

引文：赖锦，庞小娇，赵鑫，等. 测井地质学研究中的典型误区与科学思维 [J]. 天然气工业, 2022, 42(7): 31-44.
LAI Jin, PANG Xiaojiao, ZHAO Xin, et al. Typical misunderstandings and scientific ideas in well logging geology research[J]. Natural Gas Industry, 2022, 42(7): 31-44.

测井地质学研究中的典型误区与科学思维

赖 锦^{1,2} 庞小娇² 赵 鑫² 赵仪迪²
王贵文^{1,2} 黄玉越² 李红斌² 黎雨航²

1. 油气资源与探测国家重点实验室·中国石油大学(北京) 2. 中国石油大学(北京)地球科学学院

摘要：测井地质学方法理论体系在基础地质、石油地质和工程地质等领域得到广泛应用，但不同测井系列对地质信息响应敏感性的差异、多重测井信息地球物理属性与岩石地质成因不对应性等都将导致测井地质学研究过程中常出现误区，亟需解剖测井地质学研究中的典型错误案例以探索相应的科学思维与对策。为此，在分析测井地质学研究中的典型误区的基础上，分析了不同测井系列纵向分辨率尺度及其与探测深度的矛盾，阐明了不同尺度数据融合的重要性，明确了引起测井“伪资料”的因素及其对解释评价的影响，并提出了一套针对地质解释测井评价的思路。研究结果表明：①测井地质学研究中的典型误区可归纳为地质体解释和储层属性参数计算两个方面误区；②高密度、高电阻率泥岩等特殊地质现象会导致测井资料的多解性，测井地质解释时应注重其岩石物理响应机理；③非常规油气测井评价需要电成像、偶极声波和核磁共振测井等新技术的融合，且岩心资料的刻度以及地质思维的融入可提高解释精度；④在测井井旁构造解析、沉积学响应、地应力评价以及裂缝识别等过程中，应融合地质思维，来规避不同地质现象在测井上的同一响应导致的测井解释误区。结论认为，从地质到测井再到地质，从实践到认识再到实践，从“一孔之见”到“一孔百见”的辩证和系统性思维，可以为测井地质学综合研究提供科学思路。

关键词：测井地质学；测井系列；特殊地质现象；多解性；岩石物理响应机理；新技术融合；综合解释；误区与对策

DOI: 10.3787/j.issn.1000-0976.2022.07.004

Typical misunderstandings and scientific ideas in well logging geology research

LAI Jin^{1,2}, PANG Xiaojiao², ZHAO Xin², ZHAO Yidi², WANG Guiwen^{1,2}, HUANG Yuyue², LI Hongbin², LI Yuhang²

(1. State Key Laboratory of Petroleum Resource and Prospecting//China University of Petroleum <Beijing>, Beijing 102249, China; 2. College of Geosciences, China University of Petroleum <Beijing>, Beijing 102249, China)

Natural Gas Industry, Vol.42, No.7, p.31-44, 7/25/2022. (ISSN 1000-0976; In Chinese)

Abstract: The method and theoretical system of well logging geology has been widely used in the fields of basic geology, petroleum geology and engineering geology, but the different response sensitivity of different logging series to geological information and the mismatching between geophysical properties of multiple well logs and geological genesis of rocks frequently result in misunderstandings in the research process of well logging geology. Therefore, it is in an urgent need to analyze the typical misunderstanding cases in the research of well logging geology and explore the corresponding scientific ideas and countermeasures. After analyzing the typical misunderstandings in the research of well logging geology, this paper investigates vertical resolution scale of various logging series and its contradiction with detection depth and illustrates the importance of the integration of different scales of data. In addition, the factor inducing "fake logging data" and its influence on interpretation evaluation are clarified and a set of ideas for logging evaluation of geological interpretation is put forward. And the following research results are obtained. First, the typical misunderstandings in the research of well logging geology can be classified into categories, namely geological body interpretation misunderstanding and reservoir property parameter calculation misunderstanding. Second, special geological phenomena, such as high density and high resistivity mudstone can lead to logging data ambiguity, so attention shall be paid to petrophysical response mechanisms during geological logging interpretation. Third, to carry out logging evaluation of unconventional oil and gas, it is necessary to integrate new technologies of electric imaging logging, dipole acoustic logging and nuclear magnetic resonance logging, and the calibration of core data and the integration of geological ideas can improve the interpretation accuracy. Fourth, In the process of borehole structural logging analysis, sedimentological response, in-situ stress evaluation and fracture identification, geological ideas shall be integrated to avoid the logging interpretation misunderstanding caused by the same response of different geological phenomena in well logs. In conclusion, the dialectical and systematic thinking from geology to logging and then to geology, from practice to recognition and then to practice and from "anarrow view" to "abroad view" can provide a scientific idea for the comprehensive research of well logging geology.

Keywords: Well logging geology; Log series; Special geological phenomenon; Ambiguity; Petrophysical response mechanism; Integration of new technologies; Comprehensive interpretation; Misunderstanding and countermeasure

基金项目：国家自然科学基金项目“陆相湖盆细粒沉积岩多尺度纹层结构与微观孔隙结构特征关联性研究及其测井评价新方法”（编号：42002133）、中国石油大学（北京）科研启动基金项目“基于纹层结构的页岩油甜点高分辨率测井评价”（编号：2462021YXZZ003）、中国石油—中国石油大学（北京）战略合作科技专项项目“准噶尔盆地玛湖中下组合和吉木萨尔陆相页岩油高效勘探开发理论及关键技术研究”（编号：ZLZX2020-01-06-01）。

作者简介：赖锦，1988年生，副教授，博士研究生导师，本刊青年编委；从事沉积、储层和测井地质学教学与研究工作。地址：(102249)北京市昌平区府学路18号。ORCID: 0000-0002-5247-8837。E-mail: laijin@cup.edu.cn

通信作者：王贵文，1966年生，教授，博士研究生导师；主要从事测井地质学和储层沉积学等领域的研究与教学工作。地址：(102249)北京市昌平区府学路18号。E-mail: wanggw@cup.edu.cn

0 引言

地球物理测井作为地质学家的“眼睛”，测井探测的是地层声学（声波时差、幅度）、电磁学（电阻率、核磁）和核物理（放射性、伽马射线）等岩石物理属性^[1-4]。目前，测井技术已广泛运用于基础地质（构造、地层和沉积等）、石油地质（测井储层评价、烃源岩及源储组合评价等）和工程地质（钻井设计、压裂等）等领域^[5-7]。测井解释是把测井信息加工成地质、工程等信息的过程^[6]。地球物理测井以岩石声、电、核等岩石物理属性为理论基础试图解决地质与工程问题，不可避免地容易在测井—地质转换关系建立上产生误区^[3,8]。不同系列测井资料同时蕴含地球物理属性和地质属性，二者本身难以建立清晰准确的转换关系，同时测井曲线隐含的地质信息难以得到有效挖掘，这非常依赖于测井解释人员的地质经验^[6,9-10]。利用测井资料解决地质问题时，往往陷入“一孔之见”的局限。

测井地质学是地球物理测井与地质学相互交叉融合的学科，在地质学理论指导下的测井综合解释可以提供更科学的解释结论，实现测井由“一孔之见”到“一孔百见”的跨越。因此，测井地质学研究首先要注重测井技术的地球物理属性，并深入融合地质学思维^[3,11]。透过现象看本质，强调矛盾与方案，对于测井地质学分析非常重要，很多测井曲线需要用地质的语言去描述或解读。开展测井地质学综合研究，挖掘测井曲线蕴含的地质属性信息，可减少测井评价认识的多解性，同时地质思维的融入可提升测井资料地质应用的精度与广度^[3,12-13]。然而，由于不同测井曲线组合对地质目标敏感性存在差异和测井曲线岩石物理属性与岩石地质成因存在不对应性，加之测井曲线组合为岩石物理、地质及工程等多因素响应综合体，存在多重信息的混淆^[9,14]，再加之不同测井系列适用条件差异的影响，导致测井地质学研究过程中常出现误区，解剖测井地质学研究典型误区并探索相应的对策与科学思维势在必行。

笔者针对以上问题，系统归纳总结测井地质学研究中存在的典型误区及原因解剖，并提出对策与科学思维，揭示了不同测井系列纵向分辨率尺度及其与探测深度的矛盾，并指出钻井液类型、井壁规则性等对测井采集的影响，以避免“伪资料”误导测井解释评价。在此基础上归纳总结高自然伽马砂岩、高密度高电阻率泥岩、低阻油层等特殊地质现象，再系统论述测井井旁构造解析、沉积相分析、地应力评价以及裂缝识别等领域的典型误区与对策。通过

对测井地质学研究中的经典错误案例进行解析，追求科学性与实践性的统一，以寻找正确的解决方法，为综合测井地质学研究提供科学思路。

1 测井地质学研究的误区

地质目标的复杂性以及测井资料的多解性导致测井地质学综合研究面临多重挑战。不同尺度地质与地球物理测井资料难以深度融合、测井资料包含的地质信息难以挖掘、岩石物理响应特征不匹配等问题造就了测井地质学研究中的难题。基于声、电、核岩石物理属性的常规测井资料一直受到其承载信息能力有限的影响，有时甚至陷入“一孔之见”的误区，且容易受到多解性的干扰，导致在利用测井资料进行地质解释中存在诸多误区。测井地质学研究中的典型误区可以归纳为两个方面：一是地质体（构造、沉积、裂缝等）解释误区，二是储层属性（岩性、物性、电性及应力等）参数计算误区。例如，测井资料地质解释中，常规认识为低自然伽马为砂岩，高自然伽马为泥岩，然而由于砂岩中存在的特定矿物的放射性，会导致出现高自然伽马砂岩，如钾长石（高钾）、方沸石（高钍）、火山凝灰质（高钾、钍）的存在，导致砂岩表现出异常高自然伽马测井特征。以准噶尔盆地吉木萨尔凹陷芦草沟组为例，其长石岩屑粉砂岩由于钾长石以及凝灰质岩屑的高放射性，导致自然伽马可高达 100 API，可以看到高自然伽马层段对应的岩心明显为粉砂岩段而非泥岩。

2 测井解释典型误区的原因

造成测井解释存在误区的原因包括人为影响因素（即在解释过程人为判断的影响）和非人为影响因素（即仪器和探测环境的影响）。

2.1 测井系列纵向分辨率与探测深度的影响

不同的测井系列由于采用不同数据采集原理，导致其纵向分辨率与探测深度千差万别（表 1）。通常情况下，从井场采集到的数据体文件采样间隔一般为 0.125 m，然而 0.125 m 不是正确的测井曲线纵向分辨率，常规测井纵向分辨率一般为 1.000 m。岩性（SP、GR）和孔隙度测井（AC、CNL 和 DEN）系列的纵向分辨率约为 1.000 m，探测深度在冲洗带范围（10 ~ 20 cm）。电阻率测井中的侧向测井以及感应测井由于采用了聚焦和线圈化的电极，相应的纵向分辨率可提高到 0.600 m，甚至 0.300 m^[3]；核磁共振测井纵向分辨

表1 不同测井系列的纵向分辨率与探测深度统计表

测井项目	代码	单位	分辨率 / m	探测深度 / cm	影响因素
自然电位	SP	mV	1.000	10.0 ~ 20.0	储层厚度、地层温度、储层含油性、储层侵入带直径、钻井液电阻率、钻井液矿化度、岩性剖面
自然伽马	GR	API	1.000	10.0 ~ 20.0	钻井液的放射性、套管水泥环的放射性、仪器是否偏心、钻井液密度、仪器参数、测井速度、地层厚度、是否扩径
井径	CAL	in 或 cm			裂缝、岩性
声波时差	AC 或 DT	$\mu\text{s}/\text{m}$ 或 $\mu\text{s}/\text{ft}$	1.000	10.0 ~ 20.0	岩性、岩性结构、孔隙度、岩石孔隙间的填隙物、岩石埋藏深度、岩石地质年代
中子	CNL 或 NPHI	%	1.000	10.0 ~ 20.0	井径、钻井液、泥饼、地层水、温度、天然气、岩性、间隙距离
密度	DEN 或 RHOB	g/cm^3	1.000	10.0 ~ 20.0	井眼、气、压实、未知矿物、钻井液、岩性
深侧向	LLD	$\Omega \cdot \text{m}$	0.600	115.0	井眼、围岩、钻井液侵入、地层厚度
浅侧向	LLS	$\Omega \cdot \text{m}$	0.600	30.0 ~ 35.0	钻井液电阻率、井径、围岩厚度、侵入带
微电阻率测井	SFLU 或 RFOG 或 MSFL 或 MLL 或 ML 或 PL	$\Omega \cdot \text{m}$	0.200	10.0 ~ 20.0	泥饼、井眼、钻井液电阻率、井径、地层温度、侵入带
核磁共振	CMR	ms	0.200	2.5	钻井液电阻率、流体性质、岩石孔径分布、噪声与干扰、顺磁物质、增益效应、磁体探头等
元素俘获	ECS	kg/kg	0.457	22.9	测量时的温度和速度、氧化物闭合模型的选择
偶极声波测井	DSI	μs	3.000	15.0	井眼、仪器是否偏心
微电阻率成像	FMI		0.005	2.5	岩性、地层孔洞缝情况、钻井液侵入

注：1 in=2.54 cm，1 ft=0.304 8 m，下同。

率最高可达 0.200 m，元素俘获测井的纵向分辨率为 0.457 m，阵列声波测井纵向分辨率为 3.000 m^[3]；高分辨率成像测井的纵向分辨率可以达到 0.005 m^[15]（表 1）。此外，电成像测井仪采用纽扣电极系测量，在深度上的采样间隔为 2.5 mm^[16]，因此通过纽扣电极电导率曲线，纵向分辨率可以达到 2.5 mm。

测井曲线的纵向分辨率和探测深度，往往互相制约，纵向分辨率越高，探测深度一般越浅（表 1）。当然通过仪器的改进，可对以上缺点进行改进，如电阻率成像、高分辨率测井仪器等，通过缩短接受探头的间距，提高纵向分辨率，探测深度可以保持不变或稍微降低。常规测井曲线纵向分辨率高，但径向探测深度小，通常小于 1.0 m，高分辨率阵列感应测井可以达到 3.0 m^[3,17]。声波远探测测井技术可探测井眼数十米范围内的地质体（地层界面、断层、裂缝、孔洞、盐丘等）特征，突破了测井技术“一孔之见”的认识，然而代价则是纵向分辨率由常规测井的 1.0 m 降低到声波远探测测井的 10.0 m^[17-18]。

2.2 测井数据采集环境的影响

测井采集受到钻井液类型、井壁规则性以及测量

过程中仪器旋转的影响，因而在采集过程当中可能出现“异常点”。在解释之前，应当阐明测量环境或测量条件对测井解释的影响，测井资料的预处理与校正工作至关重要。除电缆测井外，随钻测井能实时地提供地层评价和钻井数据，可减少测井所需要的钻机在用时间，在高风险井中也能保证数据的采集，随钻测井资料广泛应用于地质导向和地层评价工作中^[19-20]。

2.2.1 钻井液类型

钻井液可分为水基钻井液和油基钻井液，其中水基钻井液按矿化度又可分为淡水和盐水钻井液。淡水钻井液中，自然电位曲线在砂岩段总显示为负异常，在不存在放射性矿物的情况下，砂岩的自然伽马往往表现为低值。因此，当自然电位曲线趋势总是与自然伽马曲线一致时，为淡水钻井液测井；当自然电位曲线趋势不与自然伽马曲线一致时，为盐水钻井液测井，或者是油基钻井液测井，且油基钻井液通常表现为浅电阻率大于深电阻率。

2.2.2 井壁规则性

在钻井过程中，如果井壁的地应力超过了井周岩石的破坏强度，将造成井壁崩落^[21]，形成不规则

井壁，在井径曲线上表现为扩径现象。井壁的规则性对众多测井系列均有明显影响，如贴井壁测量的密度测井在扩径段将呈明显下降趋势（图 1 的蓝色虚线框部分）。因此，对于贴井壁测量的测井仪器往往需要改善或者减少钻井液信号的影响。中子孔隙度测井在扩径段探测的为钻井液的信息，在测井上表现为高中子的特征。此外，声波时差测井也不同程度的受到扩径影响（图 1 的蓝色虚线框部分）。

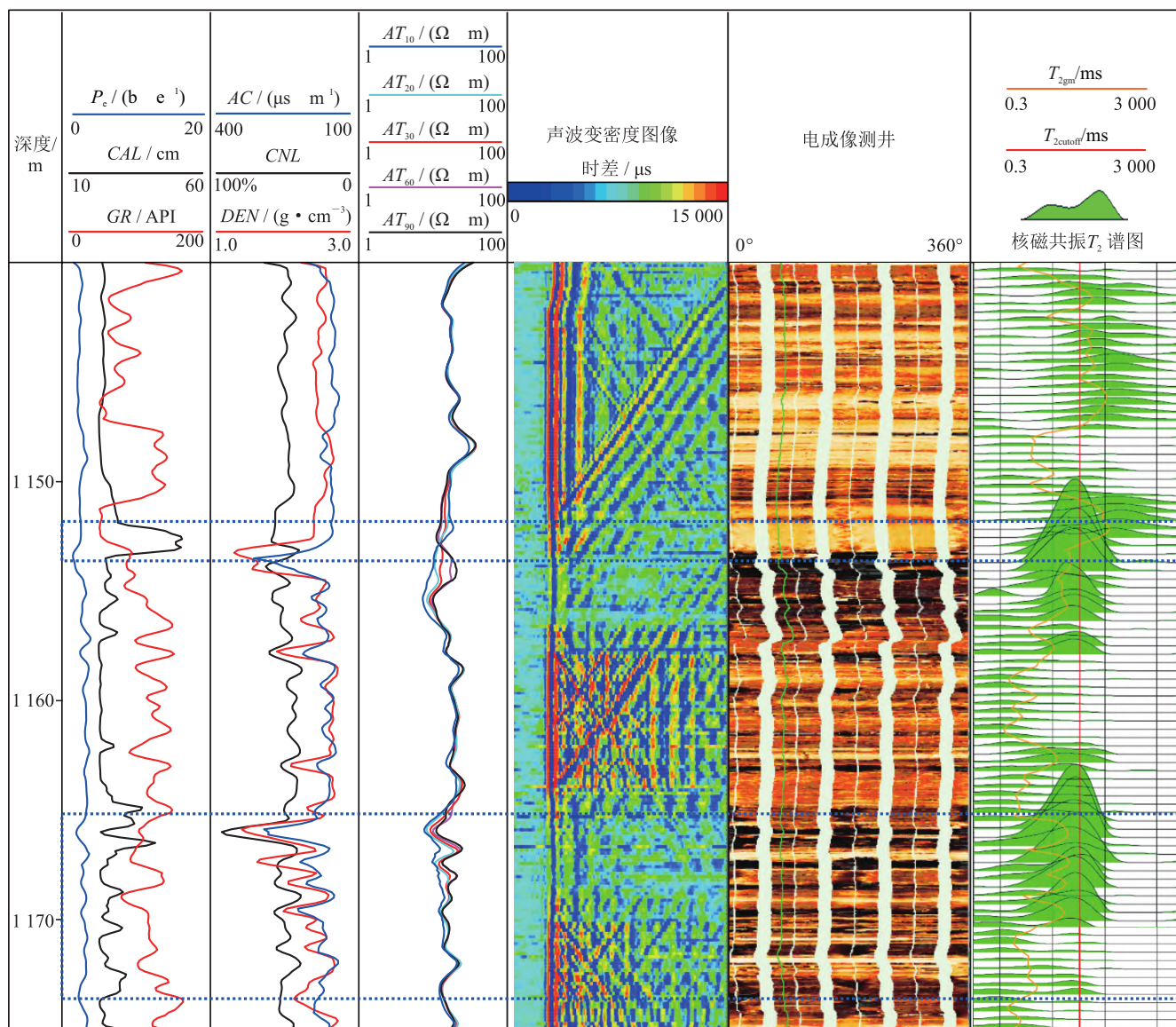
核磁共振测井中 CMR 型核磁共振测井仪器贴井壁测量，在扩径段，仪器不能完全紧贴井壁测量，测井数据采集到的信号主要来自于井筒钻井液信息。因此，CMR 型核磁共振测井在扩径段测量的为钻井液

信息，导致核磁共振 T_2 增大，计算孔隙度偏大，非真实孔隙度（图 1）。相比较而言，MRIL-P 型核磁共振测井仪器采用居中的测量方式，相对受井眼扩径及不规则影响小^[22]。

此外，在典型的扩径段（图 1 蓝色虚线框部分），阵列声波测井会出现“V”字形干涉条纹（指示裂缝假象）（图 1）。成像测井贴井壁测量，测量的为冲洗带电阻率，图 1 上部扩径段为砂岩扩径，成像测井为亮色块状，下部扩径段泥质增加，成像测井为暗色块状（图 1）。

2.2.3 仪器旋转

除了井壁规则性影响外，仪器旋转也将影响测



P_c —光电吸收截面指数； AT_{10} 、 AT_{20} 、 AT_{30} 、 AT_{60} 、 AT_{90} —探测深度为 10 in、20 in、30 in、60 in 和 90 in 时的 Schlumberger 公司测井系列高分辨率阵列感应电阻率； T_2 —核磁共振测井横向弛豫时间； T_{2gm} — T_2 几何平均值； $T_{2cutoff}$ — T_2 截止值。

图 1 鄂尔多斯盆地 B28 井延长组井壁崩落引起的测井异常响应特征图

井质量和解释结果，导致测井采集质量不合格，尤其是带方位性的电成像、地层倾角和阵列声波测井。地层倾角测井仪器的旋转（1号极板）会导致方位受到影响。阵列声波测井仪器在测井时常发生旋转，旋转过程中它的方位会相对反射体变化，从而模糊测量的方位信息^[17]。

2.3 地质因素的影响

2.3.1 岩石物理特性

进行测井储层评价时，往往需要依托一定的岩石物理响应基础，不同的测井系列，其依托岩石物理基础差异明显。目前，测井学科已集声、电、核及核磁多种测量方法和手段于一身^[5]。在测井解释过程中，明确不同测井系列岩石物理响应机理至关重要。如自然伽马主要探测地层中的钾、钍和铀元素含量，反映的是地层岩性（泥质）特征，用自然伽马进行孔隙度计算则不可取。此外，储层参数计算以及流体性质评价中也容易存在误区，如低阻油层的评价以及有效储层物性下限的确定等，不同研究区和层位测井评价方法适用性并不一致。

除了要考虑测井系列岩石物理响应机理外，测井解释成果也要符合地质目标的基本特征。如因受黏土矿物发育以及复杂孔隙结构影响，储层含束缚水，这决定了测井解释的含油气饱和度不应达到100%。在砂泥岩剖面中，测井计算得到的孔隙度甚至超过40%的问题，在实际过程当中往往不可取，因为砂岩原始孔隙度只有40%，在埋藏成岩过程中由于压实和胶结的影响，孔隙度会极大地降低。因此，岩心以及相关的分析化验资料刻度测井能够避免对测井资料的错误认识。但在实际的岩心刻度测井工作中，岩心分析的数据多为点数据，而测井曲线是一定范围内（纵向分辨率）测井响应的综合反映，岩心刻度测井时点对点读值来刻度测井不一定准确。因此，可以考虑层对点读值，通过选取一定范围内的测井曲线值求取平均值后，与岩心分析化验值比对，从而提高解释精度，尤其是对于相变快、非均质性较强的非常规油气储集层。

2.3.2 构造

测井可以识别的地质构造包括不整合面、断层以及褶皱^[3]。对于断层、褶皱等地质体往往需要通过成像测井以及地层倾角测井矢量模式变化来确定，而不整合面在常规测井曲线形态和幅度变化特征上响应明显^[15]。目前，对于井旁构造解析已经形成相对比较完善的方法理论体系，通过常规测井曲线形态

和幅度，成像测井图像模式和地层倾角测井矢量模式（红模式、蓝模式、绿模式等）变化，可以判断井旁发育的断层、褶皱以及不整合面^[3,15]。但当不整合面遇到井壁崩落时，需要注意区分由井壁崩落的因素引起的测井特征变化。鄂尔多斯盆地奥陶系马家沟组与石炭系本溪组不整合面由于地层剥蚀形成大型风化壳^[23]（图2）。可以看到风化壳发育位置常规测井曲线形态和幅度以及成像测井图像模式发生明显变化，钻遇这套风化壳地层时出现钻井井壁崩落（井径曲线增大），因此，部分测井曲线的异常响应跟井壁的规律性相关，尤其是贴井壁测量的密度以及成像测井，声波时差测井测量的滑行纵波时差，也因井壁规律性影响曲线幅度和形态（图2）。

2.3.3 沉积

测井相通常指表征不同地层特征的一组测井响应特征集^[3]。常规测井曲线幅度、形态和顶底接触关系以及地层倾角测井矢量模式、成像测井图像被广泛运用到沉积特征的精细描述与刻画工作中^[3,15,24-26]。但测井相是抽象的，而沉积相则包含实际地质意义，沉积相与测井相之间并非一一对应关系。

成像测井静态平衡图像是整个井段范围内按统一的颜色色调进行刻度，成像测井动态加强图为选用一定的窗长对局部层段信息进行放大展示，因此不能用来判别粒序^[15,27]。碳酸盐岩岩溶可以改变沉积相特征，此时需要划分岩溶相带，优选有利储集体发育的风化残积带、垂直渗流带^[16]。此外，油基钻井液背景下电成像测井拾取岩性和沉积构造的分辨能力将大为降低，声成像则对裂缝响应特征灵敏，但不能识别沉积纹层等沉积构造特征^[28]。

测井沉积学研究中往往可利用高分辨率成像测井获取古水流方向。①拾取砂岩内部沉积层理方向，并形成对应的玫瑰花图。因为岩石在构造演化过程中产状可能发生变化，因此，玫瑰花图指示的并非沉积时古水流方向，需先做构造校正。②通过读取相对厚层高自然伽马泥岩段层面的倾斜方向作为地层产状（泥岩沉积时近于水平），在此基础上通过构造校正，校正后的砂岩层理的方向可作为古水流方向（图3）^[3,26]。

进行古水流分析时要明确松散沉积物堆积的角度一般小于40°（沉积休止角小于40°），因为当松散沉积物堆积角度增大到一定程度后，沉积物将失稳，从而沿着斜坡向下滑动^[29]。古水流方向恢复时，需要注意拾取的沉积休止角不能超过40°（图3）。图中塔里木盆地库车坳陷白垩系砂岩构造校正前的砂岩

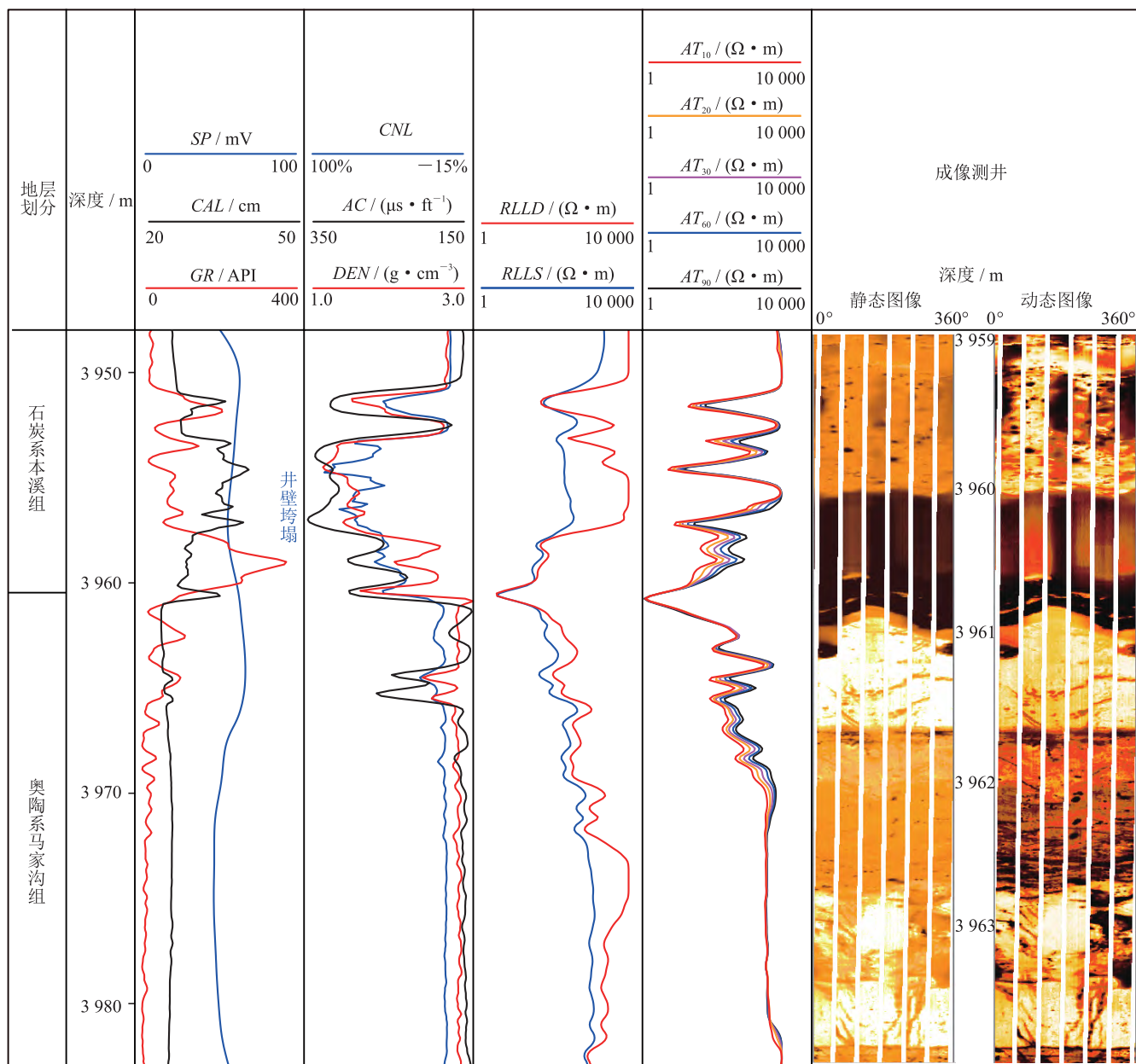


图 2 鄂尔多斯盆地 L30 井马家沟组一本溪组不整合面测井响应特征图

层理倾角（红色蝌蚪）甚至可达 50°，主要是由于岩石经历构造运动后导致产状变陡，通过拾取内部高自然伽马泥岩的产状作为地层产状（绿色蝌蚪）可知，地层产状（倾角）接近 30°。而构造校正后泥岩产状基本近于水平（小于 5°），相对应的砂岩产状也小于沉积休止角（40°），经构造校正后的古水流方向为自北向南，与库车坳陷白垩系由北向南的物源供给方向相吻合（图 3）。

2.3.4 地应力

地层被钻开以后，地应力将失去平衡并重新分布，在井壁形成井壁崩落和钻井诱导缝，其中井壁崩落方向平行于现今水平最小主应力（ σ_{min} ）方向，

而钻井诱导缝则指示现今水平最大主应力（ σ_{max} ）方向^[30-31]。井壁崩落在成像测井上表现为两条暗色或黑色的较宽的垂直长条带或者斑块，呈 180° 对称（图 4-a）。除井壁崩落外，部分井段将产生钻井诱导缝，包括钻井液压裂缝、应力释放缝和钻具振动形成的微裂缝，三者方向均对应最大主应力方向。其中钻井液压裂缝在成像图上呈 180° 对称分布的两条黑色条带或“双轨”（宽度比井壁崩落窄），它们平行于井轴，延伸较长，方位基本稳定（图 4-b）。应力释放缝是在钻井过程中井孔内的应力得以释放而形成的一组裂缝，除了沿井轴 180° 对称外，其典型识别特征为雁列式排列^[3]（图 4-c）。钻具振动形成的微裂缝主要

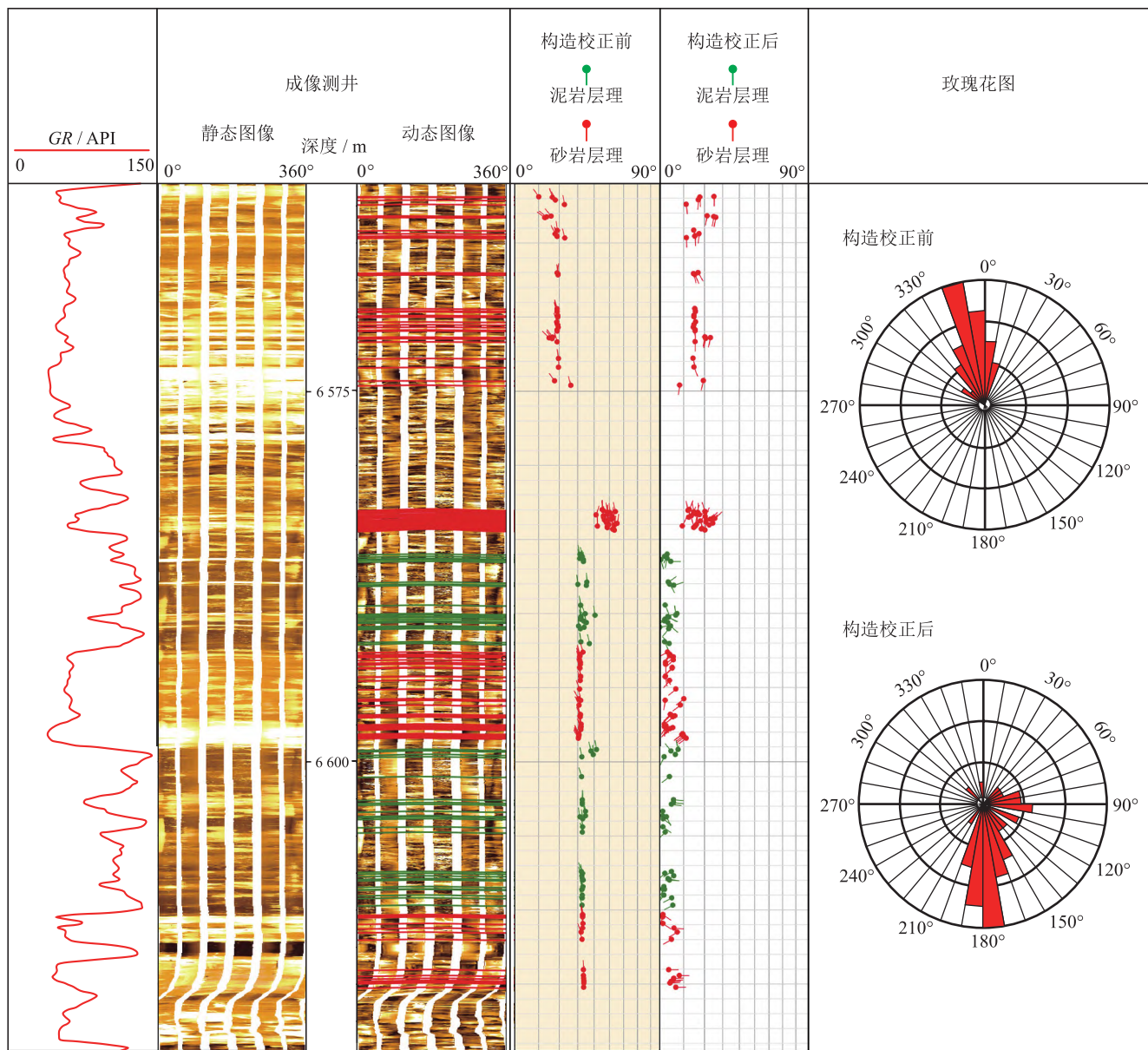


图 3 塔里木盆地库车坳陷 BZ1203 井白垩系基于成像测井的古水流恢复图

发育于刚性地层中（碳酸盐岩等），其开度和延伸距离相对较小，成像测井图上呈现两组平行发育、延伸范围浅、倾角和倾向大致相同、形状规则的裂缝组，可呈羽毛状排列（图 4-d）。因此，在进行地应力方向判别时需要注意区分不同类型的井壁崩落和诱导缝，从而进行现今地应力方向判别^[15]。

2.3.5 裂缝

天然裂缝典型测井响应特征可以总结为井眼扩大、声波时差增大、密度降低、电阻率刺刀状下降、地层倾角微电阻率曲线下降、阵列声波“V”字形干涉条纹以及成像测井暗色正弦曲线特征^[32-34]。常规测井识别裂缝往往易受其他因素影响，成像测井图像上泥质条带、层理面、层界面与裂缝有时难以区分^[35]。

因此，裂缝的测井识别与探测最易遇到的误区即为裂缝与泥质条带、层理面等区分问题。对于切割过井眼的裂缝，在成像测井图上表现为正弦曲线特征，常规测井曲线上的声波时差增大、密度降低以及电阻率降低也指示裂缝发育（图 5）。然而部分泥质条带、层理发育位置，同样也会导致电阻率降低。因此，需要结合岩心观察以及成像测井识别裂缝发育带（图 5）。

除了定性识别裂缝面发育特征外（裂缝倾向和倾角），成像测井还可以计算裂缝孔隙度、裂缝水动力宽度、裂缝长度和裂缝线密度 4 个参数^[15,32,36-37]。需要注意的是裂缝参数，尤其是裂缝孔隙度数值区间往往会夸大展示，同时裂缝孔隙度小于 0.5%^[38]，部分裂缝发育较为密集层段，裂缝孔隙度可达 1%，这

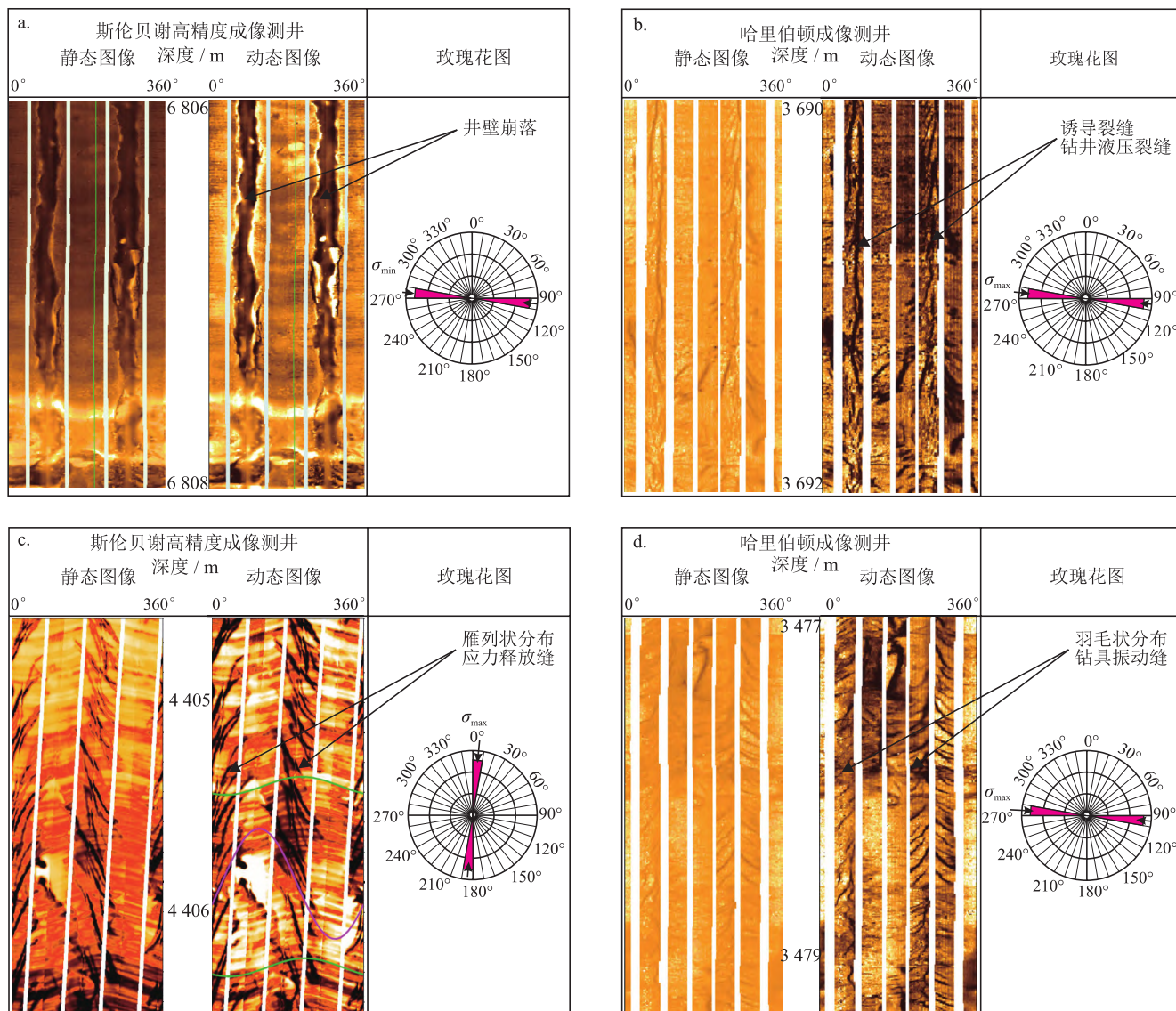


图 4 井壁崩落、诱导缝成像测井响应特征图

一点解释时尤须留意。此外，裂缝张开度通常处于毫米级尺度区间，处于一定埋深的裂缝，受到岩层重力以及构造应力影响，往往张开度有限^[15]。当然，成像测井裂缝的识别与定量参数计算都是基于水基钻井液前提的，在油基钻井液背景下，裂缝的识别与评价往往需要声、电测井相结合^[28]。

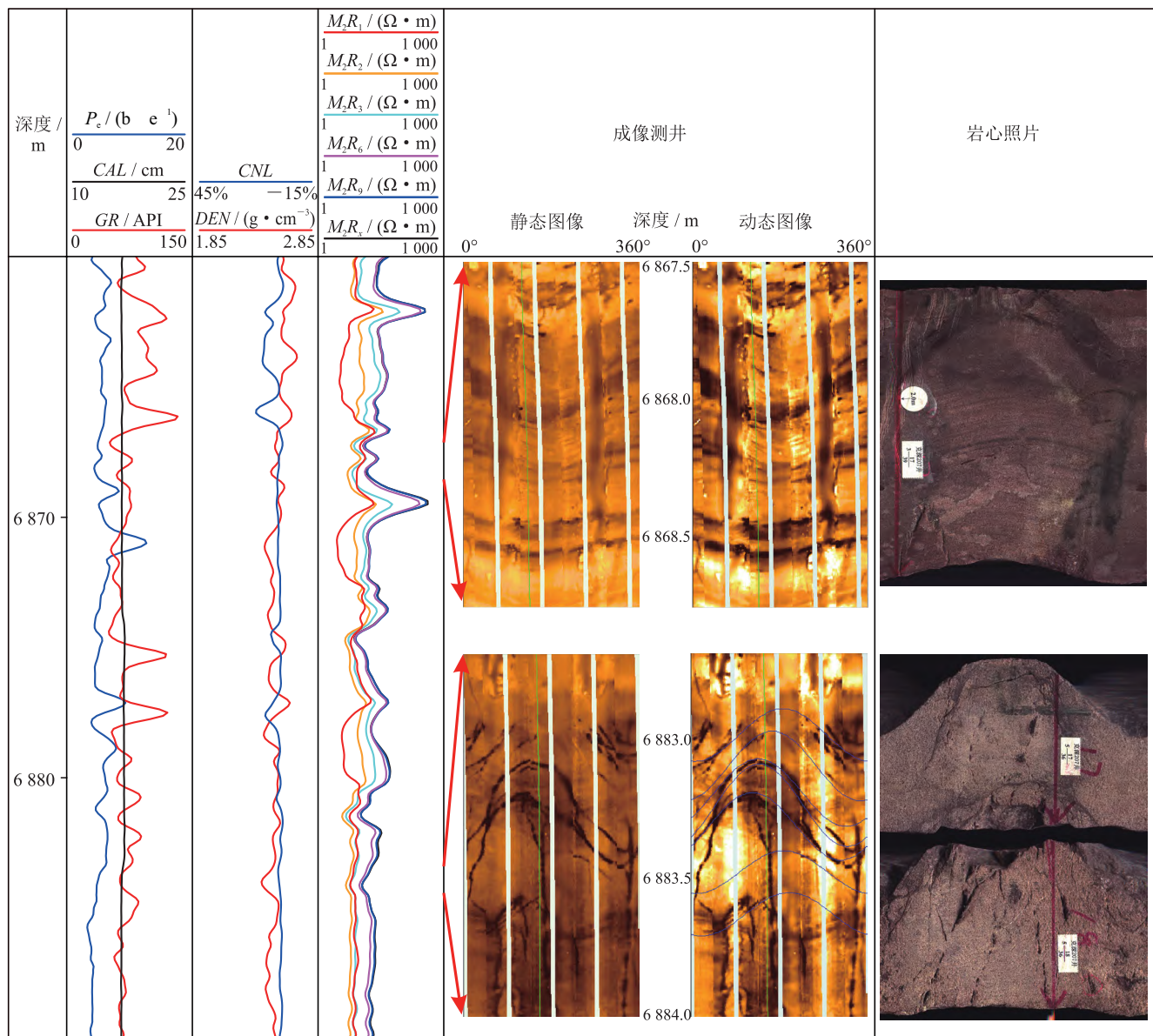
2.3.6 特殊地质现象

受低构造幅度、复杂孔隙结构和高束缚水饱和度等因素影响，渤海湾盆地中浅层发育众多低阻油层或低对比度油层（包括油层绝对低阻，如油层电阻率小于 $5 \Omega \cdot m$ ，或者是油层电阻率与相邻水层的比值小于 2，甚至与水层相近的油层）^[39-41]。

测井资料地质解释中，常规认为砂岩低自然伽马、泥岩高自然伽马。然而，由于砂岩中存在的特

定矿物的放射性，会导致出现高自然伽马砂岩，如钾长石（高钾）、方沸石（高钍）、火山凝灰质（高钾、钍）的存在，导致砂岩表现出异常高自然伽马测井特征^[42-43]。如，鄂尔多斯盆地延长组由于凝灰质发育，广泛存在自然伽马大于 85 API 的高自然伽马砂岩^[42]。

泥岩与砂岩相比，除了表现为高自然伽马特征外，往往表现为低密度和低电阻率。但是，在塔里木盆地库车坳陷超深层高温高压环境中，泥岩由于强烈的地应力挤压作用，往往表现出高密度和高电阻率特征^[28]（图 6）。图中的泥岩（高自然伽马段）埋深超过 7 900 m，岩石体积密度超过 2.65 g/cm^3 ，电阻率达到 $50 \Omega \cdot m$ ，大于邻层的砂岩密度和电阻率，岩心可观测到泥岩致密，成像测井表现为亮斑特征，指示较高电阻率（图 6）。



M_2R_1 、 M_2R_2 、 M_2R_3 、 M_2R_6 、 M_2R_9 、 M_2R_x —纵向分辨率为 2 ft，探测深度为 10 in、20 in、30 in、60 in、90 in 和 120 in 时的 Baker Atlas 公司测井系列高分辨率阵列感应测井电阻率。

图 5 塔里木盆地库车坳陷 KS207 井白垩系典型裂缝与层界面测井响应特征图

以上种种特殊地质现象的存在，往往会导致在测井曲线组合特征上的“异常表现”。因此，要剥离由于特殊地质现象的存在导致的测井异常特征，从而进行科学、合理地测井综合地质解释。

2.4 测井解释技术（方法）的影响

测井的核心认识是识别与发现油气层^[5]。目前，常规储层测井评价（岩性识别、储层参数计算及流体性质判别）已经形成比较完善的解释流程。对于相对复杂的致密砂岩储层以及深层碳酸盐岩储集体，通过常规测井结合成像测井、阵列声波测井等也能实现储层综合评价及有利储层预测^[16,23,44]。

21 世纪以来，非常规油气（致密油气、页岩油气为典型代表）的兴起导致测井储层评价工作面临全新挑战^[3-4]。与常规油气“四性关系”测井评价不同，源储一体或紧邻的非常规油气需求“七性关系”（岩性、物性、电性、含油性、脆性、烃源岩特性和地应力各向异性）和“三品质”（烃源岩品质、储层品质和工程品质）测井综合评价^[3-4]。非常规油气测井评价往往要依托电成像、核磁共振、阵列声波、岩性扫描等新技术测井资料，首先揭示“七性”及其耦合关系，在此基础上通过烃源岩品质及其评价指标落实资源“甜点”区/带，通过储层品质分类及评价指标预测地质“甜点”区/带，然后建立工程品质分类及测

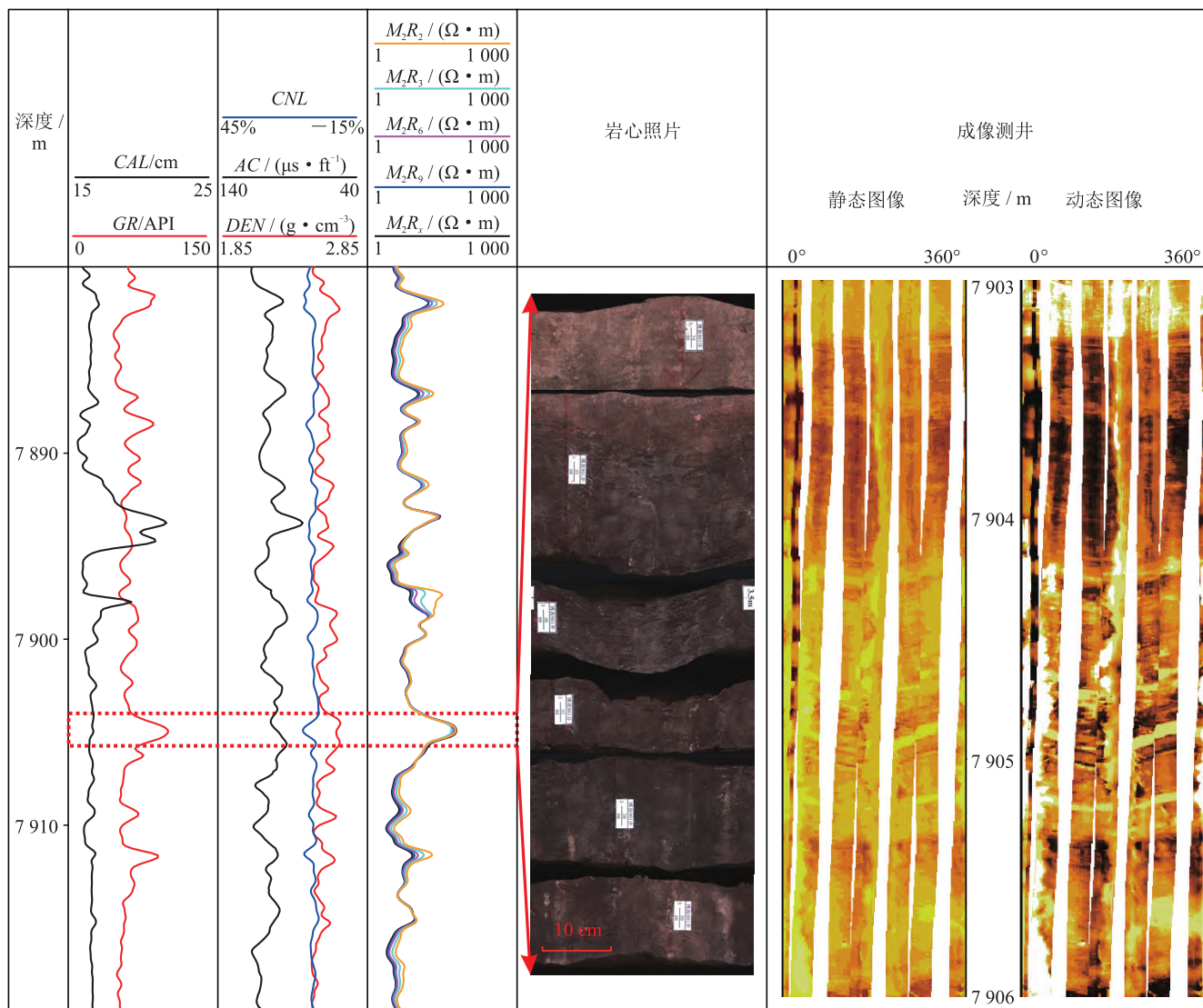


图 6 塔里木盆地库车坳陷 BZ901 井白垩系超深层泥岩测井响应特征图

井评价标准，由此优选工程“甜点”区/带^[45-49]。

常规测井难以适应非常规油气测井储层评价工作，核磁共振测井(横向弛豫 T_2 谱以及纵向弛豫 T_1 谱)被广泛运用到非常规储层参数计算及流体性质判别工作中^[50-51]。非常规储集层孔隙度低，钻井液侵入较浅，难以出现深、浅电阻率幅度差^[4]，因此，油气层与水层、干层相比，在孔隙度和电阻率测井系列中难以得到区分(图 7)。图中可以看到，油层和干层的电阻率曲线均呈现微弱幅度差，但油层电阻率值比干层要高，且油层与干层相比，孔隙度曲线指示较好储层物性，因此，常规测井只能大致做到非常规油气的油层与干层的区分。相比较而言，核磁共振测井在非常规储层测井评价中优势明显。油层的 T_1 和 T_2 谱均具有明显的宽分布和拖尾现象，指示油层的信息，而干层的 T_1 和 T_2 谱分布均较窄(图 7)。当然，在实际工作中，需要注意井壁稳定性的影响，

如油层上下层段发生明显井壁崩落(井径曲线明显增大)、 T_1 和 T_2 谱出现明显的谱峰增大现象(图 7)。

3 测井地质学综合研究思路

通常测井解释人员强调从地质角度考虑测井现象。测井地质综合研究中，既要强调测井曲线地球物理属性挖掘，解释过程也要强调融入地质思维^[3,9]。在利用测井资料对地质现象进行分析解释过程中，首先要明确测井仪器及测量环境，对其在解释过程中可能引起的误区做到心中有数；其次，对研究的地质背景要有一个清晰的认识，融合地质思维可以帮助尽快排除多解性，从而获得最优解；最后，引入大数据学习和人工智能，使得测井地质解释更加快速和高效。目前，地质大数据正在以指数形式增长^[52]，测井同本身是海量数据的综合。大数据学习和人

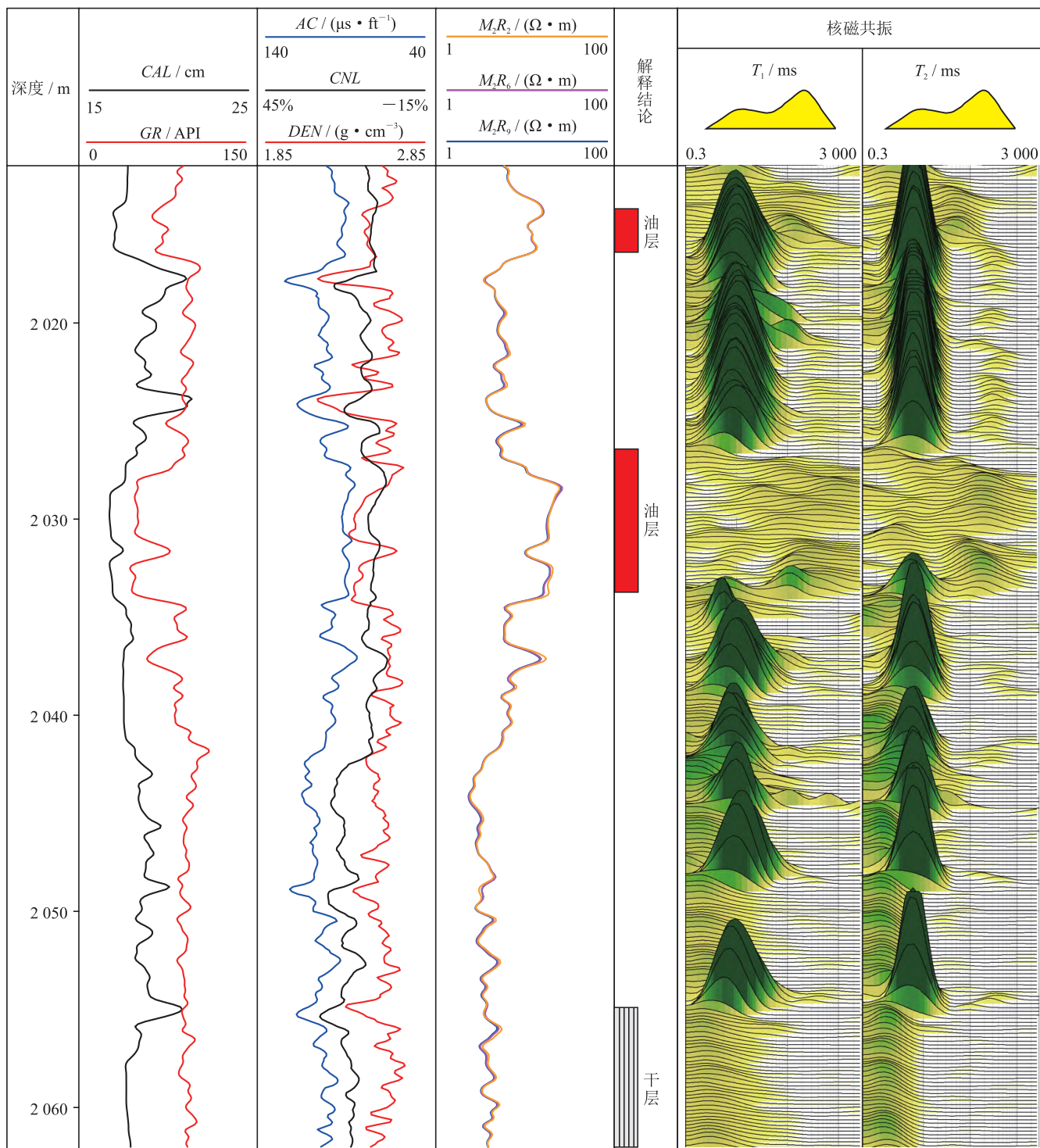


图 7 松辽盆地古龙凹陷 GY7 井非常规油气储集层典型油层和干层段测井识别图

工智能与测井地质学深度融合将在油气勘探开发各个环节得到广泛运用，人工智能作为一种改进计算机求解问题的方法，可以使测井解释工作者从大量低知识层次的分析工作中解脱出来，但人工智能解释需要正确的样品库、知识图库供机器学习^[13,53]。人工智能的融入可以更高效地处理与解释海量测井数据。因此，针对学习任务的特点，可优选不同机器学习

方法，寻求不同测井信息之间内在特征及关联性，挖掘测井曲线间隐含的地球物理属性特征。同时在测井地质学指导下，融入测井信息对应的地质思维，使得人工智能更科学、高效和智能地利用测井资料解决地质问题。

事物的发展往往要经历曲折性和前进性的统一，事物发展要经历由肯定到否定，再到否定之否定的

发展过程,在此过程中事物将不断完善。从实践论的角度,测井地质学的研究是测井信息向地质信息的转换,要经历实践到认识,再从认识到实践的多次反复才能完成。笔者在总结测井—地质信息转换的基础上,主要论述了相关的测井地质学研究过程中常见的误区,并从错误中寻找正确的对策与思路,以期达到一体化的测井地质学综合解释与评价过程。

4 结论

1) 地质目标的复杂性以及测井资料的多解性导致测井地质学综合研究面临多重挑战。不同尺度地质与地球物理测井资料难以深度融合以及测井资料包含的地质信息难以挖掘等问题造成了测井地质解释中的两大误区:地质体的解释与储层参数的计算。

2) 不同测井系列纵向分辨率尺度区间、钻井液类型、井壁规则性以及仪器旋转均会对测井采集的影响,应避免测井解释中出现“伪资料”而误导测井解释评价。高自然伽马砂岩、高密度高电阻率泥岩等特殊地质现象在利用测井资料解决地质问题时应考虑岩石物理响应机理差异,避免常规认识造成的错误解释。

3) 在测井井旁构造解析、沉积响应、地应力评价以及裂缝识别等过程中,规避不同地质现象在测井上的同一响应导致的测井解释误区。在非常规油气测井储层评价中,充分利用新技术测井资料的高分辨率和较高精度的不同流体响应特性开展测井评价,从而避免低分辨率的常规测井在解释过程中引起的误区。

4) 在测井地质学研究中采用科学思维,首先要明确测井仪器及测量环境,对其在解释过程中可能引起的误区做到心中有数;其次,对研究的地质背景要有一个清晰的认识,融合地质思维可以帮助尽快排除多解性,从而获得最优解;最后,引入大数据学习和人工智能,使得测井地质解释更加快速和高效。实现地质到测井再到地质的转换,从实践到认识再到实践,从“一孔之见”到“一孔百见”的辩证和系统性思维,为测井地质学综合研究提供科学思路。

参 考 文 献

[1] 刘光鼎,李庆谋,刘少华. 全球变化的地球物理测井研究[J]. 地球物理学进展, 1999, 14(4): 1-8.
LIU Guangding, LI Qingmou, LIU Shaohua. Geophysical well log in global change[J]. Progress in Geophysics, 1999, 14(4): 1-8.

[2] AVSETH P, SKJEI N, SKÅLNES Å, et al. Rock physics model-

ling of 4D time-shifts and time-shift derivatives using well log data—a North Sea demonstration[J]. Geophysical Prospecting, 2013, 61(2): 380-390.

[3] 赖锦,王贵文,庞小娇,等. 测井地质学前世、今生与未来——写在《测井地质学·第二版》出版之时[J]. 地质论评, 2021, 67(6): 1804-1828.
LAI Jin, WANG Guiwen, PANG Xiaojiao, et al. The past, present and future of well logging geology: To celebrate the publication of second edition of "Well Logging Geology"[J]. Geological Review, 2021, 67(6): 1804-1828.

[4] 刘国强. 非常规油气勘探测井评价技术的挑战与对策[J]. 石油勘探与开发, 2021, 48(5): 891-902.
LIU Guoqiang. Challenges and countermeasures of log evaluation in unconventional petroleum exploration[J]. Petroleum Exploration and Development, 2021, 48(5): 891-902.

[5] 李宁,徐彬森,武宏亮,等. 人工智能在测井地层评价中的应用现状及前景[J]. 石油学报, 2021, 42(4): 508-522.
LI Ning, XU Binsen, WU Hongliang, et al. Application status and prospects of artificial intelligence in well logging and formation evaluation[J]. Acta Petrolei Sinica, 2021, 42(4): 508-522.

[6] 徐风,司兆伟,白松涛,等. 基于测井地质“四性”关系谱的储层评价方法[J]. 测井技术, 2017, 41(2): 183-188.
XU Feng, SI Zhaowei, BAI Songtao, et al. Reservoir evaluation based on four characters spectrum of geological logging[J]. Well Logging Technology, 2017, 41(2): 183-188.

[7] AL-MUDHAFAR W J. Integrating machine learning and data analytics for geostatistical characterization of clastic reservoirs[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2020, 195: 107837.

[8] 李浩,刘双莲,魏修平,等. 隐性测井地质信息的识别方法[J]. 地球物理学进展, 2015, 30(1): 195-202.
LI Hao, LIU Shuanglian, WEI Xiuping, et al. Method exploration of implicit logging geological information research[J]. Progress in Geophysics, 2015, 30(1): 195-202.

[9] 李浩,刘双莲,柴公权,等. 基于岩石成因的测井地质属性研究方法[J]. 地球物理学进展, 2016, 31(2): 707-712.
LI Hao, LIU Shuanglian, CHAI Gongquan, et al. Method about the geological attribution research of well logging based on lithogenesis[J]. Progress in Geophysics, 2016, 31(2): 707-712.

[10] 王华,张雨顺. 测井资料人工智能处理解释的现状与展望[J]. 测井技术, 2021, 45(4): 345-356.
WANG Hua, ZHANG Yushun. Research status and prospect of artificial intelligence in logging data processing and interpretation[J]. Well Logging Technology, 2021, 45(4): 345-356.

[11] 李浩,刘双莲,魏修平. 测井地质学在我国的发展历程及其启示[J]. 地球物理学进展, 2010, 25(5): 1811-1819.
LI Hao, LIU Shuanglian, WEI Xiuping. Development history and enlightenment of logging geology in China[J]. Progress in Geophysics, 2010, 25(5): 1811-1819.

[12] 李浩,刘双莲. 测井信息的地质属性研究[J]. 地球物理学进展, 2009, 24(3): 994-999.
LI Hao, LIU Shuanglian. Geological characteristics study on logging information[J]. Progress in Geophysics, 2009, 24(3): 994-999.

[13] 李浩,刘双莲,魏修平,等. 测井信息地质属性的论证分析[J]. 地球物理学进展, 2014, 29(6): 2690-2696.

- LI Hao, LIU Shuanglian, WEI Xiuping, et al. The validation of geological characteristics in logging information[J]. *Progress in Geophysics*, 2014, 29(6): 2690-2696.
- [14] 张娟, 杨敏, 谢润成, 等. 塔里木盆地塔河油田4区和6区奥陶系小尺度缝洞储集体概率识别方法[J]. *石油与天然气地质*, 2022, 43(1): 219-228.
- ZHANG Juan, YANG Min, XIE Runcheng, et al. Probability-constrained identification of Ordovician small-scale fractured-vuggy reservoirs in Blocks 4-6, Tahe Oilfield, Tarim Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2022, 43(1): 219-228.
- [15] LAI Jin, WANG Guiwen, WANG Song, et al. A review on the applications of image logs in structural analysis and sedimentary characterization[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2018, 95: 139-166.
- [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] 郝仲田, 孙小芳, 刘西恩, 等. 偶极横波远探测测井技术应用研究[J]. *地球物理学进展*, 2014, 29(5): 2172-2177.
- HAO Zhongtian, SUN Xiaofang, LIU Xi'en, et al. The application research of dipole acoustic reflection imaging technology[J]. *Progress in Geophysics*, 2014, 29(5): 2172-2177.
- [18] 唐晓明, 魏周拓, 苏远大, 等. 偶极横波远探测测井技术进展及其应用[J]. *测井技术*, 2013, 37(4): 333-340.
- TANG Xiaoming, WEI Zhoutuo, SU Yuanda, et al. A review on the progress and application of dipole acoustic reflection imaging technology[J]. *Well Logging Technology*, 2013, 37(4): 333-340.
- [19] 原宏壮, 陆大卫, 张辛耘, 等. 测井技术新进展综述[J]. *地球物理学进展*, 2005, 20(3): 786-795.
- YUAN Hongzhuang, LU Dawei, ZHANG Xinyun, et al. An overview of recent advances in well logging technology[J]. *Progress in Geophysics*, 2005, 20(3): 786-795.
- [20] 张辛耘, 王敬农, 郭彦军. 随钻测井技术进展和发展趋势[J]. *测井技术*, 2006, 30(1): 10-15.
- ZHANG Xinyun, WANG Jingnong, GUO Yanjun. Advances and trends in logging while drilling technology[J]. *Well Logging Technology*, 2006, 30(1): 10-15.
- [21] 徐珂, 田军, 杨海军, 等. 塔里木盆地库车坳陷超深层现今地应力对储层品质的影响及实践应用[J]. *天然气地球科学*, 2022, 33(1): 13-23.
- XU Ke, TIAN Jun, YANG Haijun, et al. Effects and practical applications of present-day in-situ stress on reservoir quality in ultra-deep layers of Kuqa Depression, Tarim Basin[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2022, 33(1): 13-23.
- [22] 汤天知, 李庆峰, 赵小青, 等. 基于电成像与核磁共振测井的古龙页岩油储层有效性评价[J]. *大庆石油地质与开发*, 2020, 39(3): 129-136.
- TANG Tianzhi, LI Qingfeng, ZHAO Xiaoqing, et al. The effectiveness evaluation of Gulong shale oil reservoirs based on the electrical imaging and NMR logging[J]. *Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing*, 2020, 39(3): 129-136.
- [23] 赖锦, 刘秉昌, 冯庆付, 等. 鄂尔多斯盆地靖边气田马家沟组五段白云岩沉积微相测井识别与评价[J]. *地质学报*, 2020, 94(5): 1551-1567.
- LAI Jin, LIU Bingchang, FENG Qingfu, et al. Well logging identification and evaluation of depositional microfacies in dolostones from the 5th Member of the Ordovician Majiagou Formation in the Jingbian gas field, Ordos Basin[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2020, 94(5): 1551-1567.
- [24] FOLKESTAD A, VESELOVSKY Z, ROBERTS P. Utilising borehole image logs to interpret delta to estuarine system: A case study of the subsurface Lower Jurassic Cook Formation in the Norwegian northern North Sea[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2012, 29(1): 255-275.
- [25] KEETON G I, PRANTER M J, COLE R D, et al. Stratigraphic architecture of fluvial deposits from borehole images, spectral-gamma-ray response, and outcrop analogs, Piceance Basin, Colorado[J]. *AAPG Bulletin*, 2015, 99(10): 1929-1956.
- [26] NIAN Tao, JIANG Zaixing, WANG Guiwen, et al. Characterization of braided river-delta facies in the Tarim Basin Lower Cretaceous: Application of borehole image logs with comparative outcrops and cores[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2018, 97: 1-23.
- [27] 赖锦, 韩能润, 贾云武, 等. 基于测井资料的辫状河三角洲沉积储层精细描述[J]. *中国地质*, 2018, 45(2): 304-318.
- LAI Jin, HAN Nengrun, JIA Yunwu, et al. Detailed description of the sedimentary reservoir of a braided delta based on well logs[J]. *Geology in China*, 2018, 45(2): 304-318.
- [28] LAI Jin, WANG Guiwen, FAN Zhuoying, et al. Fracture detection in oil-based drilling mud using a combination of borehole image and sonic logs[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2017, 84: 195-214.
- [29] 廖纪佳, 朱筱敏, 邓秀芹, 等. 鄂尔多斯盆地陇东地区延长组重力流沉积特征及其模式[J]. *地学前缘*, 2013, 20(2): 29-39.
- LIAO Jijia, ZHU Xiaomin, DENG Xiuqin, et al. Sedimentary characteristics and model of gravity flow in Triassic Yanchang Formation of Longdong area in Ordos Basin[J]. *Earth Science Frontiers*, 2013, 20(2): 29-39.
- [30] PRIOUL R, DONALD A, KOESELL R, et al. Forward modeling of fracture-induced sonic anisotropy using a combination of borehole image and sonic logs[J]. *Geophysics*, 2007, 72(4): E135-E147.
- [31] WILSON T H, SMITH V, BROWN A. Developing a model discrete fracture network, drilling, and enhanced oil recovery strategy in an unconventional naturally fractured reservoir using integrated field, image log, and three-dimensional seismic data[J]. *AAPG Bulletin*, 2015, 99(4): 735-762.
- [32] 赖锦, 王贵文, 孙思勉, 等. 致密砂岩储层裂缝测井识别评价方法研究进展[J]. *地球物理学进展*, 2015, 30(4): 1712-1724.
- LAI Jin, WANG Guiwen, SUN Simian, et al. Research advances in logging recognition and evaluation method of fractures in tight sandstone reservoirs[J]. *Progress in Geophysics*, 2015, 30(4): 1712-1724.
- [33] LAI Jin, LIU Shichen, XIN Yi, et al. Geological-petrophysical insights in the deep Cambrian dolostone reservoirs in Tarim Basin, China[J]. *AAPG Bulletin*, 2021, 105(11): 2263-2296.
- [34] 宿晓岑, 巩磊, 高帅, 等. 陇东地区长7段致密储集层裂缝特征及定量预测[J]. *新疆石油地质*, 2021, 42(2): 161-167.
- SU Xiaocen, GONG Lei, GAO Shuai, et al. Characteristics and quantitative prediction of fractures of tight reservoir in Chang

- 7 Member in Longdong area[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2021, 42(2): 161-167.
- [35] LAI Jin, LIU Bingchang, LI Hongbin, et al. Bedding parallel fractures in fine-grained sedimentary rocks: Recognition, formation mechanisms, and prediction using well log[J]. Petroleum Science, 2022, 19(2): 554-569.
- [36] AMEEN M S, MACPHERSON K, AL-MARHOON M I, et al. Diverse fracture properties and their impact on performance in conventional and tight-gas reservoirs, Saudi Arabia: The Unayzah, South Haradh case study[J]. AAPG Bulletin, 2012, 96(3): 459-492.
- [37] DASHTI R, RAHIMPOUR-BONAB H, ZEINALI M. Fracture and mechanical stratigraphy in naturally fractured carbonate reservoirs: A case study from Zagros region[J]. Marine and Petroleum Geology, 2018, 97: 466-479.
- [38] ZENG Lianbo, LI Xiangyang. Fractures in sandstone reservoirs with ultra-low permeability: A case study of the Upper Triassic Yanchang Formation in the Ordos Basin, China[J]. AAPG Bulletin, 2009, 93(4): 461-477.
- [39] 高长海, 张云银, 王兴谋. 渤海湾盆地济阳拗陷浅层天然气成因及其来源[J]. 天然气工业, 2020, 40(5): 26-33.
GAO Changhai, ZHANG Yunyin, WANG Xingmou. Genesis and source of shallow natural gas in the Jiyang Depression of the Bohai Bay Basin[J]. Natural Gas Industry, 2020, 40(5): 26-33.
- [40] 李国欣, 欧阳健, 周灿灿, 等. 中国石油低阻油层岩石物理研究与测井识别评价技术进展[J]. 中国石油勘探, 2006, 11(2): 43-50.
LI Guoxin, OUYANG Jian, ZHOU Cancan, et al. Advancement of petrophysics research and well-logging recognition and evaluation for low-resistivity oil-layer by PetroChina[J]. China Petroleum Exploration, 2006, 11(2): 43-50.
- [41] LAI Jin, PANG Xiaojiao, XU Feng, et al. Origin and formation mechanisms of low oil saturation reservoirs in Nanpu Sag, Bohai Bay Basin, China[J]. Marine and Petroleum Geology, 2019, 110: 317-334.
- [42] 张小莉, 冯乔, 孙佩, 等. 鄂尔多斯盆地延长组高自然伽马砂岩储层特征[J]. 地球物理学报, 2010, 53(1): 205-213.
ZHANG Xiaoli, FENG Qiao, SUN Pei, et al. Characteristics of high gamma ray reservoir of Yanchang Formation in Ordos Basin[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2010, 53(1): 205-213.
- [43] 刘行军, 柳益群, 周鼎武, 等. 鄂尔多斯盆地深部流体示踪: 三叠系延长组高自然伽马砂岩特征及成因分析[J]. 地学前缘, 2013, 20(5): 149-165.
LIU Xingjun, LIU Yiqun, ZHOU Dingwu, et al. Deep fluid tracer in Ordos Basin: Characteristics and origin of high natural gamma sandstone in Triassic Yanchang Formation[J]. Earth Science Frontiers, 2013, 20(5): 149-165.
- [44] 何东博, 冀光, 江乾锋, 等. 苏里格气田西区高含水致密砂岩气藏差异化开发技术对策[J]. 天然气工业, 2022, 42(1): 73-82.
HE Dongbo, JI Guang, JIANG Qianfeng, et al. Differential development technological measures for high-water-cut tight sandstone gas reservoirs in western area of Sulige Gas Field[J]. Natural Gas Industry, 2022, 42(1): 73-82.
- [45] 赖锦, 凡雪纯, 黎雨航, 等. 苏北盆地古近系阜宁组页岩七性关系与三品质测井评价[J]. 地质论评, 2022, 68(2): 751-768.
LAI Jin, FAN Xuechun, LI Yuhang, et al. Well logging evaluation of seven kinds of relationships and three types of properties of Paleogene Funing Formation oil shales in Subei Basin[J]. Geological Review, 2022, 68(2): 751-768.
- [46] 杨小兵, 姚梦麟, 王思静, 等. 页岩气测井地质工程技术新需求及解决方案[J]. 天然气工业, 2022, 42(2): 20-27.
YANG Xiaobing, YAO Menglin, WANG Sijing, et al. Shale gas logging, geology and engineering technologies: New requirements and solutions[J]. Natural Gas Industry, 2022, 42(2): 20-27.
- [47] 杨智, 侯连华, 陶士振, 等. 致密油与页岩油形成条件与“甜点区”评价[J]. 石油勘探与开发, 2015, 42(5): 555-565.
YANG Zhi, HOU Lianhua, TAO Shizhen, et al. Formation conditions and "sweet spot" evaluation of tight oil and shale oil[J]. Petroleum Exploration and Development, 2015, 42(5): 555-565.
- [48] 吴鹏, 高丽军, 李勇, 等. 海陆过渡相岩性频繁互层型页岩气潜力评价方法——以鄂尔多斯盆地临兴区块下二叠统山西组为例[J]. 天然气工业, 2022, 42(2): 28-39.
WU Peng, GAO Lijun, LI Yong, et al. An evaluation method for shale gas potential of marine-continent transitional facies with frequent interbedded lithology: A case study on the Lower Permian Shanxi Formation in Linxing Block of the Ordos Basin[J]. Natural Gas Industry, 2022, 42(2): 28-39.
- [49] 宋振响, 邱岐, 赵琳洁, 等. 基于存滞系数的页岩气资源评价方法[J]. 天然气工业, 2020, 40(10): 12-19.
SONG Zhenxiang, QIU Qi, ZHAO Linjie, et al. A shale gas resource evaluation method based on retention coefficient[J]. Natural Gas Industry, 2020, 40(10): 12-19.
- [50] 闫伟林, 张兆谦, 陈龙川, 等. 基于核磁共振技术的古龙页岩含油饱和度评价新方法[J]. 大庆石油地质与开发, 2021, 40(5): 78-86.
YAN Weilin, ZHANG Zhaoqian, CHEN Longchuan, et al. New evaluating method of oil saturation in Gulong shale based on NMR technique[J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2021, 40(5): 78-86.
- [51] 刘雅慧, 王才志, 刘忠华, 等. 一种评价页岩油含油性的测井方法——以准噶尔盆地吉木萨尔凹陷为例[J]. 天然气地球科学, 2021, 32(7): 1084-1091.
LIU Yahui, WANG Caizhi, LIU Zhonghua, et al. A logging method for evaluating oil-bearing property of Jimsar shale oil: Case study of sag in Junggar Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2021, 32(7): 1084-1091.
- [52] 周永章, 王俊, 左仁广, 等. 地质领域机器学习、深度学习及实现语言[J]. 岩石学报, 2018, 34(11): 3173-3178.
ZHOU Yongzhang, WANG Jun, ZUO Renguang, et al. Machine learning, deep learning and Python language in field of geology[J]. Acta Petrologica Sinica, 2018, 34(11): 3173-3178.
- [53] 石玉江, 刘国强, 钟吉彬, 等. 基于大数据的测井智能解释系统开发与应用[J]. 中国石油勘探, 2021, 26(2): 113-126.
SHI Yujiang, LIU Guoqiang, ZHONG Jibin, et al. Development and application of intelligent logging interpretation system based on big data[J]. China Petroleum Exploration, 2021, 26(2): 113-126.

(修改回稿日期 2022-06-01 编辑 陈古明)



本
文
互
动