

岩性扫描测井解释评价方法及其地质应用



www.
geojournals.cn/georev

苏洋^{1, 2)}, 赖锦^{1, 2)}, 赵飞²⁾, 别康³⁾, 李栋²⁾, 黄玉越²⁾, 张有鹏⁴⁾, 王贵文^{1, 2)}

1) 油气资源与工程全国重点实验室, 北京, 102249;

2) 中国石油大学(北京)地球科学学院, 北京, 102249;

3) 中国石油塔里木油田公司勘探开发研究院, 新疆库尔勒, 841000;

4) 中国石油集团测井有限公司国际公司, 北京, 100101

内容提要:作为新兴的测井仪器,岩性扫描测井(LithoScanner)通过获取地层元素含量,进一步获得地层矿物含量,帮助地质学家解决复杂岩性识别等地质学难题。为了充分推广其在地质学领域的应用,笔者等对岩性扫描测井的原理和解释处理流程进行梳理,并对应用过程中出现的典型案例进行分析。LithoScanner测井可直接获取地层岩性特征,帮助识别地层界面,并实现页岩等复杂岩性、岩相的准确识别。而脆性矿物含量、有机碳含量等也可被LithoScanner测井准确获取,从而计算地层中的脆性指数和有机碳的含量。LithoScanner测井可以探测黄铁矿、煤层等特殊矿物组分,因此可以辅助核磁共振测井资料解释评价。最后指出LithoScanner测井与相应的岩芯和实验数据进行比对,提高LithoScanner测井的可靠性。研究有助于将LithoScanner测井中蕴含的大量地质信息进行挖掘与解读,并消除该资料应用中的一些误区,从而推广LithoScanner测井应用领域。

关键词:岩性扫描测井;地质解释评价;复杂岩性岩相识别;脆性指数;TOC;成岩作用;核磁共振测井

LithoScanner测井,也叫岩性扫描测井,是在元素俘获测井ECS基础上发展起来的。陆上深层、海上深水以及非常规油气是目前油气勘探开发的重点和热点(贾承造, 2023),该重点领域油气勘探开发工作的深入也对测井解释评价提出了新的要求与挑战(赖锦等, 2021)。深层超深层领域以及海上深水钻井取芯困难,而岩石矿物组分及岩性识别是测井评价的首要任务之一(Busch et al., 1987; Dong Shaoqun et al., 2016; Lopes et al., 2019; Lai Jin et al., 2024)。细粒沉积岩作为非常规油气的储集层,虽然看起来颜色和物质组成单一,但实际也包含长英质、碳酸盐、黏土和有机质等组分,不同类型矿物及不同尺度纹层纵向上叠置构成了不同岩相及其组合,因此对非常规油气岩性、岩相的识别与测井评价至关重要(Macquaker et al., 2003; Lazar et al., 2015; Yawar et al., 2017; Liu Bo et al., 2019; 赖锦等, 2023a)。针对深层超深层、深水岩性识别困难以及非常规油气岩石矿物组分测井识别的迫切需求,

LithoScanner测井应运而生。

LithoScanner测井因其高精准度且不被井眼环境所受限,并可对复杂岩性岩相进行识别与判断,而被地质学家广泛应用(王胜建等, 2020)。LithoScanner测井提供储层地球化学信息,从而帮助判断沉积环境(庞小娇等, 2023),同时可测量地层的元素含量与分布,获取储层的物性特征等信息(Freedman et al., 2015)。LithoScanner测井可与其他测井技术结合,提高储层描述的精度与准确程度(冯冲等, 2019; 庞小娇等, 2023)。此外, LithoScanner测井可获取特定矿物的含量,实现脆性指数和有机碳含量的计算(Jarvie et al., 2007; Mews et al., 2019; De et al., 2021; Lai Jin et al., 2022)。但总体上关于LithoScanner测井解释评价流程及应用领域目前研究尚不完善,为更好地实现LithoScanner测井在地质领域的应用,论文梳理LithoScanner测井的原理和解释评价流程。并对其在辅助地质研究的案例进行阐述,最后对其应用前

注:本文为国家自然科学基金资助项目(编号:42002133, 42072150)、中国石油大学(北京)科研启动基金项目(编号:2462023QNXZ010)、中国石油—中国石油大学(北京)战略合作协议项目(编号:ZLZX2020-01)的成果。

收稿日期:2024-01-03;改回日期:2024-04-02;网络首发:2024-04-20;责任编辑:刘志强。Doi: 10.16509/j.georeview.2024.04.041

作者简介:苏洋,女,2002年生,博士研究生,沉积储层和测井地质学专业;Email: suyangcupb@163.com。通讯作者:赖锦,男,1988年生,博士,教授,博士生导师,主要从事沉积储层与测井地质学教学与研究工作;Email: laijin@cup.edu.cn。

景进行展望,因此可将元素测井与地球化学分析、岩芯分析等数据进行对比和校正,提高元素测井的精准程度。希望通过此研究,进一步充分发挥LithoScanner测井在地质研究和勘探开发中的重要作用,并消除该资料地质应用时的典型误区。

1 LithoScanner测井原理、解释方法流程及地质意义

LithoScanner测井相比于前一代元素俘获测井(ECS)测井,其使用更加精密的仪器实现复杂岩性地层矿物成分的获取和总机碳含量的精准计算。传统的元素俘获测井(ECS)只能测量捕获伽马谱,而岩性扫描测井可以测量捕获和非弹性伽马能谱(闫学洪等,2018;Guo Pei et al., 2019)。在测井过程中,仪器中的高能中子源会产生快中子,快中子与地层中不同元素原子核会发生非弹性碰撞和热中子捕获等核反应。发生非弹性碰撞时,高能中子失去大量能量,这些能量传递到矿物原子核中,使其原子核处于激发状态,并诱发出伽马射线(闫学洪等,2018;Guo Pei et al., 2019)。此外,中子会转化为热中子,部分原子核会将热中子进行捕获,使原子核处于激发状态,释放出俘获伽马射线。通过对确定出的两种伽马曲线分析,获取与中子发生作用的原子核的信息,帮助获取相应地层元素的组成,进而解决实际地质问题(魏国等,2015;闫学洪等,2018;Guo Pei et al., 2019)。

1.1 解释评价流程

在非弹性散射和热中子捕获两种作用下,处于不同激发状态的原子核具有特定的诱发伽马射线能谱特征,使用光谱探测器记录地层元素的非弹谱和俘获谱。而每个光谱可以认为来自各个元素的标准

光谱的线性组合。因此,根据已知元素标准光谱,使用相应数学方法,可将标准光谱的线性组合转换为相应元素产额。得到的元素产额通过氧化物闭合模型,计算出元素百分含量。最后,基于元素浓度和矿物浓度之间经验关系的推导或者通过使用迭代反演技术,得到地层的矿物成分如黏土含量、碳酸盐含量、石英、长石含量以及特殊矿物如黄铁矿、石膏等含量(图1)(魏国等,2015;闫学洪等,2018)。

1.2 地质应用领域

随着LithoScanner等升级后的元素测井的出现,元素测井在地质领域的应用越来越广泛。LithoScanner测井可以确定矿物类型和含量,对岩性进行分析,从而帮助识别地层界面(魏翔宇等,2023);此外LithoScanner测井还可用于页岩等细粒沉积岩岩性、岩相精细判别(Wang Song et al., 2021;Huang Yuyue et al., 2023);根据LithoScanner测井获取胶结物类型及含量和与成岩作用相关的矿物成分,从而推测成岩作用程度(赖锦等,2015;Lai Jin et al., 2018);通过脆性矿物的含量,计算地层脆性指数(赖锦等,2016;曹东升等,2021);LithoScanner测井提供对地层中碳元素的直接测量后的数据,并评价矿物中无机碳含量,进行准确的有机碳计算(De et al., 2021;Lai Jin et al., 2022);LithoScanner测井还可以准确获得岩石骨架密度,帮助解决非常规储层孔隙度计算困难的问题(Freedman et al., 2015)。

2 地层界面识别

地层界面通常会伴随岩石中物质的变化,如岩石类型、成分等。而上述变化往往会导致地层中的元素成分发生改变。LithoScanner测井通过测量地

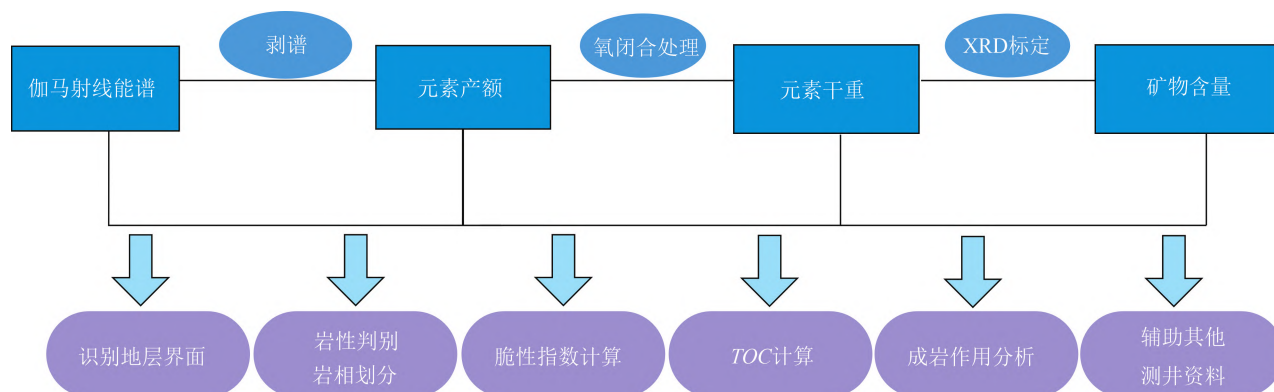


图1 岩性扫描测井处理流程示意图

Fig. 1 Processing flow of Litho-Scanner log

层中的元素含量等数据,可使地层界面在 LithoScanner 测井上产生明显的响应特征。LithoScanner 测井相较于常规测井可从更微观的层面直观反应地层的变化,成为我们识别地层界面的良好手段(柳建华等,2007;魏翔宇等,2023)。

库车坳陷古近系库姆格列木群为膏盐岩、膏质泥岩,其下部地层为白垩系巴什基奇克组砂岩,二者之间出现明显岩性分界(吕修祥等,2000;郇志鹏等,2023)。常规测井曲线上,在地层界面的位置伽马曲线发生突变,伽马值突增,三孔隙度曲线中中子孔隙度和声波测井曲线出现上升趋势,密度测井曲线出现下降,电阻率曲线也出现明显下降。分析库车坳陷博孜 901 井 LithoScanner 测井数据,在 7720 m 井段上,由于膏盐岩的出现,硬石膏含量增加,黏土类矿物、碳酸盐类矿物等含量出现明显降低。在 7720 m 处硬石膏含量突降,同时石英、长石、黏土类矿物含量增高,岩性出现明显变化(由膏盐岩向下变为砂岩),证明此处为典型的古近系库姆格列木群与白垩系巴什基奇克组地层分界面(图 2)。

利用 LithoScanner 测井进行地层界面识别具有简单明了的特点,可以直观地识别出地层界面位置,尤其是对于岩性突变接触的地层界面。

3 岩性、岩相组合特征识别

识别岩性、岩相组合特征有助于分析储层的分布规律和演化特征,进一步揭示储层的形成和发育机制。不同类型的岩相由于其石英、碳酸盐类和黏土类矿物含量的不同,其孔隙结构和裂缝

的发育程度存在差异,因此,对岩性岩相的分析是评价与预测储层的基础(王超等,2018;王然等,2023)。相对于精度好但是成本较高的实验数据分析,岩性扫描测井因其连续性好同时也可精确获得矿物含量,是识别岩性和岩相组合较好的手段(Wang Song et al., 2022; 付连明等,2022;李红斌等,2022)。LithoScanner 测井分析地层中各种元素的含量或是通过计算不同元素的比值,利用不同岩

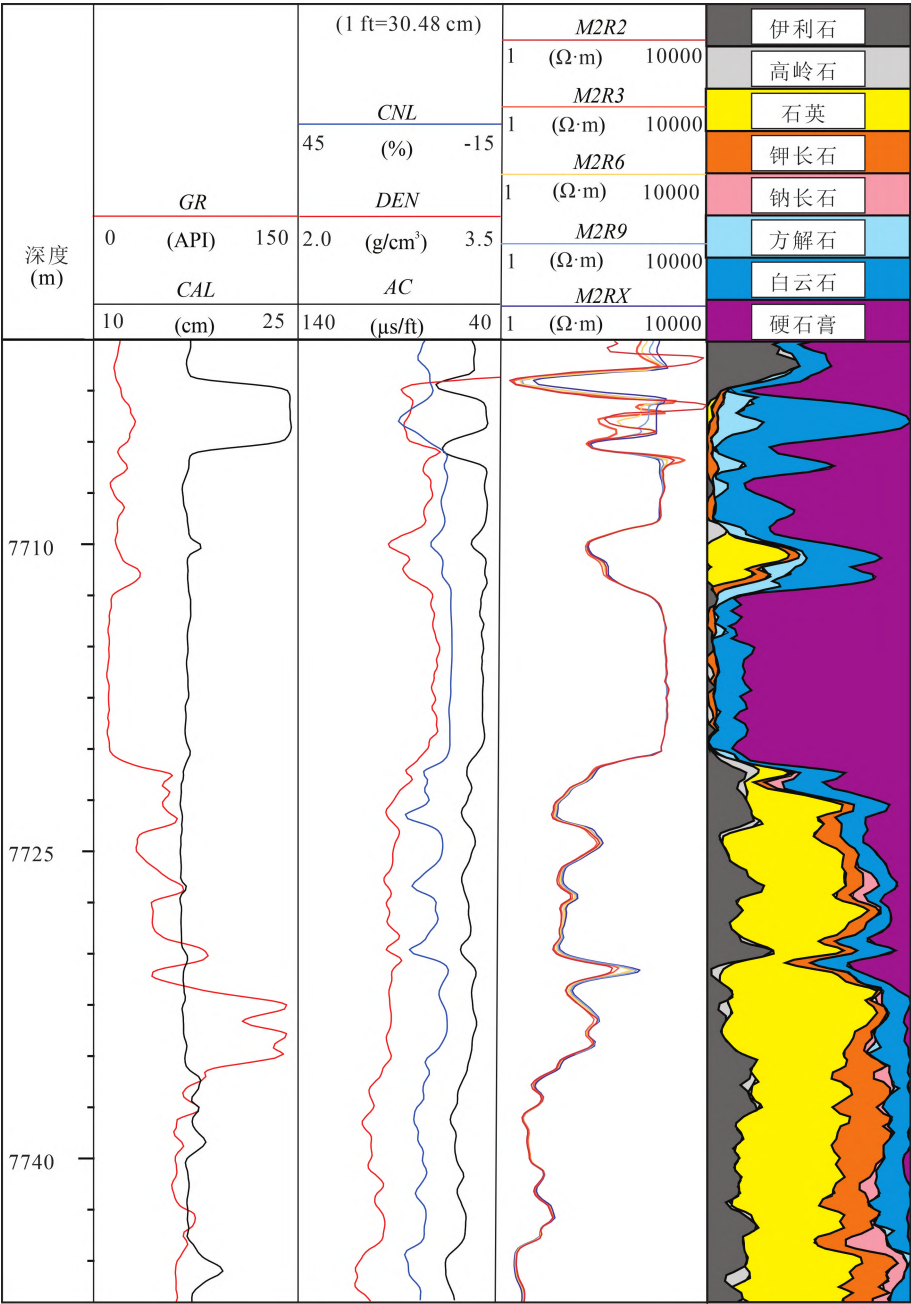


图 2 库车坳陷博孜 901 井古近系库姆格列木群与白垩系巴什基奇克组地层分界

Fig. 2 The stratigraphic interface between the Paleogene Kumugeli Group and the Cretaceous Bashijiqike Formation of the Well Bozi 901 in the Kuqa Depression

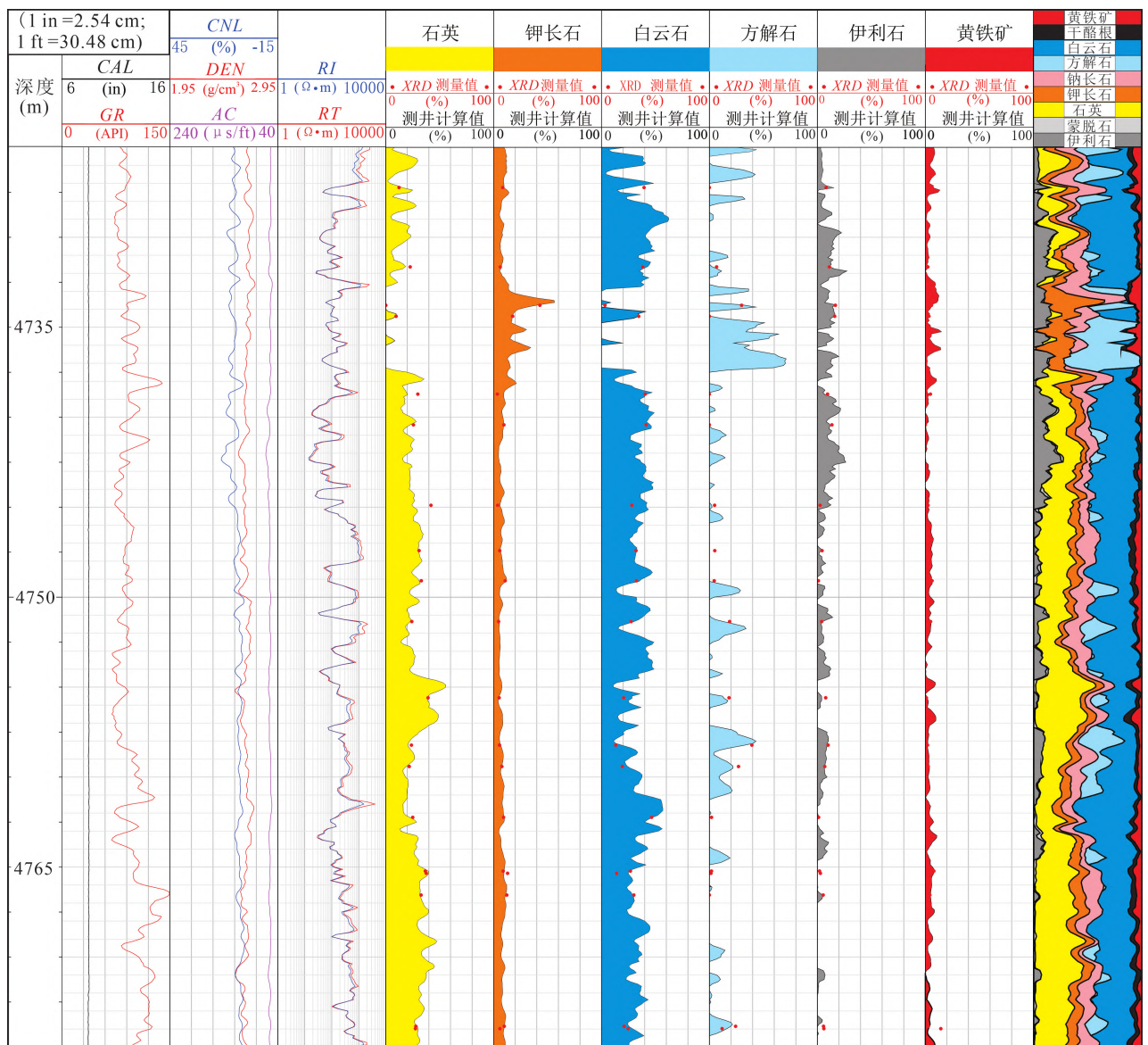


图 3 基于 LithoScanner 测井玛湖凹陷风城组页岩岩性识别及矿物计算
Fig. 3 The lithology identification and calculation of mineral content in the Fengcheng Formation shale of the Mahu Sag by LithoScanner logging

性具有不同的矿物含量的特征,进一步区分不同岩性。通过对 LithoScanner 测井数据进行统计分析,识别不同岩相组合特征的分布规律。同时结合常规测井和成像测井等,进行岩相组合特征的精细分析 (Wang Song et al. , 2021; 付连明等,2022;张益鄰等,2023)。

对玛湖凹陷风城组页岩进行岩性的识别与岩相组合特征分析,根据 LithoScanner 测井可以较为直观地获取地层岩石矿物的组成与含量。利用组成岩石的黏土矿物、硅质矿物(石英+长石)、碳酸盐矿物三者相对含量,从而实现不同岩性岩相的区分。在

玛页 1 井 4734 ~ 4737 m 井段,白云岩含量大于 30%,方解石含量相对较少,长英质含量小于 30%,判断为白云质页岩(图 3)。4753 ~ 4757 m 井段,长英质含量大于 50%,碳酸盐矿物小于 50%,判断岩性为长英质页岩(图 3)。当然在岩性识别基础上,可依据三级指标,即有机质丰度(*TOC*)—沉积构造(块状、层状和纹层状)—矿物成分对岩相进行分类命名(赖锦等,2023a),沉积构造可以通过成像测井识别进行识别,*TOC* 含量则可以通过 $\Delta \log R$ 法等计算,然后将 *TOC* 含量、沉积构造和岩性三要素叠加,实现岩相的三级分类命名,如富含 *TOC* 纹层

状长英质页岩相 (Wang Song et al., 2021; Huang Yuyue et al., 2023)。

与常规测井相比,利用 LithoScanner 测井在进行复杂岩性地层岩性、岩相组合特征识别时具有明显优势,但部分非常规油气储层岩性变化较为频繁,而 LithoScanner 测井分辨率限制,不一定能够实现高频复杂岩性、岩相变化。

4 脆性指数评价

脆性指数是非常规油气储层脆性和可压性的重要指标,其对于油气勘探开发具有重要意义(邹才能等,2013;赖锦等,2016;Iqbal et al., 2018)。脆性指数帮助评价储层的破裂性、预测裂缝发育和识别优质储层,为油气勘探开发提供科学依据和技术支持(Kiwi et al., 2018)。目前计算脆性指数的主要计算方法有两种(赖锦等,2016;王升等,2018),一是获取石英、碳酸盐等脆性矿物含量,从而计算脆性指数(式 1)(Jarvie et al., 2007);二是利用泊松比和杨氏模量等岩石力学参数进行脆性指数计算(Rickman et al., 2008; Iqbal et al., 2018)。LithoScanner 测井计算脆性指数则是基于获取脆性矿物的含量所实现的。石英和碳酸盐岩含量高,脆性指数高,而黏土矿物含量高,孔隙度高,导致脆性指数较低(Mews et al., 2019)。通过 LithoScanner 测井获取岩石中石英、长石和白云石等脆性矿物的含量,实现脆性指数的计算(公式 1)。根据目的层岩性等因素的不同,所采用的计算公式中的分子分母也会有所变化。

$$BI = \frac{Qz + Car}{Qz + Car + Fels + Clay} \times 100\% \quad (1)$$

$$BI_E = \frac{E - E_{\min}}{E_{\max} - E_{\min}} \quad (2)$$

$$BI_\nu = \frac{\nu - \nu_{\min}}{\nu_{\max} - \nu_{\min}} \quad (3)$$

$$BI = \frac{BI_E + BI_\nu}{2} \times 100\% \quad (4)$$

公式(1)为矿物组分法计算脆性指数,公式(2)—公式(4)为泊松比—杨氏模量法计算脆性指数。式中, Qz 为石英含量(%); Car 为碳酸盐矿物含量(%); $Fels$ 为长石含量(%); $Clay$ 为黏土总量(%); BI 为脆性指数(%); E 为岩石的杨氏模量(GPa); ν 为岩石泊松比,无量纲;下标 min 和 max 分别代表该参数在某个地层段内的最大值和最小值。 BI_E 和 BI_ν 分别为通过杨氏模量和泊松比所计算的脆性指

数(%)。

两种方法主要区别在于 LithoScanner 测井计算脆性指数依赖于测量的矿物含量数据和公式的准确性[公式(1)],而泊松比—杨氏模量法则关注点在于岩石力学参数等物理性质[公式(2)—公式(4)]。如下图 4 对玛湖凹陷二叠系风城组页岩进行脆性指数计算,4640~4660 m 井段,两种方法拟合效果较好,而 4660~4680 m 井段,两种方法计算结果存在一定差异,主要由于矿物组分法忽略了成岩作用、矿物本身性质等相关因素的影响(赵迪斐等,2016;Mews et al., 2019)。一方面可能是由于同一矿物组分但成岩改造强度不同,导致脆性指数计算存在差异,此外其他特殊矿物的加入导致 LithoScanner 测井计算结果出现偏差。

相比较而言,泊—杨法由于综合考虑了岩石力学参数的影响,可以分析压裂的产生及保持张开的能力,因而适应范围相对较广。而基于 LithoScanner 测井的矿物组分法由于易受公式中未提及的特殊矿物影响,因而推广应该受到一定的限制,但 LithoScanner 测井矿物组分计算脆性指数的方法可以直观地反映脆性矿物的变化,但未考虑矿物的形态影响(如石英可以以矿物颗粒以及胶结物形式存在)(图 4)。

5 烃源岩 TOC 含量评价

目前总有机碳含量(TOC)的测井计算如 $\Delta \log R$ 法(Passey, 1990)、多元回归方法(王祥等,2020)、自然伽马能谱法(Sérgio et al., 2018;Lai Jin et al., 2022)等都是间接计算 TOC,根据所采用的模型不同,计算结果有时出现较大的差异,同时其需大量的岩芯数据标定,增加计算的成本(Gonzalez et al., 2013; Lai Jin et al., 2022)。而 LithoScanner 测井通过对获取的非弹性谱解谱可直接获取到地层总碳(TC)元素含量,且不受井眼稳定性等因素所影响,再做无机碳校正后可得到 TOC 含量(De et al., 2019;王胜建等,2020;赖锦等,2024)。

LithoScanner 测井过程中,仪器测量得到总碳元素含量包括有机碳含量和非骨架总有机碳含量,因此 TOC 计算可通过 LithoScanner 获取的总碳含量减去无机碳含量实现。而地层中无机碳(TIC)含量主要由方解石、白云石、菱铁矿和铁白云石等矿物所提供(Charsky et al., 2013),通过去除掉上述矿物的碳组分,从而计算出有机碳的含量($TOC = TC - TIC$)。本次研究通过对古龙凹陷古页 1 井白垩系

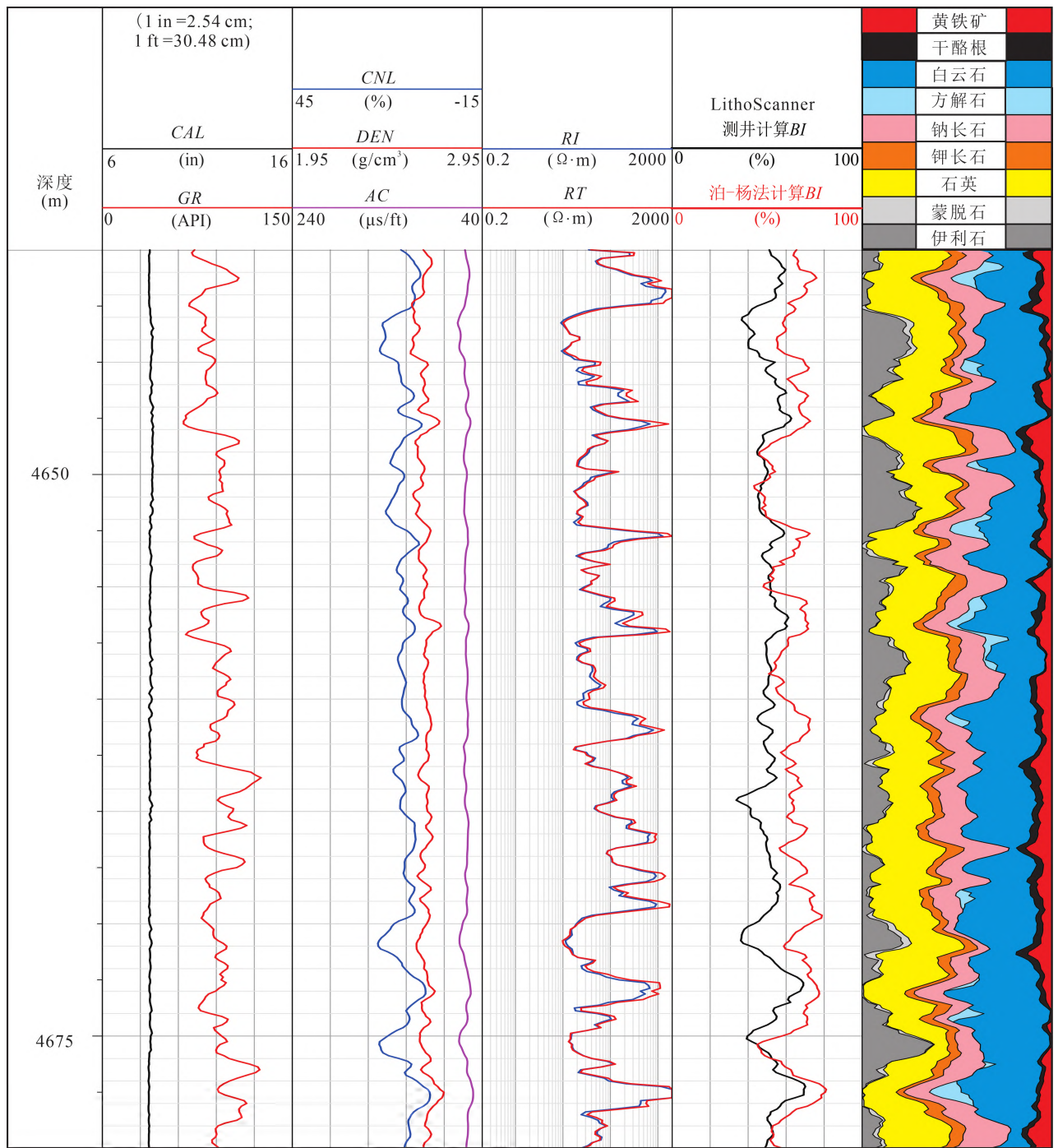


图 4 基于 LithoScanner 测井的玛湖凹陷风城组页岩脆性指数测井计算
Fig.4 Brittleness index calculated by LithoScanner log in the Fengcheng Formation shale in the Mahu Sag

青山口组进行 *TOC* 测井计算。根据结果可发现岩芯实测 *TOC* 与 LithoScanner 计算出的 *TOC* 具有较好的一致性,展现其在计算 *TOC* 上具有明显的优越性(图 5)。

LithoScanner 测井计算 *TOC* 含量时往往对较高 *TOC* 的层段,计算精度较高,可以看出高 *TOC* 含量井段测井计算与岩芯实测吻合度较好(图 5),而低

TOC 含量层段,该测井难以精细反映 *TOC* 含量变化(图 5)(Lai Jin et al., 2022; 赖锦等,2024)。

6 成岩作用及成岩矿物组合特征分析

储层的成岩作用的研究对储层综合评价与预测具有重要的意义,成岩作用及成岩相分析可揭示储层形成机制,是分析储层品质和储集特征的基础

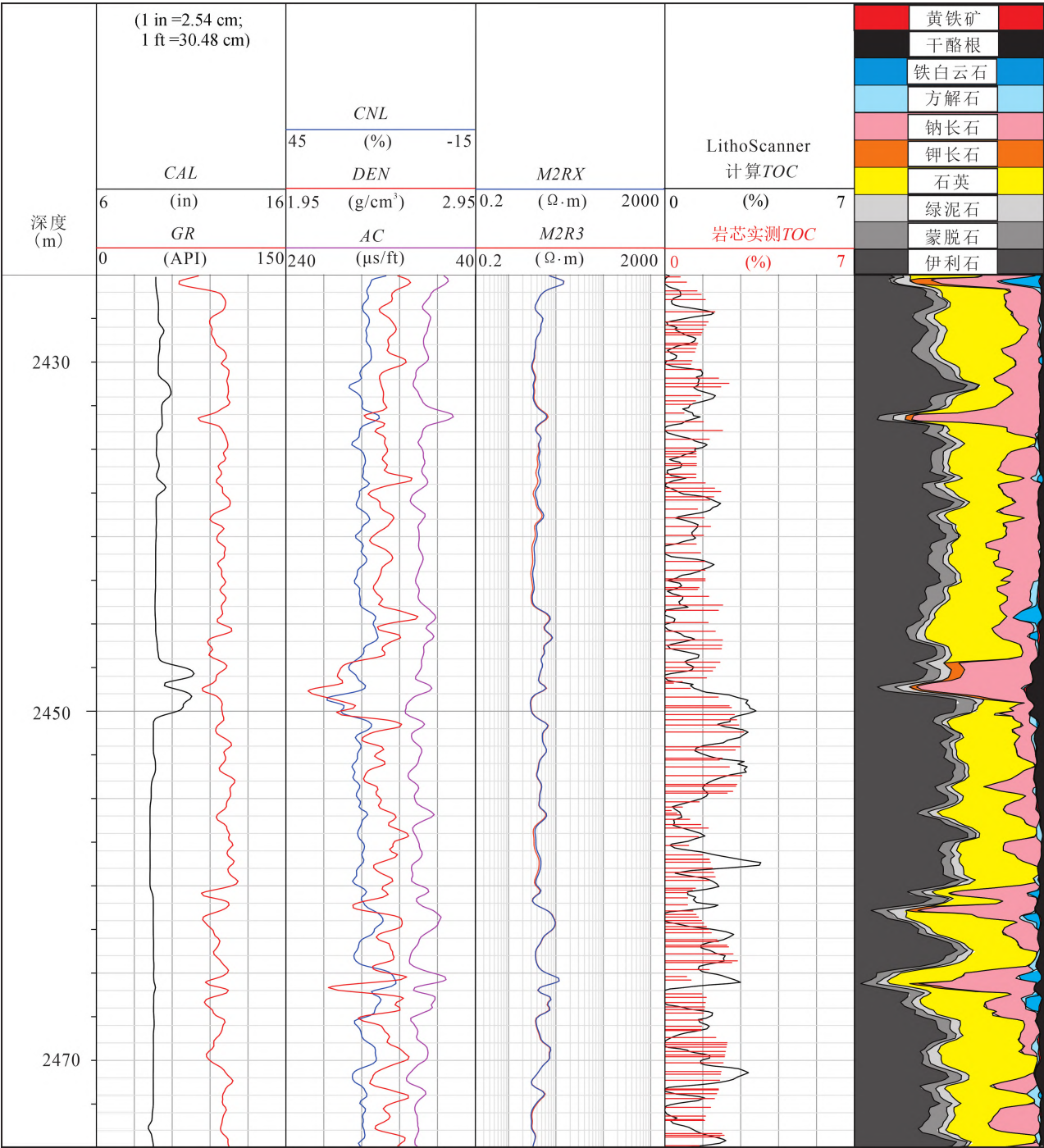


图 5 基于 LithoScanner 的古龙凹陷青山口组烃源岩 TOC 测井计算

Fig. 5 TOC content calculated from LithoScanner log in the Qingshankou Formation of the Gulong Sag

(邹才能等,2008;朱如凯等,2009;赖锦等,2023b)。对成岩作用的研究最直接的方法是通过岩芯观察,而岩性成本过高,亟需加入相对成本较低的地球物理测井帮助进行成岩作用的分析。LithoScanner 测井可得到成岩矿物含量特征,直观地反应储层的成岩作用,其在分析成岩作用及成岩矿物组合特征方

面具有明显优势(赖锦等,2015)。通过对 LithoScanner 测井数据的正确解释和分析,结合其他地质资料的验证和修正,有助于更好地理解地层的成岩演化过程和储层特征(Lai Jin et al., 2017, 2023)。

通过分析 LithoScanner 测井曲线的变化规律和

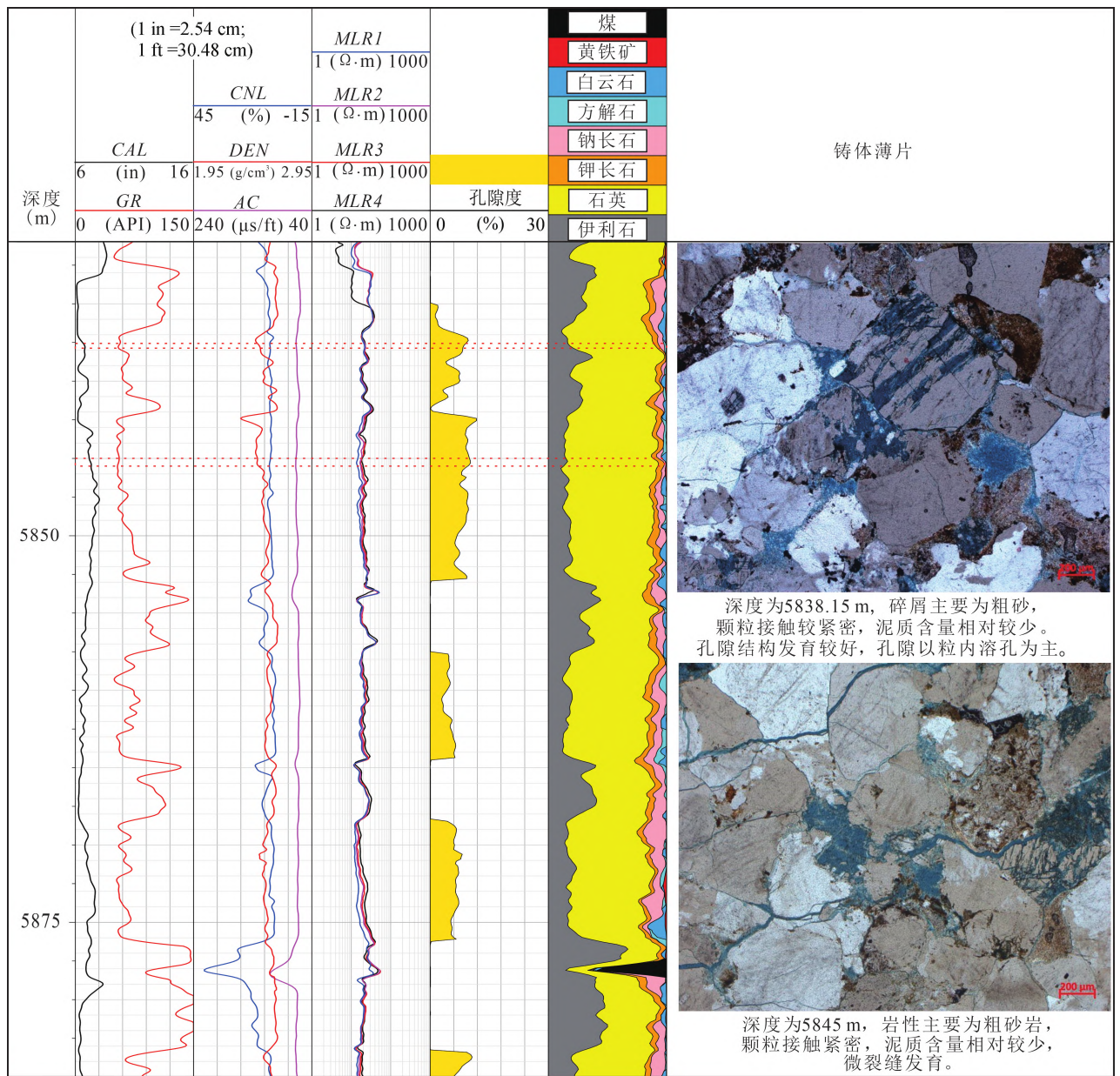


图 6 库车坳陷迪北 5 井阳霞组成岩作用 LithoScanner 测井响应特征

Fig. 6 LithoScanner log response characteristics of the Yangxia Formation in the Well Dibe-5 in Kuqa Depression

成岩矿物组合特征的对应关系,可以判断储层经历的成岩作用特征(图 6),如溶解作用、胶结作用和压实作用等(Lai Jin et al., 2017)。对库车坳陷迪北 5 井侏罗系阿合组地层 LithoScanner 测井资料分析,发现砂泥岩界面,碳酸盐岩含量相对较高,而根据迪北 5 井铸体薄片观察,库车坳陷侏罗系阿合组,其岩性主要为碎屑岩,未观察碳酸盐岩岩屑,因此 LithoScanner 测井中所测量得到的碳酸盐岩含量主要为胶结物的含量,说明砂泥界面富集碳酸盐岩胶结物(图 6)。这是由于砂泥交互界面易受各种流体

作用影响,导致其碳酸盐岩矿物相对富集(Lai Jin et al., 2017)。同时可发现黏土矿物含量高的位置,地层孔隙度出现明显下降,说明该区域压实作用较强,岩石被压实致密,导致地层孔隙度出现下降的趋势(Lai Jin et al., 2018)。而溶蚀作用发育较强的层段,往往具有最高的长英质矿物含量,而其碳酸盐矿物及黏土矿物含量相对较少(图 6)。

利用 LithoScanner 测井判别成岩作用强度时只考虑了矿物含量的影响,无法综合分析矿物的赋存形态影响,如方解石可以以岩屑颗粒以及胶结物形

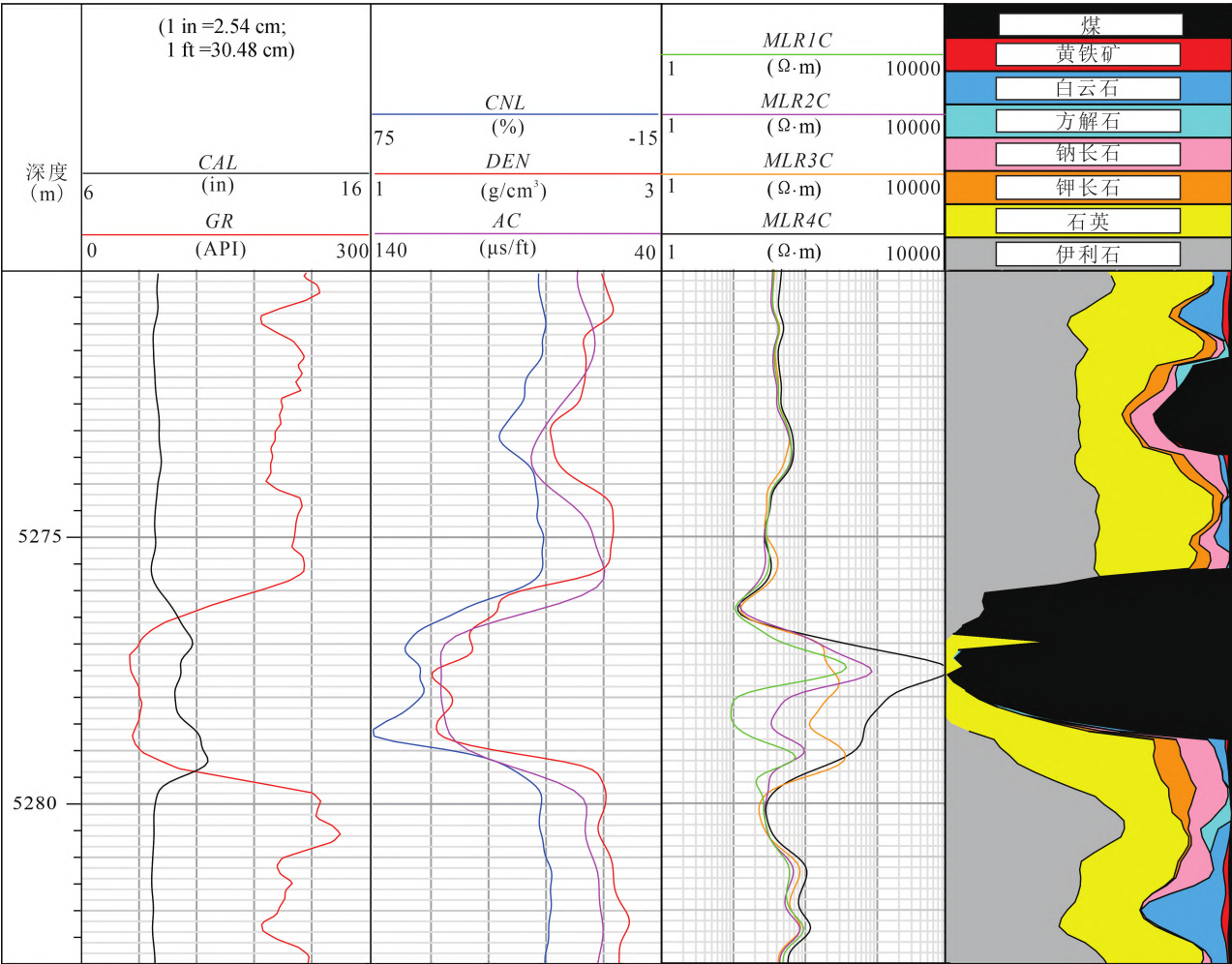


图 7 库车坳陷迪北 501 井煤层 LithoScanner 测井响应特征
Fig. 7 LithoScanner log response characteristics of the coal in the Well Dibe-501 in Kuqa Depression

式存在,但在 LithoScanner 测井上无法有效区分。

7 辅助解读核磁共振、密度测井等

特殊矿物(黄铁矿等)和岩性(如四川盆地大安寨组介壳灰岩、库车坳陷古近系库姆格列木群膏岩盐)通常会对测井响应造成明显影响,同时导致相应的测井计算结果出现误差。作为地质学家识别岩性的新兴手段,LithoScanner 可以识别特殊矿物、确定特殊岩性,帮助辅助解读其他测井技术并协助沉积相分析(冯冲等,2019;庞小娇等,2023)。

LithoScanner 测井可以识别特殊岩性,如煤、介壳灰岩等。图 7 中 5275.5~5219.0 m 深度发育煤层,LithoScanner 可以较为容易地识别煤层,该煤层 GR 低、中子高、密度低、声波时差大,同时电阻率高。在确定侏罗系阿合组为典型辫状河三角洲平原沉积体系的背景下,同时根据此分析结果结合常规测井

可判断其为侏罗系阿合组的沼泽沉积微相(图 7)。

顺磁性物质(Fe 等)具有自旋电子的矿物或岩石成分,其存在会对核磁共振(NMR)测井中计算孔隙度的结果产生干扰(史飞洲等,2016;高衍武等,2021)。图 8 中,LithoScanner 测井中显示,在黄铁矿出现的井段,黄铁矿的存在会减小地层孔隙流体的横向弛豫时间 T_2 ,如图中 1970~1980 m 深度段,LithoScanner 测井可明显看出黄铁矿的存在,对应的核磁 T_2 谱谱峰明显偏低,同时计算核磁孔隙度偏小(图 8)。此外,由于核磁测井分辨率的问题,部分由于黄铁矿快速衰减的信号无法被检测到,导致核磁测井计算出的有效孔隙度减小(谢然红等,2008)。

当黄铁矿的含量大于 3%时,核磁测井孔隙度普遍在 7%之下,随着黄铁矿含量的增加,核磁测井计算的孔隙度出现了降低的趋势(图 9)。当然在计算核磁测井孔隙度时,受到干酪根的影响,会导致其

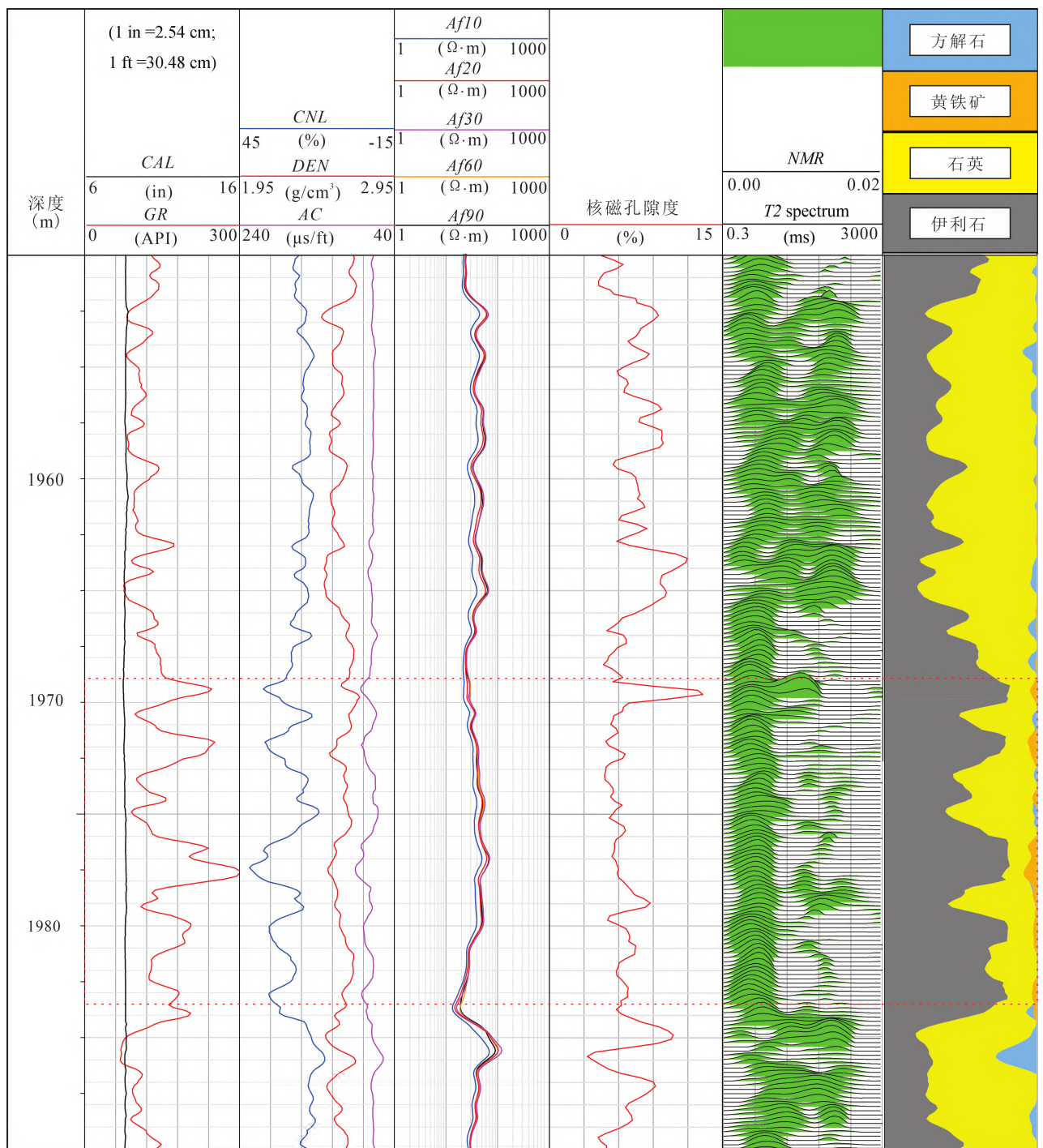


图 8 鄂尔多斯盆地悦 32 井长 7 段黄铁矿含量对核磁测井的影响
Fig. 8 The impact of pyrite content on nuclear magnetic resonance (NMR) logging in the Chang-7 Member, Yanchang Formation in the Well Yue-32 in Ordos Basin

出现异常高的情况(约 1970 m 深度附近)(图 8)。因此,黄铁矿等顺磁性物质的存在,将导致核磁 T_2 信号减弱,从而出现较低的核磁孔隙度数值。
LithoScanner 也可帮助识别介壳灰岩段,图 10 为古龙凹陷白垩系青山口组页岩层系,在古页 2HC

井 2227 m 以及 2238 m 深度处,常规测井曲线上电阻率和密度升高、声波时差和中子孔隙度降低,分析 LithoScanner 测井数据可发现,该解释层段方解石含量突增,长石、石英矿物含量相对下降,为典型的介壳灰岩段(图 10)。

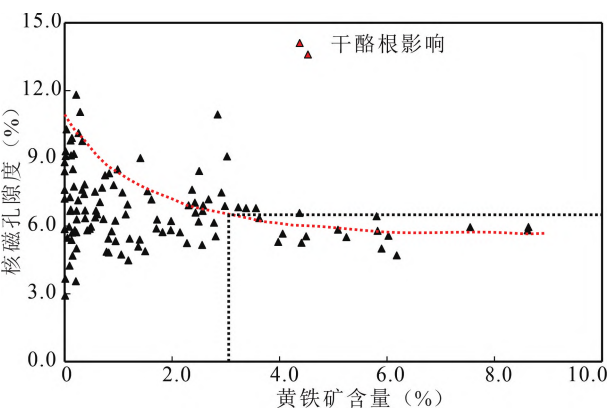


图 9 鄂尔多斯盆地悦 32 井 1950~1990 m 深度段黄铁矿含量与核磁孔隙度关系交互图

Fig. 9 Crossplot showing the relationship between pyrite content and porosity calculated by nuclear magnetic in the Well Yue-32 in Ordos Basin

综上所述, LithoScanner 测井其具有较高分辨率,同时可以监测井壁地层矿物及岩性信息的变化。作为高精度的地层元素探测仪器,其可获取特殊矿物信息,成为辅助其他测井技术的重要工具,也是分析地质问题中岩性、岩相以及成岩作用的良好手段。但在推广应用 LithoScanner 测井时,要综合考虑复杂的地质情况影响,此外,对于一些复杂井眼条件(如井壁垮塌),由于其数据获取较为困难,容易获得“伪资料”,对相应研究人员解释能力提出挑战,因此 LithoScanner 测井地质应用应与地质背景以及岩芯观察及分析测试相结合,从而更好地挖掘蕴含其中的丰富的地质信息。

8 结论

(1) LithoScanner 测井作为地质新兴的岩性识别的工具,用相对更高的精度测量地层中更多关键元素的含量,通过相应的氧闭合模型获取相应矿物含量,从而实现岩性岩相的识别,并通过矿物及岩性的突变接触面帮助判别地层界面。

(2) LithoScanner 测井获取特征矿物含量和不受岩石骨架所影响的总碳含量,可实现地层脆性指数评价和 TOC 含量的计算。将计算得到的矿物含量与相应的岩石薄片、其他类型测井数据等资料结合,可辅助分析成岩作用,同时也可以解答其他测井技术因为特殊矿物含量导致计算结果不准确等问题。LithoScanner 测井可以识别黄铁矿等顺磁性物质,从而辅助解释核磁共振测井中的谱峰明显偏低以及计算核磁孔隙度偏低的现象。

(3) LithoScanner 测井的精准程度,依赖于资料处理方法的精确程度。LithoScanner 测井在资料处理的过程中可能会出现误差,因此在处理过程中将元素测井与地球化学分析、岩芯分析等地质实验室数据进行对比和校正,将进一步验证元素测井的可靠性和适用性,从而推广 LithoScanner 测井地质应用的广度以及提高 LithoScanner 测井地质应用的精度。

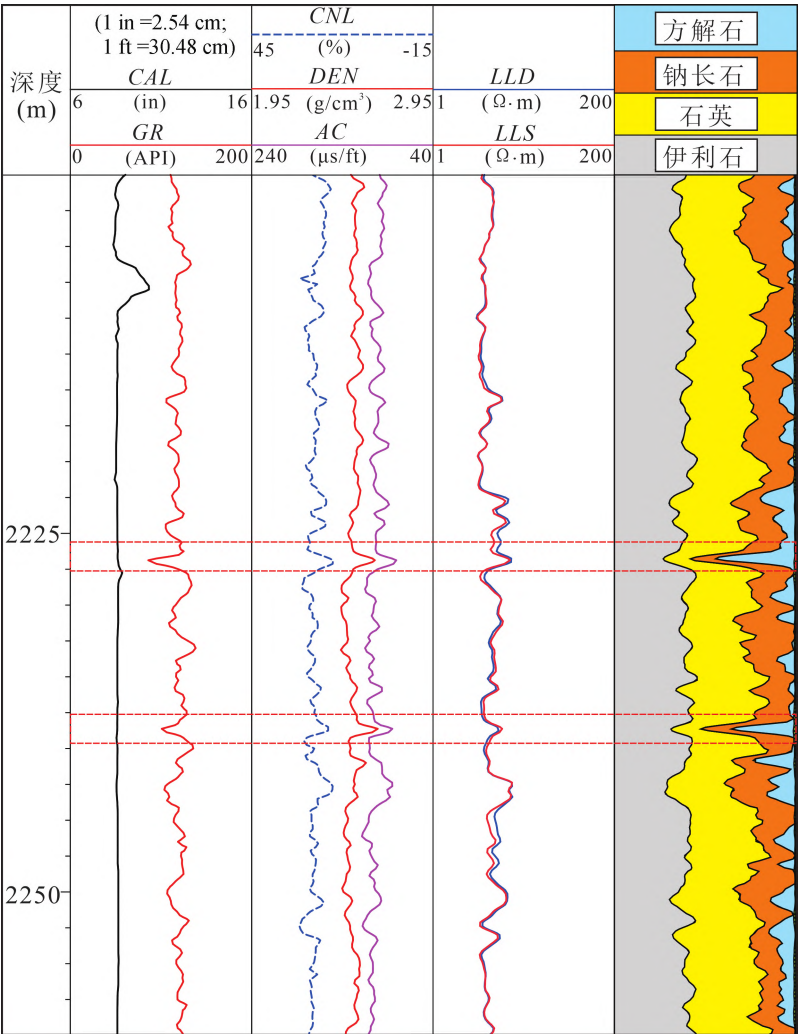


图 10 古龙凹陷古页 2HC 井介壳灰岩测井响应特征

Fig. 10 The logging response characteristics of the coquina in the Well Guye-2HC in Gulong sag

参考文献 / References

(The literature whose publishing year followed by a “&” is in Chinese with English abstract; The literature whose publishing year followed by a “#” is in Chinese without English abstract)

- 曹东升, 曾联波, 吕文雅, 徐翔, 田鹤. 2021. 非常规油气储层脆性评价与预测方法研究进展. 石油科学通报, 6(1): 31~45.
- 冯冲, 王清斌, 谭忠健, 代黎明, 刘晓健, 赵梦. 2019. 富火山碎屑地层复杂岩性测井分类与识别——以 KL16 油田为例. 石油学报, 40(S2): 91~101.
- 付连明, 郑以华, 房涛, 王玮, 王玥, 蔡亮. 2022. 测井新技术在玛北陆相页岩油储层的应用. 测井技术, 46(3): 319~325.
- 高衍武, 赵延静, 吴伟, 张文静, 蔺敬旗, 安银银. 顺磁性物质含量对火山岩核磁孔隙度的影响及校正——以准噶尔盆地中拐凸起石炭系火山岩为例. 2021. 长江大学学报(自然科学版), 18(6): 26~32.
- 郇志鹏, 胡剑凤, 王志民, 宋金鹏, 莫涛, 郝祥保, 田盼盼, 崔德育, 杨敬博, 李浩平, 刘新宇, 平忠伟. 2022. 库车坳陷古近系盐底卡层技术研究与应. 中国石油勘探, 27(1): 142~150.
- 贾承造. 2023. 含油气盆地深层—超深层油气勘探开发的科学技术问题. 中国石油大学学报(自然科学版), 47(5): 1~12.
- 赖锦, 王贵文, 柴毓, 冉冶, 郑新华, 信毅, 周磊, 吴庆宽. 2015. 库车坳陷白垩系巴什基奇克组成岩层序地层特征. 沉积学报, 33(2): 394~407.
- 赖锦, 王贵文, 范卓颖, 陈晶, 王抒忱, 周正龙, 范旭强. 2016. 非常规油气储层脆性指数测井评价方法研究进展. 石油科学通报, 1(3): 330~341.
- 赖锦, 王贵文, 庞小娇, 韩宗晏, 李栋, 赵仪迪, 王松, 江程舟, 李红斌, 黎雨航. 2021. 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. 地质论评, 67(6): 1804~1828.
- 赖锦, 庞小娇, 赵鑫, 赵仪迪, 王贵文, 黄玉越, 李红斌, 黎雨航. 2022. 测井地质学研究中的典型误区与科学思维. 天然气工业, 42(7): 31~44.
- 赖锦, 李红斌, 张梅, 白梅梅, 赵仪迪, 范旗轩, 庞小娇, 王贵文. 2023a. 非常规油气时代测井地质学研究进展. 古地理学报, 25(5): 1118~1138.
- 赖锦, 肖露, 赵鑫, 赵飞, 黎雨航, 朱世发, 王贵文, 刘宏坤. 2023b. 深层—超深层优质碎屑岩储层成因与测井评价方法——以库车坳陷白垩系巴什基奇克组为例. 石油学报, 44(4): 612~625.
- 赖锦, 白天宇, 苏洋, 赵飞, 李玲, 黎雨航, 李红斌, 王贵文, 肖承文. 2024. 烃源岩测井识别与评价方法研究进展. 地质论评, 70(2): 721~741.
- 李红斌, 王贵文, 王松, 庞小娇, 刘士琛, 包萌, 彭寿昌, 赖锦. 2022. 基于 Kohonen 神经网络的页岩岩相测井识别方法——以吉木萨尔凹陷二叠系芦草沟组为例. 沉积学报, 40(3): 626~640.
- 吕修祥, 金之钧, 周新源, 皮学军. 2000. 塔里木盆地库车坳陷与膏盐岩相关的油气聚集. 石油勘探与开发, 27(4): 20~21+109~110+118.
- 庞小娇, 王贵文, 匡立春, 赵飞, 李红斌, 韩宗晏, 白天宇, 赖锦. 2023. 沉积环境控制下的页岩岩相组合类型及测井表征: 以松辽盆地古龙凹陷青山口组为例. 古地理学报, 25(5): 1156~1175.
- 史飞洲, 王彦春, 孙伟, 方圆. 2016. 核磁共振测井资料在滴西地区

- 火成岩中的应用效果分析. 新疆石油地质, 37(5): 593~597.
- 王超, 张柏桥, 舒志国, 陆永潮, 陆亚秋, 包汉勇, 李争, 刘超. 2018. 四川盆地涪陵地区五峰组—龙马溪组海相页岩岩相类型及储层特征. 石油与天然气地质, 39(3): 485~497.
- 王然, 吴涛, 尤新才, 朱涛, 钱永新, 刘振宇, 万敏. 2023. 玛湖凹陷二叠系风城组页岩油储层岩相特征及定量评价. 石油学报, 44(7): 1085~1096.
- 王升, 柳波, 付晓飞, 赵万春. 2018. 致密碎屑岩储层岩石破裂特征及脆性评价方法. 石油与天然气地质, 39(6): 1270~1279.
- 王胜建, 任收麦, 周志, 吴丽艳, 郭天旭, 刘一珉, 侯啓东. 2020. 鄂西地区震旦系陡山沱组二段页岩气储层测井评价初探. 中国地质, 47(1): 133~143.
- 魏国, 张审琴, 侯淦译. 2015. 岩性扫描测井技术在青海油田的应用. 测井技术, 39(2): 213~216.
- 魏翔宇, 赵延朋, 王璞珺, 魏琴, 陈晓锋, 印长海, 高有峰. 2023. 松辽盆地徐家围子断陷营城组火山地层期次划分及分布规律. 中国石油大学学报(自然科学版), 47(4): 12~23.
- 谢然红, 肖立志, 王忠东, 邓克俊. 2008. 复杂流体储层核磁共振测井孔隙度影响因素. 中国科学(D辑: 地球科学), 38(S1): 191~196.
- 闫学洪, 曹春峰, 王慧. 2018. 岩性扫描测井资料处理解释方法研究与应用. 测井技术, 42(5): 503~508.
- 张益艮, 王贵文, 宋连腾, 包萌, 黄玉越, 赖锦, 王松, 黄立良. 2023. 页岩岩相测井表征方法——以准噶尔盆地玛湖凹陷风城组为例. 地球物理学进展, 38(1): 393~408.
- 赵迪斐, 郭英海, 陈蕾, 秦岩, 屈浩, 旷凌, 王雪莲. 2016. 页岩储层脆性特征及其影响因素探讨. 非常规油气, 3(6): 6~11.
- 朱如凯, 邹才能, 张甯, 王雪松, 程荣, 刘柳红, 周川闽, 宋丽红. 2009. 致密砂岩气藏储层成岩流体演化与致密成因机理——以四川盆地上三叠统须家河组为例. 中国科学(D辑: 地球科学), 39(3): 327~339.
- 邹才能, 陶士振, 周慧, 张响响, 何东博, 周川闽, 王岚, 王雪松, 李富恒, 朱如凯, 罗平, 袁选俊, 徐春春, 杨华. 2008. 成岩相的形成、分类与定量评价方法. 石油勘探与开发, 35(5): 526~540.
- 邹才能, 张国生, 杨智, 陶士振, 侯连华, 朱如凯, 袁选俊, 冉启全, 李登华, 王志平. 2013. 非常规油气概念, 特征, 潜力及技术. 石油勘探与开发, 40(4): 385~399.
- Busch J M, Fortney W G, Berry L N. 1987. Determination of lithology from well logs by statistical analysis. SPE Formation Evaluation, 2(4): 412~418.
- Cao Dongsheng, Zeng Lianbo, Lyu Wenya, Xu Xiang, Tian He. 2021. Progress in brittleness evaluation and prediction methods in unconventional reservoirs. Petroleum Science Bulletin, 6(1): 31~45.
- Charsky A, Herron S. 2013. Accurate, direct total organic carbon (TOC) log from a new advanced geochemical spectroscopy tool: comparison with conventional approaches for TOC estimation. Search and Discovery, 41162(1): 1~17.
- De S, Kumar Vikram V, Sengupta D. 2019. Application of support vector regression analysis to estimate total organic carbon content of Cambay shale in Cambay Basin, India——A case study. Petroleum Science and Technology, 37(10): 1155~1164.
- De S, Sengupta D. 2021. An advanced well log and an effective methodology to evaluate water saturation of the organic-rich Cambay shale. Natural Resources Research, 30(2): 1719~1733.
- Dong Shaoqun, Wang Zhizhang, Zeng Lianbo. 2016. Lithology identification using kernel Fisher discriminant analysis with well

- logs. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 143: 95~102.
- Feng Chong, Wang Qingbin, Tan Zhongjian, Dai Liming, Liu Xiaojian, Zhao Meng. 2019&. Logging classification and identification of complex lithology in volcanoclastic-rich strata—Taking KL16 Oilfield as an example. *Acta Petrolei Sinica*, 40(S2): 91~101.
- Freedman R, Herron S, Anand V, Herron M, May D, Rose D. 2015. New method for determining mineralogy and matrix properties from elemental chemistry measured by gamma ray spectroscopy logging tools. *SPE Reservoir Evaluation & Engineering*, 18(4): 599~608.
- Fu Lianming, Zheng Yihua, Fang Tao, Wang Wei, Wang Yue, Cai Liang. 2022&. Application of new logging technology in continental shale reservoir of Mabei Block. *Well Logging Technology*, 46(3): 319~325.
- Gao Yanwu, Zhao Yanjing, Wu Wei, Zhang Wenjing, Lin Jingqi, An Yinyin. 2021&. Influence of paramagnetic material content on nuclear magnetic porosity of volcanic rocks and its correction: Taking Carboniferous volcanic rocks in Zhongguai uplift of Junggar Basin as an example. *Journal of Yangtze University (Natural Science Edition)*, 18(6): 26~32.
- Gonzalez J, Lewis R, Hemingway J, Grau J, Rylander E, Pirie I. 2013. Determination of formation organic carbon content using a new neutron-induced gamma ray spectroscopy service that directly measures carbon. In: *Unconventional Resources Technology Conference*, Denver, Colorado, 12~14 August 2013, SPWLA-2013-GG.
- Guo Pei, Liu Chiyang, Wang Liqun, Zhang Guoqing, Fu Xiugen. 2019. Mineralogy and organic geochemistry of the terrestrial lacustrine pre-salt sediments in the Qaidam Basin: Implications for good source rock development. *Marine and Petroleum Geology*, 107: 149~162.
- Huan Zhipeng, Hu Jianfeng, Wang Zhimin, Song Jinpeng, Mo Tao, Hao Xiangbao, Tian Panpan, Cui Deyu, Yang Jingbo, Li Haoping, Liu Xinyu, Ping Zhongwei. 2022&. Research and application of the base salt rock discrimination of the Paleogene in Kuqa Depression. *China Petroleum Exploration*, 27(1): 142~150.
- Huang Yuyue, Wang Guiwen, Zhang Yan, Xi Jiahui, Huang Liliang, Wang Song, Zhang Yilin, Lai Jin, Jiang Chengzhou. 2023. Logging evaluation of pore structure and reservoir quality in shale oil reservoir: The Fengcheng Formation in Mahu Sag, Junggar Basin, China. *Marine and Petroleum Geology*, 156: 106454.
- Iqbal O, Ahmad M, Kadir A A. 2018. Effective evaluation of shale gas reservoirs by means of an integrated approach to petrophysics and geomechanics for the optimization of hydraulic fracturing: A case study of the Permian Roseneath and Murteree Shale Gas Reservoirs, Cooper Basin, Australia. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 58: 34~58.
- Jarvie D M, Hill R J, Ruble T E, Pollastro R M. 2007. Unconventional shale-gas systems: The Mississippian Barnett Shale of north—central Texas as one model for thermogenic shale-gas assessment. *AAPG Bulletin*, 91(4): 475~499.
- Jia Chengzao. 2023&. Key scientific and technological problems of petroleum exploration and development in deep and ultra-deep formation. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)*, 47(5): 1~12.
- Lai Jin, Wang Guiwen, Chai Yu, Ran Ye, Zheng Xinhua, Xin Yi, Zhou Lei, Wu Qingkuan. 2015&. Diagenetic sequence stratigraphy characteristics of Lower Cretaceous Bashijiqike Formation in Kuqa depression. *Acta Sedimentologica Sinica*, 33(2): 394~407.
- Lai Jin, Wang Guiwen, Fan Zhuoying, Chen Jing, Wang Shuchen, Zhou Zhenglong, Fan Xuqiang. 2016&. Research progress in brittleness index evaluation methods with logging data in unconventional oil and gas reservoirs. *Petroleum Science Bulletin*, 1(3): 330~341.
- Lai Jin, Wang Guiwen, Chen Jing, Wang Shuchen, Zhou Zhenglong, Fan Xuqiang. 2017. Origin and distribution of carbonate cement in tight sandstones: The Upper Triassic Yanchang Formation Chang 8 oil layer in West Ordos Basin, China. *Geofluids*, 2017: 8681753.
- Lai Jin, Wang Guiwen, Wang Song, Cao Juntao, Li Mei, Pang Xiaojiao, Zhou Zhenglong, Fan Xuqiang, Dai Quanqi, Yang Liu, He Zhibo, Qin Ziqiang. 2018. Review of diagenetic facies in tight sandstones: Diagenesis, diagenetic minerals, and prediction via well logs. *Earth Science Reviews*, 185: 234~258.
- Lai Jin, Wang Guiwen, Pang Xiaojiao, Han Zongyan, Li Dong, Zhao Yidi, Wang Song, Jiang Chengzhou, Li Hongbin, Li Yuhang. 2021&. The past, present and future of well logging geology—To celebrate the publication of second edition of “Well Logging Geology”. *Geological Review*, 67(6): 1804~1828.
- Lai Jin, Wang Guiwen, Fan Qixuan, Pang Xiaojiao, Li Hongbin, Zhao Fei, Li Yuhang, Zhao Xin, Zhao Yidi, Huang Yuyue, Bao Meng, Qin Ziqiang, Wang Qiqi. 2022. Geophysical well-log evaluation in the era of unconventional hydrocarbon resources: A review on current status and prospects. *Surveys in Geophysics*, 43(3): 913~957.
- Lai Jin, Pang Xiaojiao, Zhao Xin, Zhao Yidi, Wang Guiwen, Huang Yuyue, Li Hongbin, Li Yuhang. 2022&. Typical misunderstandings and scientific ideas in well logging geology research. *Natural Gas Industry*, 42(7): 31~44.
- Lai Jin, Li Hongbin, Zhang Mei, Bai Meimei, Zhao Yidi, Fan Qixuan, Pang Xiaojiao, Wang Guiwen. 2023a&. Advances in well logging geology in the era of unconventional hydrocarbon resources. *Journal of Palaeogeography (Chinese Edition)*, 25(5): 1118~1138.
- Lai Jin, Wang Guiwen, Fan Qixuan, Zhao Fei, Zhao Xin, Li Yuhang, Zhao Yidi, Pang Xiaojiao. 2023. Toward the scientific interpretation of geophysical well logs: Typical misunderstandings and countermeasures. *Surveys in Geophysics*, 44(2): 463~494.
- Lai Jin, Xiao Lu, Zhao Xin, Zhao Fei, Li Yuhang, Zhu Shifa, Wang Guiwen, Liu Hongkun. 2023b&. Genesis and logging evaluation of deep to ultra-deep high-quality clastic reservoirs: A case study of the Cretaceous Bashijiqike Formation in Kuqa depression. *Acta Petrolei Sinica*, 44(4): 612~625.
- Lai Jin, Su Yang, Xiao Lu, Zhao Fei, Bai Tianyu, Li Yuhang, Li Hongbin, Huang Yuyue, Wang Guiwen, Qin Ziqiang. 2024. Application of geophysical well logs in solving geologic issues: Past, present and future prospect. *Geoscience Frontiers*, 15: 101779.
- Lai Jin, Bai Tianyu, Su Yang, Zhao Fei, Li Ling, Li Yuhang, Li Hongbin, Wang Guiwen, Xiao Chengwen. 2024&. Researches progress in well log recognition and evaluation of source rocks. *Geological Review*, 70(2): 721~741.
- Lazar O R, Bohacs K M, MacQuaker J H S, Schieber J, Demko T M. 2015. Capturing key attributes of fine-grained sedimentary rocks in outcrops, cores, and thin sections: Nomenclature and description guidelines. *Journal of Sedimentary Research*, 85(3): 230~246.
- Li Hongbin, Wang Guiwen, Wang Song, Pang Xiaojiao, Liu Shichen, Bao Meng, Peng Shouchang, Lai Jin. 2022&. Shale oil lithofacies identification by kohonen neural network method: The case of the Permian Lucaogou Formation in Jimusaer Sag. *Acta Sedimentologica Sinica*, 40(3): 626~640.
- Liu Bo, Wang Haoli, Fu Xiaofei, Bai Yunfeng, Bai Longhui, Jia

- Mengcheng, He Bo. 2019. Lithofacies and depositional setting of a highly prospective lacustrine shale oil succession from the Upper Cretaceous Qingshankou Formation in the Gulong Sag, northern Songliao Basin, Northeast China. *AAPG Bulletin*, 103(2): 405~432.
- Lopes D M R, Andrade A J N. 2019. Lithology identification on well logs by fuzzy inference. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 180: 357~368.
- Lu Xiuxiang, Jin Zhijun, Zhou Xinyuan, Pi Xuejun. 2000. Oil and gas accumulation related to evaporite rocks in Kuqa depression of Tarim Basin. *Petroleum Exploration and Development*, 27(4): 20~21+109~110+118.
- MacQuaker J H S, Adams A E. 2003. Maximizing information from fine-grained sedimentary rocks: An inclusive nomenclature for mudstones. *Journal of Sedimentary Research*, 73(5): 735~744.
- Mews K S, Alhubail M M, Barati R G. 2019. A review of brittleness index correlations for unconventional tight and ultra-tight reservoirs. *Geosciences*, 9(7): 319.
- Pang Xiaojiao, Wang Guiwen, Kuang Lichun, Zhao Fei, Li Hongbin, Han Zongyan, Bai Tianyu, Lai Jin. 2023. Logging evaluation of lithofacies and their assemblage under control of sedimentary environment: A case study of the Qingshankou Formation in Gulong Sag, Songliao Basin. *Journal of Palaeogeography (Chinese Edition)*, 25(5): 1156~1175.
- Passey Q R, Creaney S, Kulla J B, Moretti F J, Stroud J D. 1990. A practical model for organic richness from porosity and resistivity logs. *AAPG Bulletin*, 74:1777~1794.
- Rahimzadeh Kivi I, Ameri M, Molladavoodi H. 2018. Shale brittleness evaluation based on energy balance analysis of stress-strain curves. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 167: 1~19.
- Rickman R, Mullen M, Petre E, Grieser B, Kundert D. 2008. A practical use of shale petrophysics for stimulation design optimization: All shale plays are not clones of the barnett shale. In: *All Days, SPE*, 115258.
- Sêco S L R, Duarte L V, Pereira A J S C, Silva R L. 2018. Field gamma-ray patterns and stratigraphic reinterpretation of offshore well-log data from Lower Jurassic organic-rich units of the Lusitanian Basin (Portugal). *Marine and Petroleum Geology*, 98: 860~872.
- Shi Feizhou, Wang Yanchun, Sun Wei, Fang Yuan. 2016. Analysis on application effect of NMR logging data in igneous rocks in district dixi. *Xinjiang Petroleum Geology*, 37(5): 593~597.
- Wang Chao, Zhang Boqiao, Shu Zhiguo, Lu Yongchao, Lu Yaqiu, Bao Hanyong, Li Zheng, Liu Chao. 2018. Lithofacies types and reservoir characteristics of marine shales of the Wufeng Formation—Longmaxi Formation in Fuling Area, the Sichuan Basin. *Oil & Gas Geology*, 39(3): 485~497.
- Wang Ran, Wu Tao, You Xincui, Zhu Tao, Qian Yongxin, Liu Zhenyu, Wan Min. 2023. Petrographic characteristics and quantitative comprehensive evaluation of shale oil reservoirs in Permian Fengcheng Formation, Mahu Sag. *Acta Petrolei Sinica*, 44(7): 1085~1096.
- Wang Sheng, Liu Bo, Fu Xiaofei, Zhao Wanchun. 2018. Evaluation of the brittleness and fracturing characteristics for tight clastic reservoir. *Oil & Gas Geology*, 39(6): 1270~1279.
- Wang Shengjian, Ren Shoumai, Zhou Zhi, Wu Liyan, Guo Tianxu, Liu Yimin, Hou Qidong. 2020. Discussion on petrophysical evaluation of shale gas reservoir in the second Member of Sinian Doushantuo Formation in Western Hubei Province, South China. *Geology in China*, 47(1): 133~143.
- Wang Song, Wang Guiwen, Huang Liliang, Song Lianteng, Zhang Yilin, Li Dong, Huang Yuyue. 2021. Logging evaluation of lamina structure and reservoir quality in shale oil reservoir of Fengcheng Formation in Mahu Sag, China. *Marine and Petroleum Geology*, 133: 105299.
- Wei Guo, Zhang Shenqin, Hou Songyi. 2015. Application of LithoScanner logging technology in Qinghai oilfield. *Well Logging Technology*, 39(2): 213~216.
- Wei Xiangyu, Zhao Yanpeng, Wang Pujun, Wei Qin, Chen Xiaofeng, Yin Changhai, Gao Youfeng. 2023. Division of volcanic eruption stages and distribution patterns of volcanic rocks in Yingcheng Formation of Xujiaweizi fault depression, Songliao Basin. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)*, 47(4): 12~23.
- Xie Ranhong, Xiao Lizhi, Wang Zhongdong, Deng Kejun. 2008. Influencing factors of porosity of NMR logging in complex fluid reservoirs. *Scientia Sinica (Terrae)*, 38(S1): 191~196.
- Yan Xuehong, Cao Chunfeng, Wang Hui. 2018. Research and application on processing and interpretation of litho scanner logging data. *Well Logging Technology*, 42(5): 503~508.
- Yawar Z, Schieber J. 2017. On the origin of silt laminae in laminated shales. *Sedimentary Geology*, 360: 22~34.
- Zhang Yilin, Wang Guiwen, Song Lianteng, Bao Meng, Huang Yuyue, Lai Jin, Wang Song, Huang Liliang. 2023. Logging identification method of shale lithofacies: A study of Fengcheng Formation in Mahu Sag, Junggar Basin. *Progress in Geophysics*, 38(1): 393~408.
- Zhao Difei, Guo Yinghai, Chen Lei, Qin Yan, Qu Hao, Kuang Ling, Wang Xuelian. 2016. Discussion on brittleness characteristics and influencing factors of shale gas reservoirs. *Unconventional Oil & Gas*, 3(6): 6~11.
- Zhu Rukai, Zou Caineng, Zhang Nai, Wang Xuesong, Cheng Rong, Liu Lihong, Zhou Chuanmin, Song Lihong. 2009. Evolution of diagenetic fluid in tight sandstone gas reservoir and its tight genetic mechanism—Taking Xujiaweizi Formation of Upper Triassic in Sichuan Basin as an example. *Science in China (Series D (Earth Sciences))*, 39(3): 327~339.
- Zou Caineng, Tao Shizhen, Zhou Hui, Zhang Xiangxiang, He Dongbo, Zhou Chuanmin, Wang Lan, Wang Xuesong, Li Fuheng, Zhu Rukai, Luo Ping, Yuan Xuanjun, Xu Chunchun, Yang Hua. 2008. Genesis, classification and evaluation method of diagenetic facies. *Petroleum Exploration and Development*, 35(5): 526~540.
- Zou Caineng, Zhang Guosheng, Yang Zhi, Tao Shizhen, Hou Lianhua, Zhu Rukai, Yuan Xuanjun, Ran Qiquan, Li Denghua, Wang Zhiping. 2013. Conception, Classification and Resource Potential of Unconventional Hydrocarbons. *Natural Gas Geoscience*, 23(3): 393~406.

Interpretation and evaluation methods of Litho-Scanner logging data and its geological application

SU Yang^{1, 2)}, LAI Jin^{1, 2)}, ZHAO Fei²⁾, BIE Kang³⁾, LI Dong²⁾,
HUANG Yuyue²⁾, ZHANG Youpeng⁴⁾, WANG Guiwen^{1, 2)}

1) *National Key Laboratory of Petroleum Resource and Engineering, Beijing, 102249;*

2) *College of Geosciences, China University of Petroleum, Beijing, 102249;*

3) *Research Institute of Petroleum Exploration and Development, Tarim Oilfield Company, CNPC, Korla, Xinjiang, 841000;*

4) *International Branch, China National Logging Cooperation, Beijing, 100101*

Abstract: As a new well logging technology, LithoScanner logs can further obtain the content of minerals in the formation, which can help geologists solve geological problems such as complex lithology identification by obtaining the content of elements in the formation. To fully promote the application of LithoScanner logs in the geological field, this paper reviews the principle and interpretation processing flow of LithoScanner logs and analyzes typical application cases. LithoScanner logs can directly obtain lithology characteristics in the formation, and help identify the formation interface, and lithology and lithofacies in the shale. In addition, brittle mineral content and organic carbon content can be accurately obtained by LithoScanner logging, to calculate the brittleness index and organic carbon content in the formation. LithoScanner logs can detect the components of specific minerals such as pyrite and coal seams, thus assisting in the interpretation and evaluation of NMR logging data. Finally, it is pointed out that LithoScanner logging can be compared with corresponding cores and experimental data to improve the reliability of LithoScanner logs. This paper helps dig dive on and interpret a large amount of geological information contained in LithoScanner logs and eliminates some misunderstandings in applying this data.

Keywords: lithoScanner logs; interpretation and evaluation of geological significance; complicated identification of lithology and lithofacies; brittleness index; *TOC*; diagenesis; nuclear magnetic resonance logging

Acknowledgements: This study is supported by the National Natural Science Foundation of China (Nos. 42002133, 42072150), the Research Fundings of China University of Petroleum (Beijing) (No. 2462023QNXZ010) and the Strategic Cooperation Agreement between CNPC—China University of Petroleum, Beijing) (No. ZLZX2020-01).

First author: SU Yang, female, born in 2002, Ph. D. student, is currently interested in the study of sedimentology, reservoir geology and well-logging geology; Email: suyangcupb@163.com

Corresponding author: LAI Jin, male, born in 1988, Ph. D., associate professor, is currently interested in the study of sedimentology, reservoir geology and well-logging geology; Email: laijin@cup.edu.cn

Manuscript received on: 2024-01-03; Accepted on: 2024-04-02; Published online on: 2024-04-20

Doi: 10.16509/j.georeview.2024.04.041

Edited by: LIU Zhiqiang