anyue trough and new sedimentation pattern of Dengying Formation in the Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 2024, 44(8): 13-28.
- [5] 曾德铭, 谢晓斌, 黄董, 等. 四川盆地北部二叠系茅口组沉积特征及油气意义 [J]. 西南石油大学学报 (自然科学版), 2023, 45(1): 1-12.
ZENG Deming, XIE Xiaobin, HUANG Dong, et al. Sedimentary Characteristics of the Maokou Formation of the Permian in Northern Sichuan Basin and Its Petroleum Significance[J]. Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition), 2023, 45(1): 1-12.
- [6] 刘宏, 王双琴, 谭磊, 等. 川中龙女寺构造栖霞组薄储层预测地质模型 [J]. 西南石油大学学报 (自然科学版), 2023, 45(4): 19-30.
LIU Hong, WANG Shuangqin, TAN Lei, et al. Thin Reservoir Prediction and Exploration Area Selection of Qixia Formation in Longnvsi Structure, Central Sichuan Basin[J]. Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition), 2023, 45(4): 19-30.
- [7] 杨跃明, 王小娟, 陈双玲, 等. 四川盆地中部地区侏罗系沙溪庙组沉积体系演化及砂体发育特征 [J]. 天然气工业, 2022, 42(1): 12-24.
YANG Yueming, WANG Xiaojuan, CHEN Shuangling, et al. Sedimentary system evolution and sandbody development characteristics of Jurassic Shaximiao Formation in the central Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 2022, 42(1): 12-24.
- [8] 黄先平, 杨天泉, 张红梅. 四川盆地地下二叠统沉积相及其勘探潜力区研究 [J]. 天然气工业, 2004, 24(1): 10-12.
HUANG Xianping, YANG Tianquan, ZHANG Hongmei. Research on the sedimentary facies and exploration potential areas of Lower Permian in Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 2004, 24(1): 10-12.
- [9] 何春蕾, 王柏苍, 辜穗, 等. 四川盆地致密砂岩气产业可持续发展战略管理 [J]. 天然气工业, 2022, 42(1): 170-175.
HE Chunlei, WANG Baicang, GU Sui, et al. Strategic management for the sustainable high-quality development of tight sandstone gas industry in the Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 2022, 42(1): 170-175.
- [10] 李国辉, 苑保国, 朱华, 等. 四川盆地超级富气成因探讨 [J]. 天然气工业, 2022, 42(5): 1-10.
LI Guohui, YUAN Baoguo, ZHU Hua, et al. Genesis of super-rich gas in the Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 2022, 42(5): 1-10.
- [11] 何钊, 高兆龙, 李国蓉, 等. 川南云锦地区茅口组储集层溶蚀期次及模式 [J]. 新疆石油地质, 2022, 43(5): 537-545.
HE Zhao, GAO Zhaolong, LI Guorong, et al. Dissolution stage and pattern of reservoirs in Maokou Formation in Yunjin area, southern Sichuan Basin[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2022, 43(5): 537-545.
- [12] 杨永航, 司马立强, 王亮, 等. 川东南茅一段碳酸盐岩储层测井有效性评价 [J]. 科学技术与工程, 2023, 23(3): 998-1007.
YANG Yonghang, SIMA Liqiang, WANG Liang, et al. Effectiveness evaluation of carbonate reservoir by well logs in Mao-first member in southeast Sichuan Basin[J]. Science Technology and Engineering, 2023, 23(3): 998-1007.

- [13] 田瀚, 冯庆付, 李昌, 等. 碳酸盐岩缝洞型储层有效性评价新方法[J]. 测井技术, 2019, 43(2): 135-139.
TIAN Han, FENG Qingfu, LI Chang, et al. A new method for evaluating the effectiveness of fractured-vuggy carbonate reservoirs[J]. Well Logging Technology, 2019, 43(2): 135-139.
- [14] 贾俊. 叙利亚 Tishirine 油田复杂碳酸盐岩储层有效性综合评价[J]. 油气藏评价与开发, 2020, 10(2): 30-36.
JIA Jun. Comprehensive evaluation for effectiveness of complex carbonate reservoir: A case from Tishirine Oilfield in Syria[J]. Petroleum Reservoir Evaluation and Development, 2020, 10(2): 30-36.
- [15] 张峰, 罗少成, 李震, 等. 四川盆地茅口组岩溶缝洞型储层有效性测井评价[J]. 石油钻探技术, 2020, 48(6): 116-122.
ZHANG Feng, LUO Shaocheng, LI Zhen, et al. Logging evaluation on the effectiveness of karst fractured-vuggy reservoirs in the Maokou Formation, Sichuan Basin[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2020, 48(6): 116-122.
- [16] 李宁, 肖承文, 伍丽红, 等. 复杂碳酸盐岩储层测井评价: 中国的创新与发展[J]. 测井技术, 2014, 38(1): 1-10.
LI Ning, XIAO Chengwen, WU Lihong, et al. The innovation and development of log evaluation for complex carbonate reservoir in China[J]. Well Logging Technology, 2014, 38(1): 1-10.
- [17] 陈义祥, 任小锋, 牟瑜, 等. 基于电成像测井的致密碳酸盐岩储层有效性评价方法[J]. 测井技术, 2020, 44(1): 49-54.
CHEN Yixiang, REN Xiaofeng, MU Yu, et al. Effectiveness evaluation method for tight carbonate reservoirs based on electrical imaging logging data[J]. Well Logging Technology, 2020, 44(1): 49-54.
- [18] 盛茂, 张家麟, 张彦军, 等. 基于数据驱动的水平井暂堵压裂有效性评价新模型[J]. 天然气工业, 2023, 43(9): 132-140.
SHENG Mao, ZHANG Jialin, ZHANG Yanjun, et al. A new data-driven effectiveness evaluation model of temporary plugging fracturing for horizontal wells[J]. Natural Gas Industry, 2023, 43(9): 132-140.
- [19] 余刚, 魏莉, 王高科, 等. 柴达木盆地西部地区复杂碳酸盐岩储层流体识别新方法[J]. 测井技术, 2021, 45(2): 149-155.
SHE Gang, WEI Li, WANG Gaoke, et al. New method for fluid identification of complex carbonate reservoirs in western Qaidam Basin[J]. Well Logging Technology, 2021, 45(2): 149-155.
- [20] 边会媛, 潘保芝. 利用横波数据进行低孔低渗储层气层识别与储层参数定量评价[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2010, 40(增刊 1): 106-109.
BIAN Huiyuan, PAN Baozhi. Gas identification and quantitative evaluation of low porosity and low permeability reservoir parameters using dipole shear wave data[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2010, 40(S1): 106-109.
- [21] 李国宝, 唐雪萍, 杨文督, 等. 碳酸盐岩储层流体性质的纵横波速度比判别法[J]. 天然气勘探与开发, 2008, 31(3): 30-32.
LI Guobao, TANG Xueping, YANG Wendu, et al. Distinguishing method of P-S wave velocity ratio of fluid property in carbonate reservoir[J]. Natural Gas Exploration and Development, 2008, 31(3): 30-32.
- [22] 邵维志, 陆福. 碳酸盐岩储层流体性质识别新技术[J]. 测井技术, 2002, 26(1): 60-63.
SHAO Weizhi, LU Fu. A new method to identify fluid property in carbonate reservoir[J]. Well Logging Technology, 2002, 26(1): 60-63.
- [23] 谭廷栋. 用等效弹性模量差比法识别裂缝性气层[J]. 天然气工业, 1985, 5(1): 12-20.
TAN Tingdong. Identification of fractured gas layers using the equivalent elastic modulus difference ratio method[J]. Natural Gas Industry, 1985, 5(1): 12-20.
- [24] 张攀, 刘红岐, 王伟俊, 等. 常规测井一气测资料在 H 油田 K 油藏碳酸盐岩储层流体识别中的应用[J]. 地质科技通报, 2022, 41(3): 140-149.
ZHANG Pan, LIU Hongqi, WANG Weijun, et al. Application of conventional logging and gas logging data to fluid identification of carbonate reservoirs in K reservoir of H Oilfield[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2022, 41(3): 140-149.
- [25] 李朋. 西部 XX 火山岩气田气水测井识别方法研究[D]. 成都: 西南石油大学, 2019.
LI Peng. Study on gas-water logging identification methods in volcanic gas fields in Western China[D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2019.
- [26] 李庆峰, 李晓峰, 刘岩. 白云岩储层电成像视地层水电阻率流体识别技术[J]. 测井技术, 2017, 41(4): 412-415.
LI Qingfeng, LI Xiaofeng, LIU Yan. Fluid identification technique based on imaging apparent formation water resistivity in dolomite reservoirs[J]. Well Logging Technology, 2017, 41(4): 412-415.
- [27] 雍世和, 张超谟. 测井数据处理与综合解释[M]. 东营: 中国石油大学出版社, 2007.
YONG Shihe, ZHANG Chaomo. Logging data processing and comprehensive interpretation[M]. Dongying: China University of Petroleum Press, 2007.
- [28] 黎雨航. 塔河油田鹰山组碳酸盐岩储层测井评价方法及主控因素[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2023.
LI Yuhang. Logging evaluation method and main controlling factors of carbonate reservoir in the Lower Yingshan Formation of Tahe Oilfield[D]. Beijing: China University of Petroleum (Beijing), 2023.
- [29] 李善军, 肖承文, 汪涵明, 等. 裂缝的双侧向测井响应的数学模型及裂缝孔隙度的定量解释[J]. 地球物理学报, 1996, 39(6): 845-852.
LI Shanjun, XIAO Chengwen, Wang Hanming, et al. Mathematical model of dual laterolog response to fracture and quantitative interpretation of fracture porosity[J]. Chinese Journal of Geophysics, 1996, 39(6): 845-852.

- [30] 蔺学旻. 塔河油田碳酸盐岩裂缝孔隙度计算方法的完善 [J]. 内蒙古石油化工, 2023, 49(6): 116-119.
LIN Xuemin. Improvement of calculation methods for fracture porosity in carbonate reservoirs of the Tahe Oilfield[J]. Inner Mongolia Petrochemical Industry, 2023, 49(6): 116-119.
- [31] 尚锁贵, 高科超, 高强勇, 等. 裂缝发育程度对低孔隙度岩石渗流特性的影响 [J]. 科学技术与工程, 2023, 23(23): 9809-9819.
SHANG Suogui, GAO Kechao, GAO Qiangyong, et al. Influence of fracture development on seepage characteristics of low-porosity rocks[J]. Science Technology and Engineering, 2023, 23(23): 9809-9819.
- [32] 邓少贵, 莫宣学, 卢春利, 等. 缝-洞型地层缝洞的双侧向测井响应数值模拟 [J]. 石油勘探与开发, 2012, 39(6): 706-712.
DENG Shaogui, MO Xuanxue, LU Chunli, et al. Numerical simulation of the dual laterolog response to fractures and caves in fractured-cavernous formation[J]. Petroleum Exploration and Development, 2012, 39(6): 706-712.
- [33] HEARN C L, EBANKS W J, Jr, TYE R S, et al. Geological factors influencing reservoir performance of the Hartzog Draw field, Wyoming[J]. Journal of Petroleum Technology, 1984, 36(8): 1335-1344.
- [34] 赵军, 江同文, 王焕增, 等. 基于流动单元的碳酸盐岩渗透率建模方法 [J]. 天然气工业, 2007, 27(2): 46-48.
ZHAO Jun, JIANG Tongwen, WANG Huanzeng, et al. Flow-unit-based modeling of carbonate reservoir permeability[J]. Natural Gas Industry, 2007, 27(2): 46-48.
- [35] 何传亮, 康建云, 王辛, 等. 基于沉积微相-储集空间类型的储集层流动单元划分——以彭州气田雷口坡组碳酸盐岩储集层为例 [J]. 新疆石油地质, 2020, 41(4): 435-443.
HE Chuanliang, KANG Jianyun, WANG Xin, et al. Reservoir flow unit division based on sedimentary microfacies-reservoir space type: A case of carbonate reservoir of Leikoupo Formation in Pengzhou Gas Field[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2020, 41(4): 435-443.
- [36] 谭廷栋. 几种有效的测井找气方法 [J]. 地球物理学报, 1992, 35(1): 111-120.
TAN Tingdong. Several effective methods for finding gas by well-logging[J]. Chinese Journal of Geophysics, 1992, 35(1): 111-120.
- [37] 谭廷栋. 测井找气方法的进展——纪念《天然气工业》杂志创刊十周年 [J]. 天然气工业, 1991, 11(4): 39-42.
TAN Tingdong. Advances in well logging methods for gas detection: Commemorating the 10th anniversary of the journal "Natural Gas Industry" [J]. Natural Gas Industry, 1991, 11(4): 39-42.
- [38] 闫学洪, 曹春锋, 王慧. 岩性扫描测井资料处理解释方法研究与应用 [J]. 测井技术, 2018, 42(5): 503-508.
YAN Xuehong, CAO Chunfeng, WANG Hui. Research and application on processing and interpretation of litho scanner logging data[J]. Well Logging Technology, 2018, 42(5): 503-508.
- [39] 魏国, 张审琴, 侯淦译. 岩性扫描测井技术在青海油田的应用 [J]. 测井技术, 2015, 39(2): 213-216.
WEI Guo, ZHANG Shenqin, HOU Songyi. Application of LithoScanner logging technology in Qinghai Oilfield[J]. Well Logging Technology, 2015, 39(2): 213-216.
- [40] 何治亮, 赵向原, 张文彪, 等. 深层-超深层碳酸盐岩储层精细地质建模技术进展与攻关方向 [J]. 石油与天然气地质, 2023, 44(1): 16-33.
HE Zhiliang, ZHAO Xiangyuan, ZHANG Wenbiao, et al. Progress and direction of geological modeling for deep and ultra-deep carbonate reservoirs[J]. Oil & Gas Geology, 2023, 44(1): 16-33.
- [41] 刘国强, 谭廷栋. 孔隙度和含气饱和度的弹性模量计算方法 [J]. 石油勘探与开发, 1993, 20(5): 33-41.
LIU Guoqiang, TAN Tingdong. Porosity and gas-saturation determination using elastic moduli[J]. Petroleum Exploration and Development, 1993, 20(5): 33-41.

(修改回稿日期 2024-07-20 编辑 韩 建)



本文互动