

库车坳陷侏罗系克孜勒努尔组深层煤岩 地质特征与含气性测井评价*

夏宗立^{1,2} 李玲^{3,4,5} 赖锦^{1,2} 赵飞^{1,2} 王中瑞^{1,2} 王磊^{1,2}
王斌³ 张亮^{3,4,5} 韩闯³ 王松^{1,6} 王贵文^{1,2}

1 油气资源与工程全国重点实验室, 中国石油大学(北京), 北京 102249

2 中国石油大学(北京)地球科学学院, 北京 102249

3 中国石油天然气集团有限公司超深层复杂油气藏勘探开发技术研发中心, 新疆库尔勒 841000

4 新疆维吾尔自治区超深层复杂油气藏勘探开发工程研究中心, 新疆库尔勒 841000

5 新疆超深油气重点实验室, 新疆库尔勒 841000

6 中国石油大学(北京)地球物理学院, 北京 102249

摘要 库车坳陷于中生代形成广泛分布的含煤岩系, 煤岩厚度较大, 深层煤岩气资源较为丰富。相较于浅层煤层气, 深层煤岩具有地质特征复杂、夹研发育, 且吸附气与游离气同时存在的特点, 导致煤岩含气量缺乏有效的测井评价方法。本研究以库车坳陷侏罗系克孜勒努尔组为例, 基于研究区深层煤岩岩心观察、常规测井、成像测井及核磁共振测井, 开展了深层煤岩地质特征以及煤岩含气性评价的研究。库车坳陷侏罗系深层煤岩具有典型的低 GR、低 DEN、高 RT、高 CNC、高 DT 特征, 且在成像测井上呈现为亮块状、亮斑状特点。研究区克孜勒努尔组煤岩宏观煤岩类型以半光亮—半暗型煤为主, 属中固定碳、高挥发分、中低灰分、特低水分煤。克四段 2# 和 3# 煤为主力煤层, 其厚度平均为 4.5 m 和 6.2 m, 平均埋深大于 4000 m。深层煤岩煤体结构依据成像测井划分, 以原生结构为主; 根据实验测试数据与测井响应参数间的相关性构建研究区深层煤岩组分和含气量测井评价模型, 煤岩测井计算总含气量在 5.95~10.95 m³/t 之间, 平均值为 9.5 m³/t, 吸附气含量平均为 7.12 m³/t, 游离气含量平均为 2.38 m³/t。结合核磁共振测井获得的 T₁-T₂ 交会图开展煤岩含气性分析表明, 深层煤岩在电阻率值较高、固定碳含量较高且结构相对稳定的层段具有较好的含气性。基于煤层识别、显微组分、工业组分和含气量计算, 形成了常规—成像—二维核磁联合评价深层煤岩气的方法, 为深层煤岩气的评估和计算提供支撑。

关键词 深层煤岩气 测井评价 含气性 克孜勒努尔组 库车坳陷

第一作者简介 夏宗立, 男, 2000 年生, 中国石油大学(北京)博士研究生, 从事沉积学、储层地质学与测井地质学研究。E-mail: zhongxiashiba@outlook.com。

通讯作者简介 赖锦, 男, 1988 年生, 副教授, 博士生导师, 从事沉积学、储层地质学与测井地质学方面的教学与科研工作。E-mail: laijin@cup.edu.cn。

中图分类号: P618.11; P631.8 文献标志码: A

Geological characteristics and logging evaluation of gas-bearing property

* 国家科技重大专项(编号: 2025ZD1400307), 中国石油天然气集团有限公司科技资助项目(编号: 2023ZZ14YJ02, 2022KT0201), 中国石油大学(北京)优秀青年学者启动基金项目(编号: 2462023QNXZ010)联合资助。[Co-funded by the National Science and Technology Major Project of China (No. 2025ZD1400307), the Science Foundation of China National Petroleum Corporation (Nos. 2023ZZ14YJ02, 2022KT0201), and the Science Foundation of Outstanding Young Scholars at China University of Petroleum (Beijing) (No. 2462023QNXZ010)]

收稿日期: 2025-07-21 改回日期: 2025-10-21

of the Jurassic Kezilenuer Formation deep coal rocks in Kuqa depression

XIA Zongli^{1,2} LI Ling^{3,4,5} LAI Jin^{1,2} ZHAO Fei^{1,2} WANG Zhongrui^{1,2} WANG Lei^{1,2}
WANG Bin³ ZHANG Liang^{3,4,5} HAN Chuang³ WANG Song^{1,6} WANG Guiwen^{1,2}

1 State Key Laboratory of Petroleum Resource and Engineering, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China

2 College of Geosciences, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China

3 R & D Center for Ultra-deep Complex Reservoir Exploration and Development, CNPC, Xinjiang Korla 841000, China

4 Engineering Research Center for Ultra-deep Complex Reservoir Exploration and Development, Xinjiang Uygur Autonomous Region, Xinjiang Korla 841000, China

5 Xinjiang Key Laboratory of Ultra-deep Oil and Gas, Xinjiang Korla 841000, China

6 College of Geophysics, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China

Abstract The Kuqa Depression hosts extensively distributed Mesozoic coal-bearing strata, characterized by substantial coal seam thickness and relatively abundant deep coalbed methane (CBM) resources. This study focuses on the Jurassic Kezilenuer Formation coal-bearing strata of the Kuqa Depression. Relative to shallow CBM reservoirs, deep coal seams exhibit markedly complex geological characteristics—including well-developed partings, heterogeneous coal matrix structure, and coexistence of adsorbed and free gas phases—posing significant challenges for reliable logging-based gas content evaluation. Integrating core observations from deep coal intervals in the study area with conventional logging, borehole imaging, and nuclear magnetic resonance (NMR) logging data, this work systematically investigates the geological characteristics of deep coal rocks and develops a robust methodology for quantifying their gas content. Deep Jurassic coal rocks in the Kuqa Depression consistently display low natural gamma radiation, low bulk density, high electrical resistivity, high neutron porosity, and large acoustic transit time—distinctive petrophysical signatures corroborated by imaging logs, which reveal bright blocky and speckled textures. Macroscopically, coal seams of the Kezilenuer Formation are predominantly semi-bright to semi-dull, classified as medium-fixed-carbon, high-volatile, medium-low-ash, and ultra-low-moisture coals. Coal seams No. 2 and No. 3 within Member 4 of the Kezilenuer Formation represent the principal target intervals, with average thicknesses of 4.5 m and 6.2 m, respectively, and mean burial depths exceeding 4000 m. Imaging log analysis indicates that these deep coal rocks largely retain primary (undisturbed) structural integrity. Leveraging empirical correlations established between laboratory-measured gas composition/contents and corresponding logging response parameters, a region-specific logging evaluation model was developed for estimating both compositional parameters and total gas content in deep coal rocks. Calculated total gas contents range from 5.95 to 10.95 m³/t (mean: 9.5 m³/t), comprising an average adsorbed gas content of 7.12 m³/t and an average free gas content of 2.38 m³/t. Complementary analysis using the T_1 - T_2 cross-plot derived from NMR logging further reveals that higher gas content is preferentially associated with intervals exhibiting elevated resistivity, higher fixed carbon content, and structurally stable coal matrices. Synthesizing coal seam identification, maceral and industrial component analyses, and quantitative gas content estimation, this study establishes an integrated evaluation framework—combining conventional logs, borehole imaging, and 2D NMR logging—for jointly assessing deep coalbed methane and shale gas potential, thereby supporting resource assessment, reserve estimation, and exploration decision-making.

Key words deep coal-rock gas, logging evaluation, gas-bearing property, Kezilenuer Formation,

Kuqa Depression

About the first author XIA Zongli, born in 2000, a Ph.D. candidate at China university of Petroleum (Beijing), is engaged in sedimentology, reservoir geology and well logging geology. E-mail: zhongxiashiba@outlook.com.

About the corresponding author LAI Jin, born in 1988, Ph.D., an associate professor, doctoral supervisor at China university of Petroleum (Beijing), is mainly engaged in sedimentology, reservoir geology and well logging geology. E-mail: laijin@cup.edu.cn.

0 引言

中国地域辽阔,大型含煤盆地较发育,煤层气资源富集,具有煤层厚度大、分布范围广、多期成煤等特点,已经经历了长时间的勘探开发(戴金星等,2001;李国欣等,2022)。近年来,由于对煤层气地质认识的不断加深和勘探技术的快速发展,中国深层煤岩气(埋深大于2000 m)的勘探相继在准噶尔盆地、沁水盆地和鄂尔多斯盆地等取得重要突破,拉开了深层煤岩气勘探开发的序幕(Li *et al.*, 2016, 2024; Niu *et al.*, 2024; 李国欣等, 2025)。2020年,准噶尔盆地侏罗系彩探1H井试气获得最高日产 $5.7 \times 10^4 \text{ m}^3$ 的工业气流,实现了煤岩气勘探的重大发现(郭绪杰等,2021)。位于鄂尔多斯盆地煤岩埋深达2100 m的JS6-7P01井于2019年获日产工业气达 $10.1 \times 10^4 \text{ m}^3$,打破了中国深层煤岩气勘探开发的限制,具有里程碑意义(徐凤银等,2023)。据统计,中国深层煤岩气资源量达 $50 \times 10^{12} \text{ m}^3$,勘探开发前景广阔(白雪峰等,2024)。

相较于中浅层煤层气(埋深小于2000 m),深层煤岩气具有煤层厚度大、割理与裂隙发育、煤体结构稳定、夹矸层发育等特点(何发岐和董昭雄,2022;周德华等,2022)。同时,深层煤岩呈现“游离气与吸附气共存、自源气与他源气聚集”等地质特点(白雪峰等,2024;蒲秀刚等,2024),且具有高电阻率(RT)、低自然伽马(GR)的测井响应特征。以往研究表明煤层含气性的评价通常以吸附气为主,而深层煤岩中游离气的含量也颇为关键(聂志宏等,2022;石玉江等,2024;Zhao *et al.*, 2024)。研究区深层煤岩吸附气与游离气同时存在,目前煤岩品质和煤岩含气量计算缺乏有效的测井评价方法。研究表明,常规测井、成像测井与元素俘获测井等资料可以分析煤岩煤质品质,而核磁共振测井等则可以实现含气性定性分析与定量计算(苏洋等,2024;张亮等,2025;Zhao *et al.*,

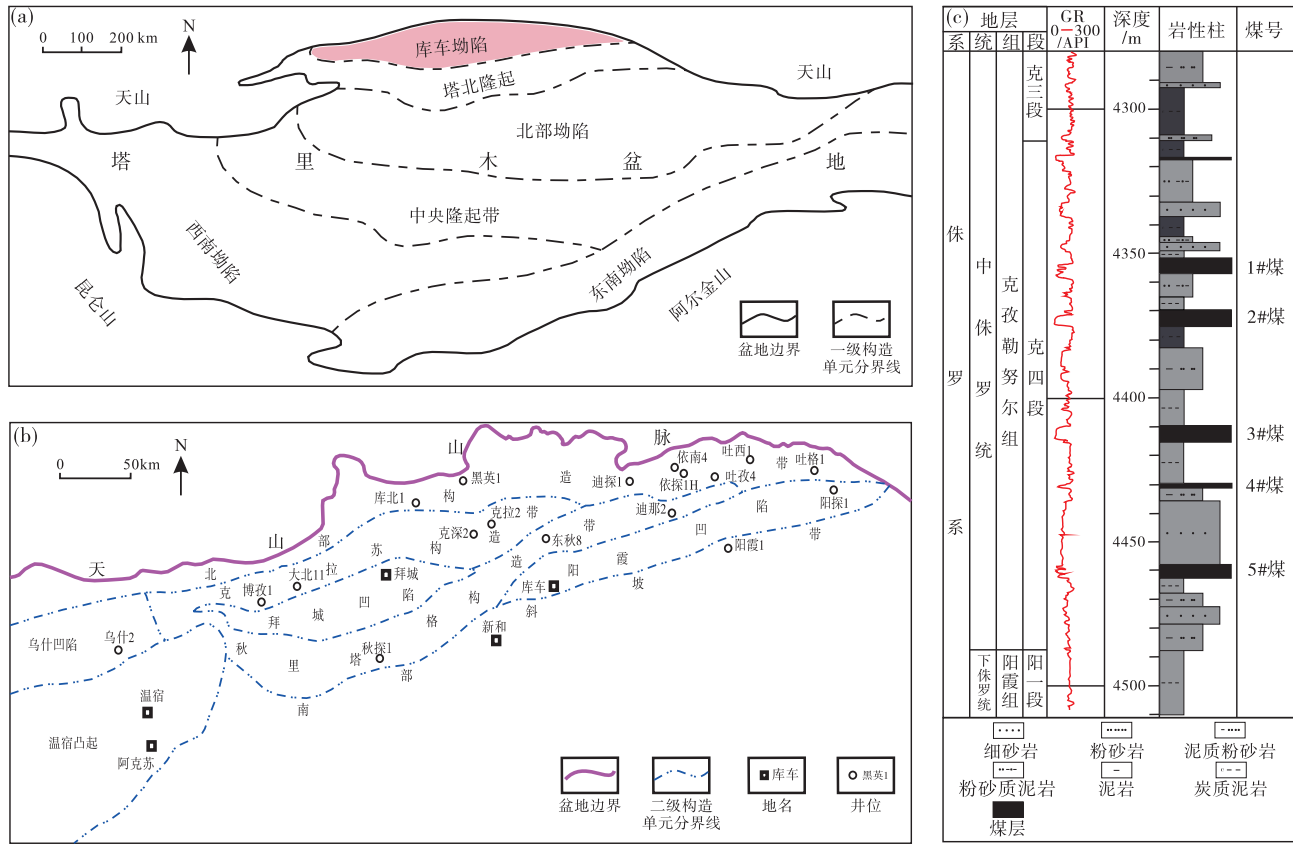
2025a;赖锦等,2025,2026;王斌等,2026)。

本研究以研究区深层煤岩地质特征为背景,将煤岩测井响应参数与实测数据结合,通过对煤岩组分和煤体结构等特征的研究,完成了深层煤岩含气性的测井评价,形成利用深层煤岩常规测井响应参数进行含气量预测的方法。此外探索了利用常规—成像—核磁共振测井联合评价深层煤岩含气性的新方法,为深层煤岩含气量的计算以及煤岩含气性的评价提供了新路径。

1 地质背景

位于塔里木盆地最北缘的库车坳陷是中国典型的再生前陆盆地,是在古生代褶皱的基础上,经历了晚二叠世—早三叠世前陆盆地发育阶段、侏罗纪—古近纪伸展拗陷发育阶段以及新近纪—第四纪再生前陆盆地发育阶段(图1)(Graham *et al.*, 1993;何登发等,2009;苏洋等,2025)。库车坳陷于中生代形成广泛分布的含煤岩系,自下而上发育三叠系塔里奇克组、侏罗系阳霞组和克孜勒努尔组,3套煤层总面积约 $3 \times 10^4 \text{ km}^2$,具备深层煤岩气勘探开发基础(贾承造等,2012;郭泽清等,2025;张亮等,2025;王斌等,2026)。

库车坳陷侏罗系煤岩以半光亮—半暗型煤为主,煤体结构多呈块状,煤岩成层性较好、密度低、层理及割理发育(图2)。岩心观察到煤岩断口处呈现阶梯状,具有金属光泽或玻璃光泽,且煤体较为疏松。样品扫描电镜观察表明,煤岩显微组分以镜质组为主,在均质镜质体和基质镜质体中出现少量孔隙,部分镜质体腔被高岭石与石盐充填,降低了储集层孔隙的连通性。其次为惰质组,其中丝质体细胞结构保存完好,发育大量纤维状丝质体晶间孔。侏罗系克孜勒努尔组纵向上分为4段,其中库车坳陷东部地区顶部地层缺失,以底部克四段最为发育;克四段沉积时期以小河道、大湿地沉积环



a, b—塔里木盆地库车坳陷位置；c—库车坳陷侏罗系克孜勒努尔组四段地层柱状图

图 1 库车坳陷构造划分及克孜勒努尔组四段地层柱状图 (据赵亚汶等 2025; Zhao et al., 2025b; 有修改)

Fig. 1 Structural division of Kuqa Depression and stratigraphic column of the Member 4 of Kezilenuer Formation (modified from Zhao et al., 2025; Zhao et al., 2025b)

境为主，煤层最为发育（智凤琴等，2023）。克四段地层较厚，旋回相对稳定的 2#和 3#煤为主力煤层，其厚度平均为 4.5 m 和 6.2 m；埋深大于 4000 m；有机质成熟度 R_o 平均值为 0.772%，属中低阶煤（郭泽清等，2025）。

2 研究材料与方法

基于研究区测井数据、煤岩岩心观察、宏观煤岩类型划分，在 YT1 井 1#煤层、2#煤层和 5#煤层采集了全煤样品，其中 YT1 井 2#煤层为煤岩岩屑。

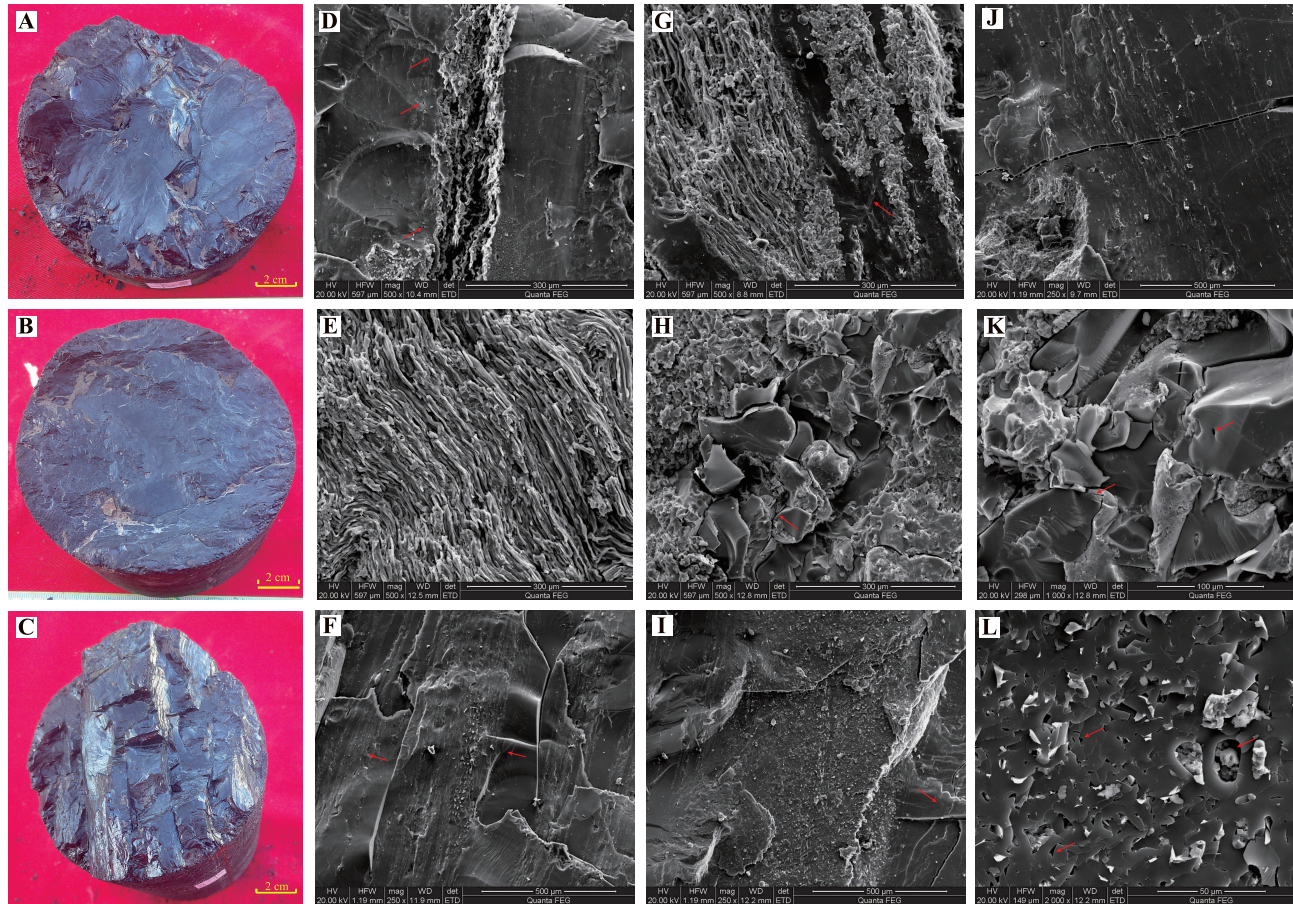
研究方法如下：(1) 镜质体反射率 (R_o) 测定：将采集的煤岩样品制成光片，应用分光光度计测量煤岩的镜质体反射率，按照行业标准《沉积岩中镜质体反射率测定方法》(SY/T 5124—2012) 执行。(2) 扫描电镜：应用场发射扫描电镜对煤岩样品进行观测，按照国家标准《微米级长度的扫描电镜测量方法通则》(GB/T 16594—2008) 执行。

(3) 煤岩显微组分测定：将采集的煤岩样品制成镜下薄片，测定煤岩中镜质组、壳质组、惰质组和所含矿物的含量占比，使用显微镜进行观察，参考《中国煤岩学》和《含煤岩系沉积岩标准鉴定手册》中的分类方案（韩德馨，1996）。(4) 煤岩工业分析：使用马弗炉，测定挥发分、灰分、固定碳和水分的含量，按照国家标准《煤的工业分析方法》(GB/T30732—2014) 执行。(5) 煤岩等温吸附/解吸实验：等温吸附实验是表征煤吸附气体能力的主要方法，本次对不同煤岩类型样品开展甲烷等温吸附/解吸实验，遵照 GB/T 19560—2008《煤的高压等温吸附试验方法》执行(马东民等，2012)。

3 结果与讨论

3.1 煤岩品质测井评价

煤岩品质的评价在煤岩气的勘探和开发中具有



A—YT1H 井，克孜勒努尔组四段， $1\frac{8}{30}$ ，约 4352.5 m，半亮煤，新鲜断面光泽强，平坦状断口；B—YT1H 井，克孜勒努尔组四段， $1\frac{7}{30}$ ，约 4352.00 m，半暗煤，新鲜断面参差状断口；C—YT1 井，克孜勒努尔组四段， $1\frac{2}{30}$ ，约 4354.60 m，半亮煤，新鲜断面参差状断口，割理发育；D—YT1H 井，克孜勒努尔组，约 4352.46 m，YT1H-CG-1-1，均质、基质镜质体和丝质体间层，丝质体有的呈碎块状，存在静压裂隙及原生孔；E—YT1H 井，克孜勒努尔组，约 4353.87 m，YT1H-CG-1-3，丝质体及残留纵向纤维结构；F—YT1H 井，克孜勒努尔组，约 4459.90 m，YT1H-CG-2-1，均质、基质和结构镜质体间层，存在裂隙和层理；G—YT1H 井，克孜勒努尔组，约 4352.46 m，YT1H-CG-1-1，镜质体、丝质体和矿物质间层，存在短裂隙；H—YT1H 井，克孜勒努尔组，约 4353.87 m，YT1H-CG-1-3，块状、团块状镜质体，原生孔缝；I—YT1H 井，克孜勒努尔组，约 4459.90 m，YT1H-CG-2-1，均质、基质和结构镜质体间层，存在静压裂隙；J—YT1H 井，克孜勒努尔组，约 4352.46 m，YT1H-CG-1-1，均质、基质镜质体间发育的裂隙；K—YT1H 井，克孜勒努尔组，约 4353.87 m，YT1H-CG-1-3，块状镜质体与片状黏土矿物，存在原生孔缝，偶见气孔；L—YT1H 井，克孜勒努尔组，约 4459.90 m，YT1H-CG-2-1，残留变形胞腔孔，部分被高岭石、石盐充填

图 2 库车坳陷侏罗系深层煤岩特征

Fig. 2 Characteristics of the Jurassic deep coal rocks in Kuqa Depression

重要的意义，它不仅能提升勘探的效果，还可以为开发部署和规划提供关键的基础数据。煤岩品质的评价包括煤岩识别、煤岩组分特征评价以及煤体结构的评价。利用测井方法可以获得多条煤岩响应测井曲线，结合相关实验数据可以对煤岩品质进行纵向连续且较为准确的评价。

3.1.1 煤岩测井响应特征及识别

目前，9 条常规测井曲线主要用于识别煤和评价储集层物性等 (Liu and Zhao, 2016; Lai *et al.*,

2024a; 赖锦等, 2025a); 而包括成像测井、元素扫描测井和核磁共振测井在内的新技术测井在识别煤层夹矸和煤体结构、表征孔隙类型、评价煤岩及顶底板裂隙发育情况、煤岩含气及含水性评价等方面具有显著优势 (Hou *et al.*, 2014; 侯振学, 2018; Lai *et al.*, 2018, 2022; 徐光波等, 2018; Su *et al.*, 2024; 苏洋等, 2024; 赖锦等, 2025b)。

在钻井过程中，由于本身较脆的特征，煤岩容易发生崩落垮塌，因此在井径曲线 (CAL) 上煤层

常出现扩径现象。但煤层段在井径曲线和自然电位 (SP) 曲线上未发现能够有效区别于其他岩性的测井响应特征, 因而无法直接通过其准确识别出煤层。由于受到沉积环境的影响, 煤岩独特的成分使得其电阻率 (RT)、声波时差 (DT)、自然伽马 (GR)、密度 (DEN) 和中子孔隙度 (CNC) 等测井曲线具有明显区别于其他岩性的响应特征 (Tang, 2017), 为了避免单一测井响应易受到泥浆侵入、岩石固体颗粒压实程度、气层等影响, 因此可以综合多参数分析从而准确识别出煤层 (朱建伟等, 2012; Liu and Zhao, 2016; 赖锦等, 2024a) (图 3)。

利用常规测井、成像测井及元素扫描测井综合分析可准确识别出煤层及煤层夹矸, 从而测得煤层有效厚度 (Lai *et al.*, 2017; Zhang *et al.*, 2023; 苏洋等, 2024; 赖锦等, 2024b) (图 3)。核磁共振测井能够评价煤岩含气性特征, 同时也是评价煤岩顶底板裂缝发育和孔隙结构特征等的有效方法

(赖锦等, 2021; 石玉江等, 2024)。

库车坳陷侏罗系典型煤层在常规测井上表现为“三高两低”的特点: 即低伽马 (GR<60 API)、低密度 (DEN<2.0 g/cm³)、高电阻率 (RT>50 Ω·m), 高中子 (CNC>40%)、高声波时差 (DT>110 μs/ft), 在伽马能谱曲线上表现为铀 (U)、钍 (Th) 和钾 (K) 值略微降低; 在成像测井上显示为指示高阻的特征的亮块状、亮斑状模式, 同时可见裂缝; 煤层中发育的夹矸在成像上呈暗色层状; 同时, 元素测井能进一步指示夹矸成分 (张亮等, 2025; Zhao *et al.*, 2025b; 王斌等, 2026)。

3.1.2 煤岩组分

1) 煤岩显微组分。煤岩显微组分是能在光学显微镜下可使用肉眼观察识别到的成分, 主要由植物组织和器官的遗骸构成 (牛小兵等, 2024; 石玉江等, 2024)。煤岩生烃潜力受显微组分中各组分的占比所影响, 是反映煤岩含气量的重要指标 (朱志良和高小明, 2022)。结合测井响应参数与

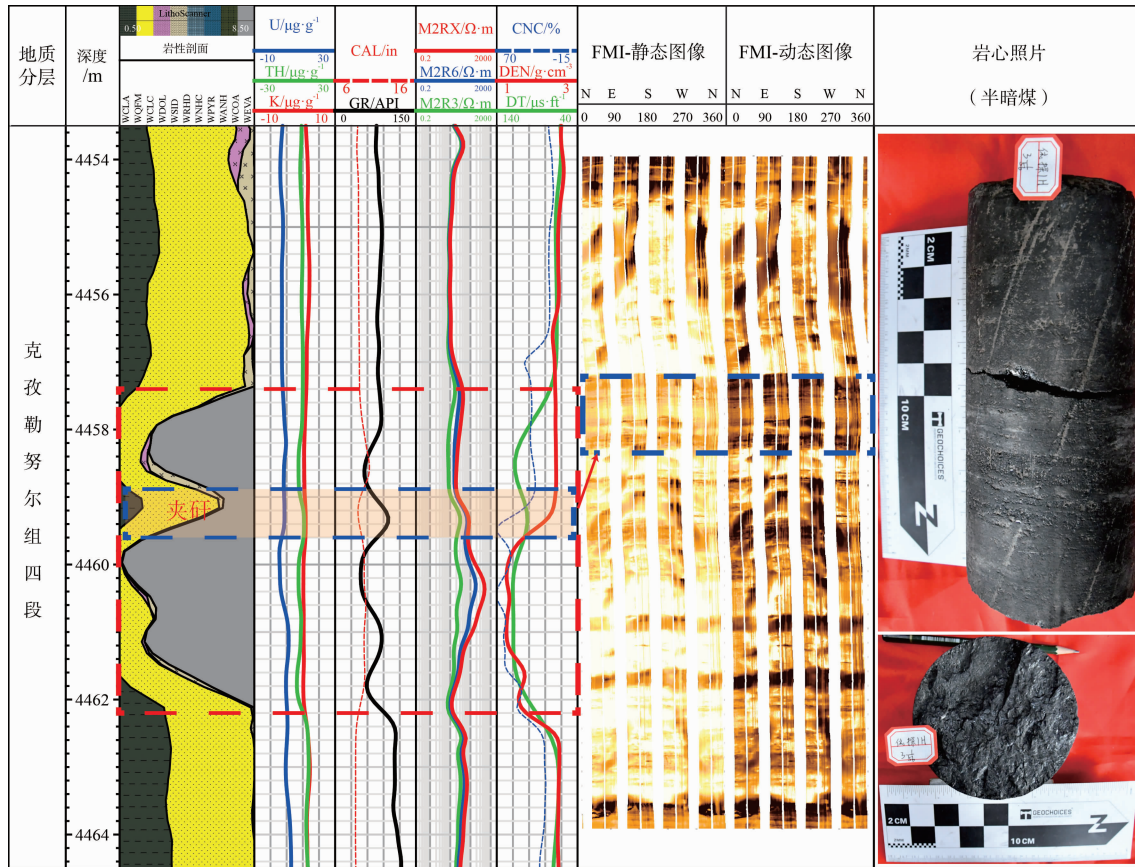


图 3 库车坳陷 YT1H 井侏罗系克孜勒努尔组 5#煤常规—成像—岩性扫描测井响应

Fig. 3 Conventional-image log-lithoScanner log responses of coal seam No. 5 of the Jurassic Kezilenuer Formation in Well YT1H in Kuqa Depression

样品实测数据来评价煤岩层段显微组分特征，有助于后期进行含气量评价。

库车坳陷侏罗系煤岩样品显微组分包括镜质组、惰质组和壳质组。其中镜质组占比最高，平均占 55.68%，可见裂隙；其次为惰质组，平均含量为 33.97%，而丝质体胞腔结构变形较为严重；壳质组的平均含量为 8.11%。同时煤岩中还能观察到黄铁矿、高岭石和石盐等无机矿物。通过显微组分与测井数据交会分析发现，各组分与钍（Th）测井曲线相关性最好，其中镜质组和壳质组含量随 Th 含量增大而增大，惰质组则相反。建立以下研究区深层煤岩显微组分测井计算公式（表 1）。

表 1 库车坳陷侏罗系煤岩显微组分计算公式

Table 1 Calculation formulas of the Jurassic coal maceral in Kuqa Depression

公式	R^2
镜质组 = $9.184 \times Th + 19.21$	0.8602
惰质组 = $-10.142 \times Th + 78.734$	0.8986
壳质组 = $0.4653 \times Th + 1.7735$	0.5902

2) 煤岩工业组分。本研究对库车坳陷侏罗系煤层所采集的样品完成工业组分实验分析，深层煤岩中固定碳（FCad）平均含量为 60.98%，挥发分（Vdaf）平均含量为 31.88%，灰分（Aad）平均含量为 8.98%，水分（Mad）平均含量为 1.65%，属于中固定碳、高挥发分、中低灰分、特低水分煤（Zhao *et al.*, 2025b）。

通过对侏罗系深层煤岩样品的实测数据和测井响应参数的分析，发现固定碳含量与密度测井值以及电阻率测井值的相关性最好；前者具有较好负相关性，复相关系数 R^2 为 0.5993，后者具有较好正相关性，复相关系数 R^2 为 0.4197。同时，不同工业组分间的相关性也很高，其中固定碳与灰分及挥发分具有较好的负相关性（固定碳与灰分 R^2 达 0.9302，固定碳与挥发分 R^2 达 0.6574）（图 4）。

因此，通过建立以密度（DEN）和电阻率（RT）测井值为自变量、实测固定碳（FCad）数据为因变量的多元回归计算模型。再建立以固定碳为自变量、灰分（Aad）和挥发分（Vdaf）为因变量的拟合公式，分别计算出固定碳、灰分和挥发分的含量。最后水分（Mad）的含量可利用工业组分（总和 100%）减去拟合公式计算的其他组分含量

得到，进而实现利用常规测井进行煤岩工业组分的计算（表 2）。

图 5 为侏罗系深层煤岩采用上述模型计算的显微组分和工业组分含量与实测数据的对比图，可知通过测井响应参数计算的煤岩组分与实测数据匹配度较高。图 4 中通过模型预测的固定碳含量与实测固定碳含量关系图同样可以说明该计算模型具有较高准确度。

3.1.3 煤体结构特征

煤体结构是在应力作用下煤岩储集层变形的结果，是影响煤层含气量和产气量的关键因素。表现为构造变形使得煤体在微观上的孔隙裂缝分布、渗流能力和煤层气扩散能力发生变化，增强了煤岩储集层非均质性，导致煤层气开发难度的增加（李存磊等，2020）。

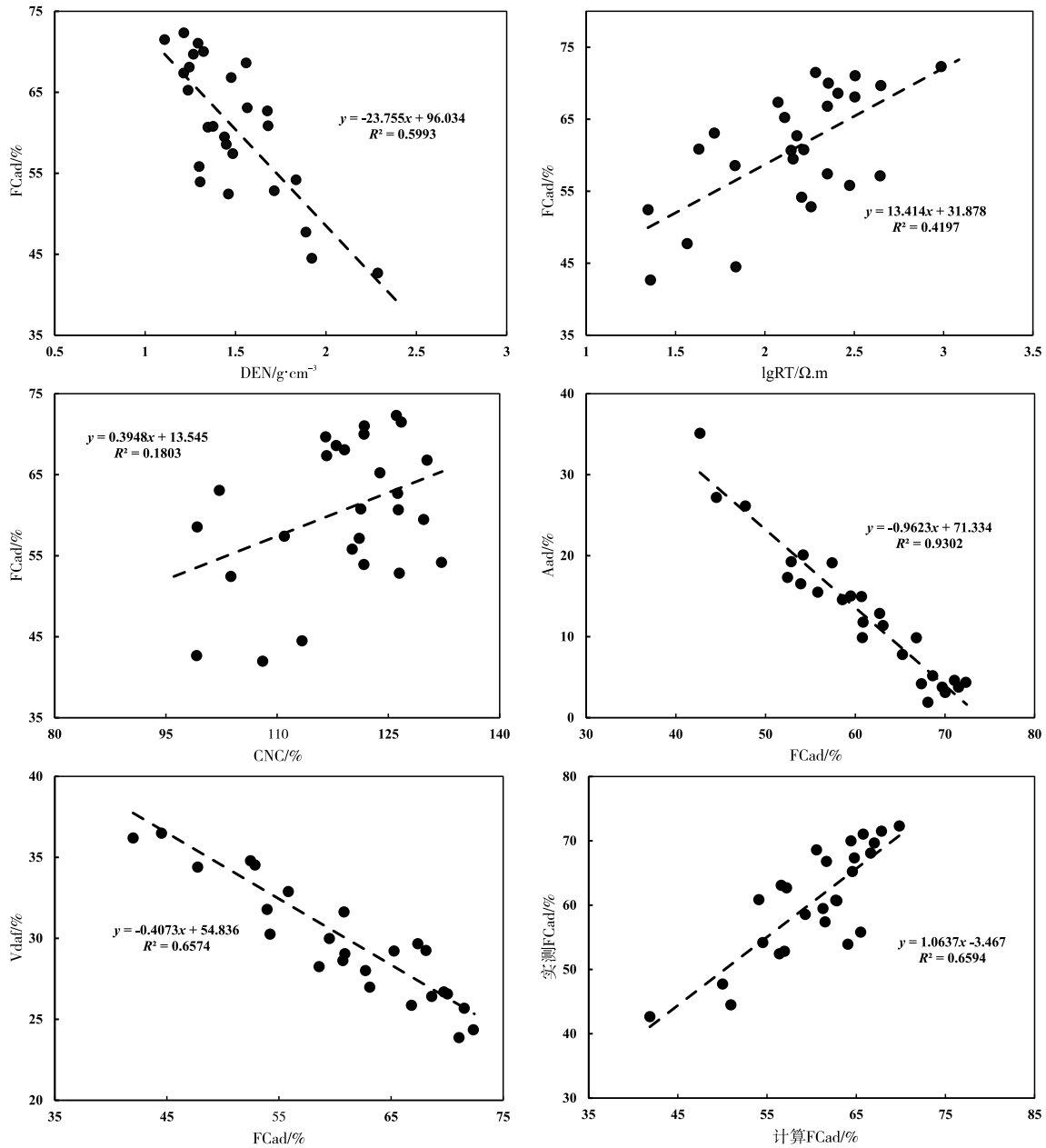
除常规测井曲线，张莉莉和蔡文渊（2009）利用电成像测井揭示了不同煤层的煤体结构特征，赵毅等（2011）认为在井眼条件较好前提下，成像测井在识别煤岩的煤体结构特征上有较大优势。本研究以研究区煤岩岩心资料为基础，结合成像测井资料将煤体结构划分为原生结构煤和构造煤，其中原生结构煤分为块状、层状和层状—块状结构（图 6），而构造煤分为碎裂、碎粒和糜棱结构（图 7）。通过岩心及成像测井资料分析认为，侏罗系克孜勒努尔组深层煤岩煤体结构主要以原生结构为主（张亮等，2025；Zhao *et al.*, 2025b；王斌等，2026）。

3.2 含气性测井评价

煤岩含气量是指在标准温压条件下，单位质量的煤中赋存的甲烷的体积，其单位通常为 m^3/t 或 cm^3/g （石玉江等，2024）。煤岩含气量的组成包括吸附气量、游离气量和溶解气量 3 部分。以吸附气为主的高阶煤在计算含气量时，仅需考虑吸附气的含量，而中低阶煤由于孔隙结构存在差异则需考虑游离气的含量（杨兆彪等，2024）。同时，在不同温度和压力的条件下，深层和浅层煤岩中吸附气和游离气的占比也有明显差异。研究区深层煤岩属中低阶煤，因此进行煤岩含气量的评价时，也需要考虑游离气的含量。

3.2.1 总含气量计算

煤层含气量是确定某一区域内该类资源是否可



FCad—固定碳含量,%; Aaad—灰分含量,%; Vdaf—挥发分含量,%; DEN—密度测井值, g/cm^3 ; CNC—中子测井值,%; RT—电阻率测井值, $\Omega \cdot m$

图 4 库车坳陷侏罗系克孜勒努尔组煤岩工业组分间的相关关系

Fig. 4 Correlations between coal industrial components of the Jurassic Kezilenuer Formation in Kuqa Depression

表 2 库车坳陷侏罗系煤岩工业组分计算公式

Table 2 Calculation formulas of the Jurassic coal industrial component in Kuqa Depression

工业组分	拟合公式	R^2
固定碳	$FCad = 5.5386 \times lgRT - 17.6842 \times DEN + 74.7583$	0.6213
挥发分	$Vdaf = -0.4073 \times FCad + 54.836$	0.6574
灰分	$Aaad = -0.9623 \times FCad + 71.334$	0.9302
水分	$Mad = 1 - Aaad - Vdaf - FCad$	-

以进行商业化开采的前提条件,同时也是资源评价和前景预测的关键参数(连承波等,2005)。由于不同类型煤的工业组分、显微组分、煤体结构和生气量等均存在明显差异,可分析 CNC、DEN、GR 和 RT 等测井曲线与煤岩含气量之间的相关关系(图 8),优选出相关性较好的测井参数来建立多元回归计算模型,实现深层煤岩含气量计算;利用库车坳陷侏罗系深层煤岩测井响应参数及煤岩保压取心实测含气量数据,建立吨煤含气量与煤岩 CNC

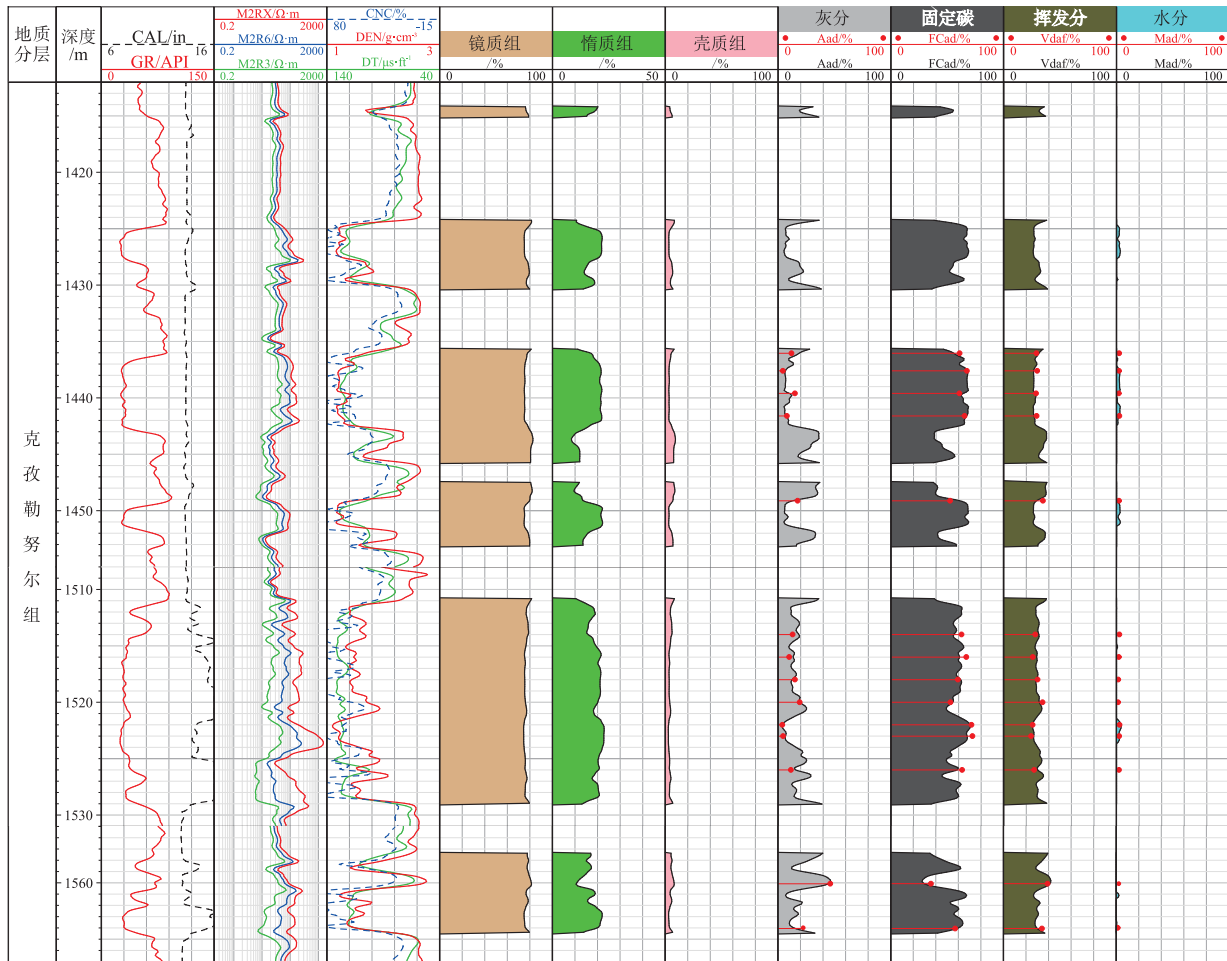


图 5 煤岩工业组分与显微组分预测 (DT1H 井)

Fig. 5 Prediction of coal industrial components and coal macerals (Well DT1H)

和 RT 测井参数计算模型 (式 1)。

$$V_g = 3.0527 + 4.5031 \times \lg RT - 0.0677 \times CNC \quad (1)$$

式中, V_g —总含气量, m^3/t 。

从图 7 中可以看出, 上述模型计算的煤岩总含气量与实验分析吻合度较好 (R^2 达 0.7326)。

3.2.2 吸附气与游离气含量计算

1) 吸附气。理论上煤岩的最大吸附气含量可以通过兰格缪尔公式计算(式 2)。兰氏压力和兰氏体积则利用上述建立的多元回归计算模型进行预测计算。同时地层压力由 Eaton 法计算所得(式 3)。

吸附气含量:

$$V_a = \frac{P \times V_L}{P + P_L} \quad (2)$$

式中, V_a 为吸附气含量, m^3/t ; V_L 为兰氏体积, m^3/t ; P 为地层压力, MPa; P_L 为兰氏压力, MPa。

孔隙压力 P_p :

$$P_p = P_o - (P_o - P_{pn}) \cdot \alpha \cdot \left(\frac{\Delta t_n}{\Delta t_0} \right)^n \quad (3)$$

式中, Δt 为测井实际测量值, $\mu s/ft$; Δt_0 为计算点泥岩对应的声波时差测井值, $\mu s/ft$; Δt_n 为计算点泥岩对应的正常趋势线的声波时差测井值, $\mu s/ft$; P_o 为地层上覆岩石压力; P_{pn} 为正常压实孔隙压力, MPa; α 为 Eaton 系数; n 为 Eaton 指数。

通过分析煤岩测井响应参数与等温吸附实验所得兰氏体积 (V_L)、兰氏压力 (P_L) 间的相关性 (图 9), 最终优选与兰氏体积相关性最好的密度和电阻率测井数据为自变量, 与兰氏压力相关性最好的声波时差和电阻率测井数据为自变量; 以实测兰氏体积和兰氏压力数据为因变量, 建立拟合公式进行兰氏体积和兰氏压力的预测计算 (表 3)。

2) 游离气。深层煤岩游离气含量计算公式为 (式 4):

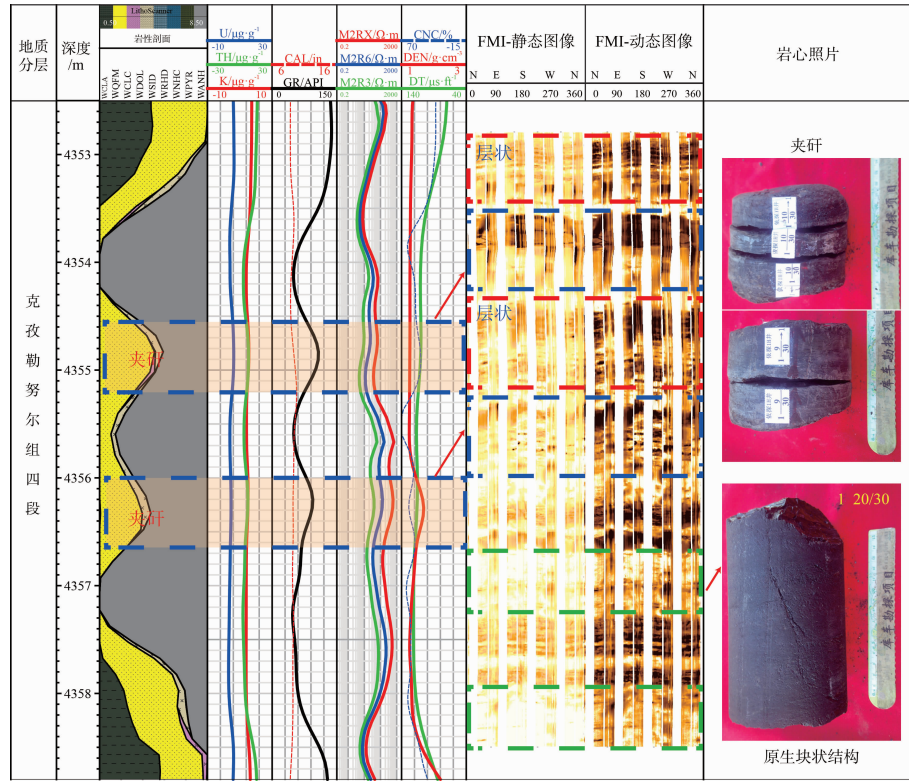


图 6 煤体结构测井识别图版 (原生结构煤)

Fig. 6 Logging identification plate of coal structures (Primary structure coal)

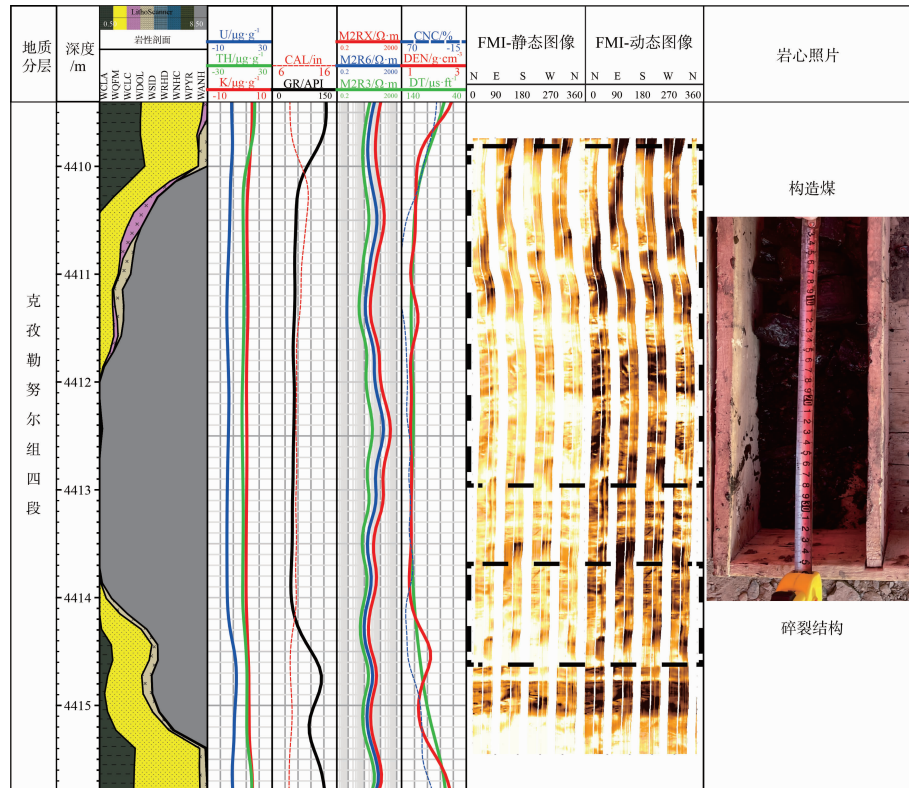


图 7 煤体结构测井识别图版 (构造煤)

Fig. 7 Logging identification plate of coal structures (Tectonic coal)

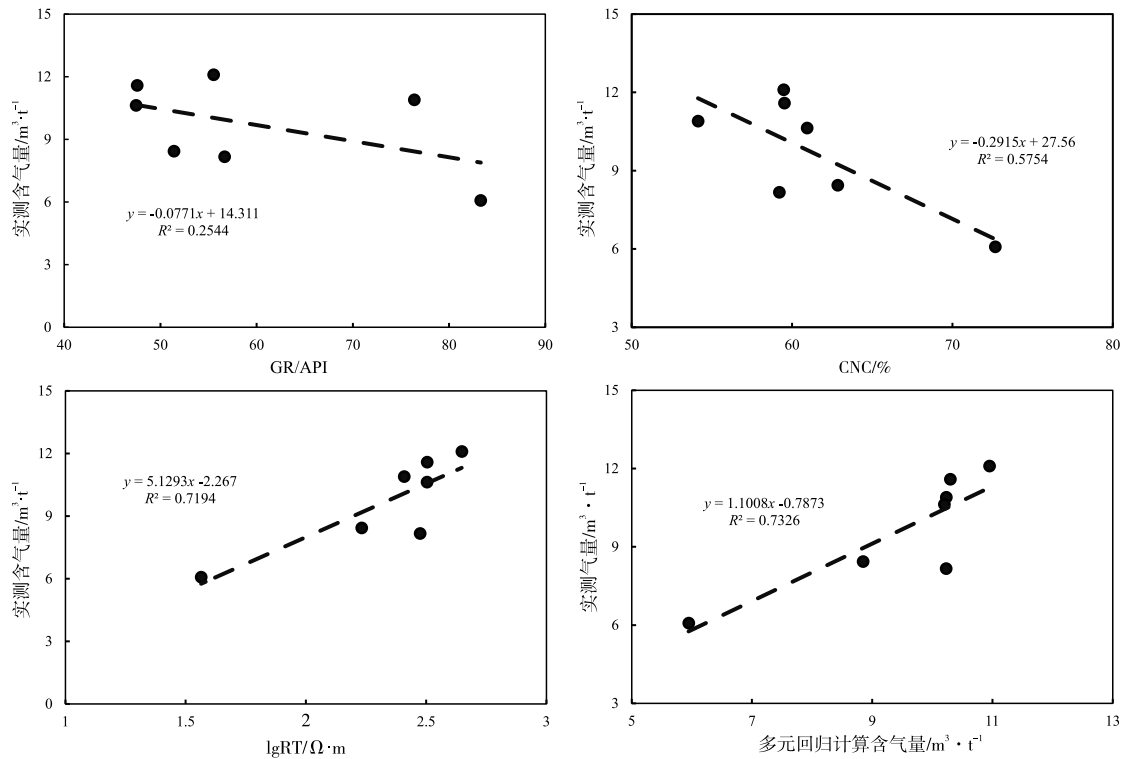


图 8 煤岩总含气量测井解释模型

Fig. 8 Logging interpretation model plate of total gas content of coal rocks

游离气含量：

$$V_f = V_g - V_a \quad (4)$$

式中， V_g —总含气量， m^3/t ； V_a —吸附气含量， m^3/t ； V_f —游离气含量， m^3/t 。

侏罗系克孜勒努尔组深层煤岩测井计算总含气量在 $5.95 \sim 10.95 m^3/t$ 之间，平均值为 $9.5 m^3/t$ ，吸附气含量平均为 $7.12 m^3/t$ ，游离气含量平均为 $2.38 m^3/t$ 。现场保压取心测得煤岩总含气量在 $6.08 \sim 12.1 m^3/t$ 之间，平均值为 $9.7 m^3/t$ ，吸附气含量平均为 $7.3 m^3/t$ ，游离气含量平均为 $2.4 m^3/t$ 。

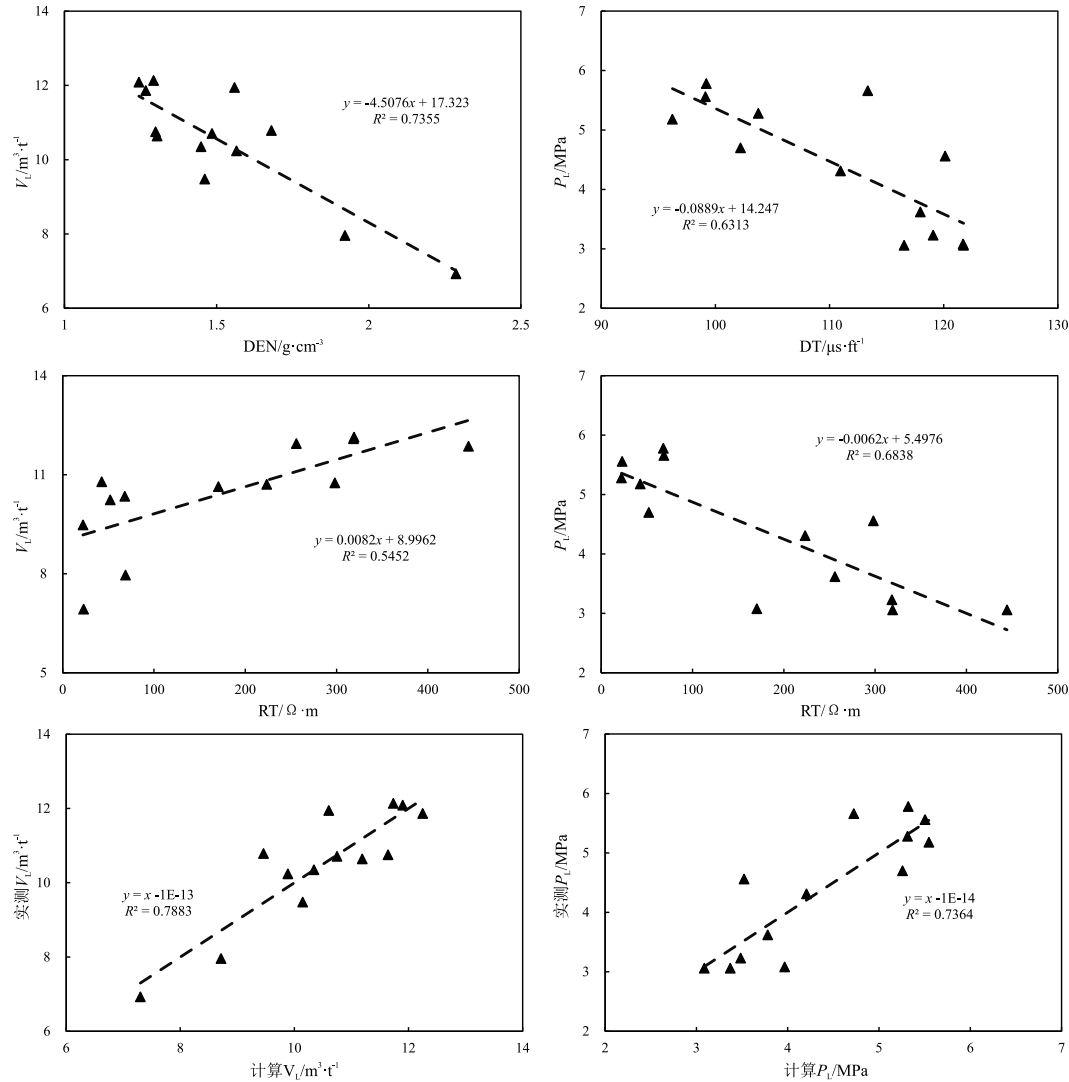
3.3 二维核磁评价煤岩含气性

核磁共振测井是根据岩石孔隙中氢原子的分布特征来识别其中流体的类型及含量，其相较于其他测井方法，具备明显的优点，可有效区分地层中的可动流体与束缚流体 (Dunn *et al.*, 2002; 赖锦等, 2023; Lai *et al.*, 2024b)。二维核磁共振测井通过测量及分析横向弛豫时间 (T_1)、纵向弛豫时间 (T_2) 和扩散系数 (D) 等参数，实现不同流体及其赋存状态的识别 (Kausik *et al.*, 2016; 王雷等,

2021)。利用 CMR-NG 获得煤层连续的 T_1-T_2 谱，依据气、水 T_1-T_2 弛豫特征的差异分离气、水核磁共振信号，能够排除煤岩中地层水的影响从而提高煤层含气量计算精度 (Fu *et al.*, 2017; Wang *et al.*, 2021; 余杰等, 2023)。

根据 Y11H 非常规测井、成像测井以及核磁共振测井资料解释结果分析 (图 10)，煤岩在常规测井上具有典型的“三高两低”的特征；在成像测井上显示为亮块状、亮斑状模式，煤层中发育的夹矸在成像上呈暗色层状；在核磁共振 T_2 谱上煤岩具有典型的双峰特征，具相对较宽的谱峰，同时存在明显的拖尾现象 (张亮等, 2025; Zhao *et al.*, 2025b; 王斌等, 2026)。

通过提取的煤岩单点二维核磁 T_1-T_2 交会图分析认为，煤岩以束缚状态的吸附气为主，游离气含量相对少；在同一套煤层中，随着电阻的增大含气性会增强。图 9 中，3#、5#煤在电阻率值较低且固定碳含量较低的煤层， T_1-T_2 谱以左单峰为主，游离气含量较低；电阻率值较高且固定碳含量相对较高的煤层， T_1-T_2 谱有较宽谱峰，其游离气含量较高。表征煤岩在电阻率值较高、固定碳含量较高且



V_L —兰氏体积, m^3/t ; P_L —兰氏压力, MPa; DEN—密度测井值, g/cm^3 ; DT—声波测井值, $\mu s/ft$; RT—电阻率测井值, $\Omega \cdot m$

图 9 深层煤岩吸附气含量测井解释模型图版

Fig. 9 Logging interpretation model plate of adsorption gas content of deep coal rocks

表 3 库车坳陷侏罗系煤岩兰氏体积、兰氏压力计算公式
Table 3 Calculation formulas of Langmuir Volume and Langmuir Pressure of the Jurassic coal rocks in Kuqa Depression

参数	公式	R^2
兰氏体积	$V_L = 15.1037 + 0.0034 \times RT - 3.4474 \times DEN$	0.7883
兰氏压力	$P_L = 9.7538 - 0.042 \times DT - 0.004 \times RT$	0.7364

结构相对稳定的层段具有较好的含气性,是研究区较为有利的开发层段。

4 结论

1) 塔里木盆地库车坳陷侏罗系克孜勒努尔组深层煤岩以半光亮—半暗型煤为主,煤体结构多呈

柱状、块状,成层性好,密度低,层理、割理发育。煤岩显微组分以镜质组为主,其中均质镜质体和基质镜质体中发育少量孔隙,部分镜质体腔被高岭石与石盐充填,降低了储集层孔隙的连通性;其次为惰质组,其中丝质体细胞结构保存完好,发育大量纤维状丝质体晶间孔。

2) 通过岩心刻度测井,可以实现煤岩的测井识别。煤岩在常规测井上表现为典型“三高两低”的特点:即低伽马 ($GR < 60$ API)、低密度 ($DEN < 2.0 g/cm^3$)、高电阻率 ($RT > 50 \Omega \cdot m$),高中子 ($CNC > 40\%$)、高声波时差 ($DT > 110 \mu s/ft$);在成像测井上煤岩显示为亮块状和亮斑状模式;煤层中夹研发育,其在成像上呈暗色层状。

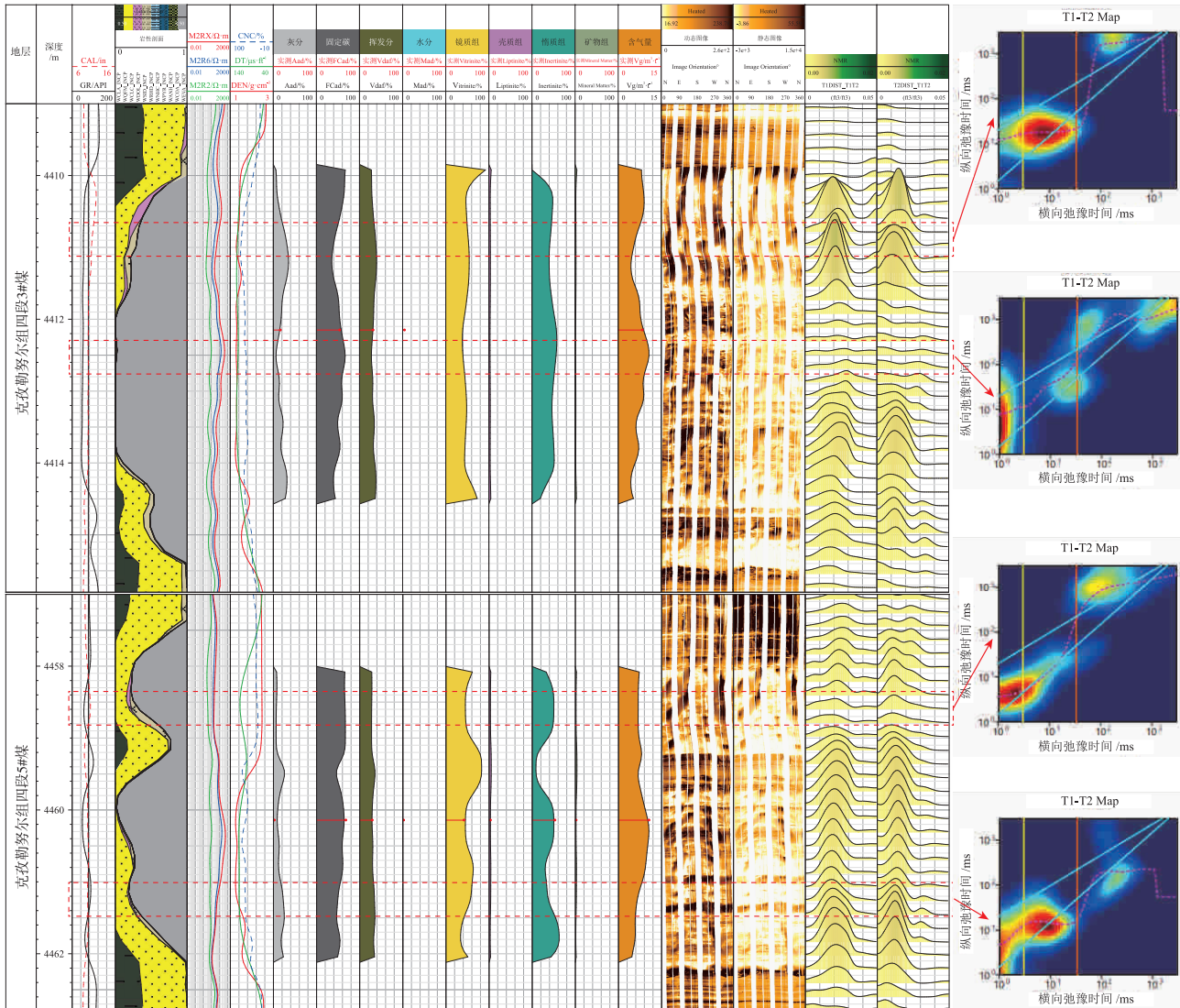


图 10 YT1H 井克孜勒努尔组 3#和 5#煤二维核磁共振处理解释结果

Fig. 10 Interpretation results of 2D NMR processing of coal seams No. 3 and No. 5 of the Kezilenuer Formation in Well YT1H

3) 库车坳陷侏罗系深层煤岩具有吸附气与游离气并存的特点。本次研究完成了常规测井评价煤岩含气量，将兰氏模型用于评价深层煤岩吸附气含量，通过现场保压取心实测含气量数据与常规测井参数相结合，实现了煤岩气总含气量的测井评价以及游离气的常规测井定量计算。

4) 结合常规测井、成像测井及核磁共振测井，实现了利用二维核磁共振 T_1-T_2 交会图进行煤岩含气性评价。在同一套煤层中，随着电阻的增大含气性会增强。电阻率值低且固定碳含量较低的煤层， T_1-T_2 谱以左单峰为主，游离气含量较低；电阻率值高且固定碳含量相对较高的煤层， T_1-T_2 谱有较宽谱峰，其游离气含量高。本研究为深层煤岩

气含气性评价提供了新方法，为后续优质层段优选具有指导价值。

参考文献 (References)

白雪峰,高庚,王彪,李敬生,李军辉,徐慧,马文娟,刘璐. 2024. 海拉尔盆地呼和湖凹陷深层煤岩气赋存条件及勘探方向. 石油与天然气地质,45(6): 1736-1754. [Bai X F, Gao G, Wang B, Li J S, Li J H, Xu H, Ma W J, Liu L. 2024. Occurrence conditions and exploration targets of deep coal-rock gas in the Huhehu Sag, Hailar Basin. Oil & Gas Geology, 45(6): 1736-1754]

戴金星,戚厚发,王少昌. 2001. 我国煤系的气油地球化学特征、煤成气藏形成条件及资源评价. 北京: 石油工业出版社,1-2. [Dai J X, Qi H F, Wang S C. 2001. Geochemical Features of Hydrocarbon from Coal Measure Formation and Resource Evaluation of Coal Formed Gas Reservoir in China. Beijing: Petroleum Industry Press, 1-2]

- 郭绪杰,支东明,毛新军,王小军,易士威,朱明,甘仁忠,武雪琼. 2021. 准噶尔盆地煤岩气的勘探发现及意义. 中国石油勘探, 26(6): 38-49. [Guo X J, Zhi D M, Mao X J, Wang X J, Yi S W, Zhu M, Gan R Z, Wu X Q. 2021. Discovery and significance of coal measure gas in Junggar Basin. China Petroleum Exploration, 26(6): 38-49]
- 郭泽清,王斌,董才源,李玲,庞正炼,陈秀艳,马德波. 2025. 塔里木盆地库车坳陷北部构造带侏罗系煤岩气地质特征及有利区带评价. 天然气地球科学, 36(5): 953-972. [Guo Z Q, Wang B, Dong C Y, Li L, Pang Z L, Chen X Y, Ma D B. 2025. Geological characteristics of Jurassic coal rock gas and evaluation of favorable zones in the northern structural belt of the Kuqa Depression, Tarim Basin. Natural Gas Geoscience, 36(5): 953-972]
- 韩德馨. 1996. 中国煤岩学. 徐州: 中国矿业大学出版社, 1-599. [Han D X. 1996. Chinese Coal Petrology. Jiangsu Xuzhou: China University of Mining and Technology Press, 1-599]
- 何登发,周新源,杨海军,雷刚林,马玉杰. 2009. 库车坳陷的地质结构及其对大油气田的控制作用. 大地构造与成矿学, 33(1): 19-32. [He D F, Zhou X Y, Yang H J, Lei G L, Ma Y J. 2009. Geological structure and its controls on giant oil and gas fields in Kuqa Depression, Tarim Basin: a clue from new shot seismic data. Geotectonica et Metallogenia, 33(1): 19-32]
- 何发岐,董昭雄. 2022. 深部煤层气资源开发潜力: 以鄂尔多斯盆地大牛地气田为例. 石油与天然气地质, 43(2): 277-285. [He F Q, Dong Z X. 2022. Development potential of deep coalbed methane: a case study in the Daniudi gas field, Ordos Basin. Oil & Gas Geology, 43(2): 277-285]
- 侯振学. 2018. 电成像测井在煤层气储层精细评价中的应用. 测井技术, 42(6): 672-677. [Hou Z X. 2018. Application of electrical imaging logging in fine evaluation of CBM reservoir. Well Logging Technology, 42(6): 672-677]
- 贾承造,郑民,张永峰. 2012. 中国非常规油气资源与勘探开发前景. 石油勘探与开发, 39(2): 129-136. [Jia C Z, Zheng M, Zhang Y F. 2012. Unconventional hydrocarbon resources in China and the prospect of exploration and development. Petroleum Exploration and Development, 39(2): 129-136]
- 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. [Lai J, Wang G W, Pang X J, Han Z Y, Li D, Zhao Y D, Wang S, Jiang C Z, Li H B, Li Y H. 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]
- 赖锦,李红斌,张梅,白梅梅,赵仪迪,范旗轩,庞小娇,王贵文. 2023. 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. [Lai J, Li H B, Zhang M, Bai M M, Zhao Y D, Fan Q X, Pang X J, Wang G W. 2023. Advances in well logging geology in the era of unconventional hydrocarbon resources. Journal of Palaeogeography (Chinese Edition), 25(5): 1118-1138]
- 赖锦,白天宇,苏洋,赵飞,李玲,黎雨航,李红斌,王贵文,肖承文. 2024a. 烃源岩测井识别与评价方法研究进展. 地质论评, 70(2): 721-741. [Lai J, Bai T Y, Su Y, Zhao F, Li L, Li Y H, Li H B, Wang G W, Xiao C W. 2024a. Researches progress in well log recognition and evaluation of source rocks. Geological Review, 70(2): 721-741]
- 赖锦,肖露,白天宇,范旗轩,黄玉越,李红斌,赵飞,王贵文. 2024b. 成像测井解释评价方法及其地质应用. 地质科技通报, 43(3): 323-340. [Lai J, Xiao L, Bai T Y, Fan Q X, Huang Y Y, Li H B, Zhao F, Wang G W. 2024b. Interpretation and evaluation methods of image logs and their geological applications. Bulletin of Geological Science and Technology, 43(3): 323-340]
- 赖锦,宋翔羽,杨薰,赵仪迪,田银宏,李栋,信毅,张荣虎,王贵文. 2025a. 致密砂岩气储层测井综合评价技术研究进展. 石油学报, 46(1): 220-235. [Lai J, Song X Y, Yang X, Zhao Y D, Tian Y H, Li D, Xin Y, Zhang R H, Wang G W. 2025a. Research progresses of comprehensive well logging evaluation methods of tight gas sandstone reservoirs. Acta Petrolei Sinica, 46(1): 220-235]
- 赖锦,党文乐,苏洋,吴永平,赵仪迪,张有鹏,信毅,白天宇,王贵文. 2025b. 声波测井地质与工程应用. 地质论评, 71(3): 1046-1072. [Lai J, Dang W L, Su Y, Wu Y P, Zhao Y D, Zhang Y P, Xin Y, Bai T Y, Wang G W. 2025b. Geological and engineering applications of sonic logs. Geological Review, 71(3): 1046-1072]
- 赖锦,王贵文. 2025. 测井地质学(第二版). 北京: 石油工业出版社, 1-480. [Lai J, Wang G W. 2025. Well Logging Geology (Second Edition). Beijing: Petroleum Industry Press, 1-480]
- 赖锦,杨薰,宋翔羽,苏洋,王志始,黄若坤,郑欣,赵仪迪,王贵文. 2026. 测井沉积学研究起源、发展及时代传承. 地质论评, 72(2): 263-283. [Lai J, Yang X, Song X Y, Su Y, Wang Z S, Huang R K, Zheng X, Zhao Y D, Wang G W. 2026. Research of well logging sedimentology: origin, development and era successor. Geological Review, 72(2): 263-283]
- 李存磊,杨兆彪,孙晗森,马玉银,张争光,李洋阳,李庚. 2020. 多煤层区煤体结构测井解释模型构建. 煤炭学报, 45(2): 721-730. [Li C L, Yang Z B, Sun H S, Ma Y Y, Zhang Z G, Li Y Y, Li G. 2020. Construction of a logging interpretation model for coal structure from multi-coal seams area. Journal of China Coal Society, 45(2): 721-730]
- 李国欣,雷征东,董伟宏,王红岩,郑兴范,谭健. 2022. 中国石油非常规油气开发进展、挑战与展望. 中国石油勘探, 27(1): 1-11. [Li G X, Lei Z D, Dong W H, Wang H Y, Zheng X F, Tan J. 2022. Progress, challenges and prospects of unconventional oil and gas development of CNPC. China Petroleum Exploration, 27(1): 1-11]
- 李国欣,贾承造,赵群,周天琪,高金亮. 2025. 煤岩气成藏机理与煤系全油气系统. 石油勘探与开发, 52(1): 29-43. [Li G X, Jia C Z, Zhao Q, Zhou T Q, Gao J L. 2025. Coal-rock gas accumulation mechanism and the whole petroleum system of coal measures. Petroleum Exploration and Development, 52(1): 29-43]
- 连承波,赵永军,李汉林,渠芳,马士坤,蔡福龙,张军涛. 2005. 煤层含气量的主控因素及定量预测. 煤炭学报, 30(6): 726-729. [Lian C B, Zhao Y J, Li H L, Qu F, Ma S K, Cai F L, Zhang J T. 2005. Main controlling factors analysis and prediction of coalbed gas content. Journal of China Coal Society, 30(6): 726-729]
- 马东民,马薇,蒯亚兵. 2012. 煤层气解吸滞后特征分析. 煤炭学报, 37(1): 1-5.

- 37(11): 1885-1889. [Ma D M, Ma W, Lin Y B. 2012. Desorption hysteresis characteristics of CBM. *Journal of China Coal Society*, 37(11): 1885-1889]
- 聂志宏, 时小松, 孙伟, 闫霞, 黄红星, 刘莹, 冯延青. 2022. 大宁-吉县区块深层煤层气生产特征与开发技术对策. *煤田地质与勘探*, 50(3): 193-200. [Nie Z H, Shi X S, Sun W, Yan X, Huang H X, Liu Y, Feng Y Q. 2022. Production characteristics of deep coalbed methane gas reservoirs in Daning-Jixian Block and its development technology countermeasures. *Coal Geology & Exploration*, 50(3): 193-200]
- 牛小兵, 张辉, 王怀厂, 虎建玲, 吴陈君, 赵伟波, 潘博. 2024. 鄂尔多斯盆地中、东部石炭系本溪组煤储层纵向非均质性特征及成因: 以M172井为例. *石油与天然气地质*, 45(6): 1577-1589. [Niu X B, Zhang H, Wang H C, Hu J L, Wu C J, Zhao W B, Pan B. 2024. Characteristics and genesis of vertical heterogeneity in a coal seam of the Carboniferous Benxi Formation, eastern Ordos Basin: a case study of well M172. *Oil & Gas Geology*, 45(6): 1577-1589]
- 蒲秀刚, 董雄英, 柴公权, 李宏军, 李昊东, 吕德胜, 于超, 勐睿, 邵阳, 何川. 2024. 黄骅坳陷上古生界煤岩气成藏条件与勘探方向. *中国石油勘探*, 29(4): 60-70. [Pu X G, Dong X Y, Chai G Q, Li H J, Li H D, Lü D S, Yu C, Meng R, Shao Y, He C. 2024. Accumulation conditions and exploration orientation of coal measure gas in the Upper Paleozoic in Huanghua Depression. *China Petroleum Exploration*, 29(4): 60-70]
- 石玉江, 何羽飞, 王金彬, 郭笑错, 于红果, 杨仁杰. 2024. 深层煤岩气地质品质及含气量测井评价方法研究. *中国石油勘探*, 29(4): 126-141. [Shi Y J, He Y F, Wan J B, Guo X K, Yu H G, Yang R J. 2024. Research on logging evaluation methods for geological quality and gas content of deep coal measure gas. *China Petroleum Exploration*, 29(4): 126-141]
- 苏洋, 赖锦, 赵飞, 别康, 李栋, 黄玉越, 张有鹏, 王贵文. 2024. 岩性扫描测井解释评价方法及其地质应用. *地质论评*, 70(5): 1884-1898. [Su Y, Lai J, Zhao F, Bie K, Li D, Huang Y Y, Zhang Y P, Wang G W. 2024. Interpretation and evaluation methods of Litho-Scanner logging data and its geological application. *Geological Review*, 70(5): 1884-1898]
- 苏洋, 赖锦, 别康, 李栋, 赵飞, 陈康军, 李红斌, 王贵文. 2025. 深层超深层钻井地质信息测井拾取与评价. *古地理学报*, 27(1): 225-239. [Su Y, Lai J, Bie K, Li D, Zhao F, Chen K J, Li H B, Wang G W. 2025. Well logging evaluation and characterization of geological information for deep and ultra-deep drilling wells. *Journal of Palaeogeography (Chinese Edition)*, 27(1): 225-239]
- 王斌, 夏宗立, 张科, 李玲, 王中瑞, 赵飞, 张有鹏, 赖锦. 2026. 元素扫描测井在煤系烃源岩识别与评价中的应用. *地质科技通报*, 45(1): 291-301. [Wang B, Xia Z L, Zhang K, Li L, Wang Z R, Zhao F, Zhang Y P, Lai J. 2026. Application of Litho Scanner logging in recognition and evaluation of coaly source rocks. *Bulletin of Geological Science and Technology*, 45(1): 291-301]
- 王雷, 周军, 雷晓阳, 宋京京, 朱万里, 孙佩. 2021. MRT二维核磁共振测井方法及应用. *测井技术*, 45(4): 399-404. [Wang L, Zhou J, Lei X Y, Song J J, Zhu W L, Sun P. 2021. Method and application of MRT two dimensional NMR logging. *Well Logging Technology*, 45(4): 399-404]
- 徐凤银, 闫霞, 李曙光, 熊先钺, 王子新, 张雷, 刘川庆, 韩金良, 冯延青, 甄怀宾, 杨贇, 王成旺, 李宇新. 2023. 鄂尔多斯盆地东缘深部(层)煤层气勘探开发理论技术难点与对策. *煤田地质与勘探*, 51(1): 115-130. [Xu F Y, Yan X, Li S G, Xiong X Y, Wang Y X, Zhang L, Liu C Q, Han J L, Feng Y Q, Zhen H B, Yang Y, Wang C W, Li Y X. 2023. Theoretical and technological difficulties and countermeasures of deep CBM exploration and development in the eastern edge of Ordos Basin. *Coal Geology & Exploration*, 51(1): 115-130]
- 徐光波, 赵金环, 崔周旗, 邹志钢, 卢笛声, 孙瑞雪, 孟艳军. 2018. 沁水盆地南部安泽区块煤体结构测井识别研究. *煤炭科学技术*, 46(5): 179-184, 53. [Xu G B, Zhao J H, Cui Z Q, Zou Z G, Lu D S, Sun R X, Meng Y J. 2018. Study on well logging identification of coal structure in Anze Block of southern Qinshui Basin. *Coal Science and Technology*, 46(5): 179-184, 53]
- 杨兆彪, 高为, 秦勇, 张孟江, 李存磊, 颜智华, 梁宇辉, 卢本举, 陈义林, 吴财芳, 陈捷, 李庚, 文德修. 2024. 贵州深部煤层气地质特征及其资源潜力. *煤炭学报*, 49(S1): 348-361. [Yang Z B, Gao W, Qin Y, Zhang M J, Li C L, Yan Z H, Liang Y H, Lu B J, Chen Y L, Wu C F, Chen J, Li G, Wen D X. 2024. Geological characteristics and resource potential of deep coalbed methane in Guizhou. *Journal of China Coal Society*, 49(S1): 348-361]
- 余杰, 秦瑞宝, 黄涛, 李利. 2023. 基于核磁共振技术的煤层含气量评价方法. *煤炭科学技术*, 51(11): 158-165. [Yu J, Qin R B, Huang T, Li L. 2023. Evaluating method of gas content of coalbed methane based on nuclear magnetic resonance technology. *Coal Science and Technology*, 51(11): 158-165]
- 张莉莉, 蔡文渊. 2009. 煤层气成像测井资料综合评价方法. *测井技术*, 33(6): 571-574. [Zhang L L, Cai W Y. 2009. The evaluation method of imaging well logging data in coalbed methane reservoir. *Well Logging Technology*, 33(6): 571-574]
- 张亮, 夏宗立, 王斌, 李玲, 赵飞, 张有鹏, 赖锦, 王贵文. 2025. 深层烃源岩测井评价方法: 以库车坳陷侏罗系阳霞组烃源岩为例. *地球物理学进展*, 40(4): 1563-1576. [Zhang L, Xia Z L, Wang B, Li L, Zhao F, Zhang Y P, Lai J, Wang G W. 2025. Well log evaluation methods of deep source rocks: the jurassic Yangxia Formation in Kuqa Depression. *Progress in Geophysics*, 40(4): 1563-1576]
- 赵亚汶, 杨宪彰, 唐雁刚, 严德天, 王斌, 蒋俊, 易艳, 张科, 李玲, 王旭鹏. 2025. 塔里木盆地库车坳陷侏罗系克孜勒努尔组煤岩气地质特征及有利成藏模式. *天然气地球科学*, 36(9): 1692-1705. [Zhao Y W, Yang X Z, Tang Y G, Yan D T, Wang B, Jiang J, Yi Y, Zhang K, Li L, Wang X P. 2025. Geological characteristics and favorable accumulation model of coal-rock gas of Jurassic Kizilenuer Formation in Kuqa Depression, Tarim Basin. *Natural Gas Geoscience*, 36(9): 1692-1705]
- 赵毅, 毛志强, 孙伟, 蔡文渊, 罗安银, 赵永昌. 2011. 煤层气储层非常规测井资料评价方法研究. *测井技术*, 35(5): 441-446. [Zhao Y, Mao Z Q, Sun W, Cai W Y, Luo A Y, Zhao Y C. 2011. Evaluation method for unconventional log data of CBM reservoir. *Well Logging Technology*, 35(5): 441-446]
- 智凤琴, 张荣虎, 余朝丰. 2023. 库车坳陷东部阳霞凹陷侏罗系石油

- 地质条件与勘探方向. 海相油气地质, 28(2): 186-195. [Zhi F Q, Zhang R H, Yu C F. 2023. Jurassic petroleum geological conditions and exploration direction in Yangxia sag, eastern Kuqa Depression. *Marine Origin Petroleum Geology*, 28(2): 186-195]
- 周德华, 陈刚, 陈贞龙, 刘曾勤. 2022. 中国深层煤层气勘探开发进展、关键评价参数与前景展望. *天然气工业*, 42(6): 43-51. [Zhou D H, Chen G, Chen Z L, Liu Z Q. 2022. Exploration and development progress, key evaluation parameters and prospect of deep CBM in China. *Natural Gas Industry*, 42(6): 43-51]
- 朱建伟, 赵刚, 刘博, 郭巍, 成俊. 2012. 油页岩测井识别技术及应用. *吉林大学学报(地球科学版)*, 42(2): 289-295. [Zhu J W, Zhao G, Liu B, Guo W, Cheng J. 2012. Identification technology and its application of well-logging about oil shale. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 42(2): 289-295]
- 朱志良, 高小明. 2022. 陇东煤田侏罗系煤层气成藏主控因素与模式. *岩性油气藏*, 34(1): 86-94. [Zhu Z L, Gao X M. 2022. Main controlling factors and models of Jurassic coalbed methane accumulation in Longdong coalfield. *Lithologic Reservoirs*, 34(1): 86-94]
- Dunn K J, Bergman D J, Latorraca G A. 2002. Nuclear Magnetic Resonance: Petrophysical and Logging Applications. *Handbook of Geophysical Exploration*. Amsterdam: Elsevier, 1-293.
- Fu H J, Tang D Z, Xu T, Xu H, Tao S, Li S, Yin Z Y, Chen B L, Zhang C, Wang L L. 2017. Characteristics of pore structure and fractal dimension of low-rank coal: a case study of Lower Jurassic Xishanyao coal in the southern Junggar Basin, NW China. *Fuel*, 193: 254-264.
- Graham S A, Hendrix M S, Wang L B, Carroll A R. 1993. Collisional successor basins of western China: impact of tectonic inheritance on sand composition. *Geological Society of America Bulletin*, 105(3): 323-344.
- Hou J, Zou C C, Huang Z H, Xiao L, Yang Y Q, Zhang G H, Wang W W. 2014. Log evaluation of a coalbed methane (CBM) reservoir: a case study in the southern Qinshui Basin, China. *Journal of Geophysics and Engineering*, 11(1): 015009.
- Kausik R, Fellah K, Rylander E, Singer P M, Lewis R E, Sinclair S M. 2016. NMR relaxometry in shale and implications for logging. *Petrophysics*, 57(4): 339-350.
- Lai J, Wang G W, Fan Z Y, Chen J, Wang S C, Fan X Q. 2017. Sedimentary characterization of a braided delta using well logs: the upper Triassic Xujiahe Formation in Central Sichuan Basin, China. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 154: 172-193.
- Lai J, Wang G W, Wang S, Cao J T, Li M, Pang X J, Han C, Fan X Q, Yang L, He Z B, Qin Z Q. 2018. A review on the applications of image logs in structural analysis and sedimentary characterization. *Marine and Petroleum Geology*, 95: 139-166.
- Lai J, Wang G W, Fan Q X, Pang X J, Li H B, Zhao F, Li Y H, Zhao X, Zhao Y D, Huang Y Y, Bao M, Qin Z Q, Wang Q Q. 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 J, Su Y, Xiao L, Zhao F, Bai T Y, Li Y H, Li H B, Huang Y Y, Wang G W, Qin Z Q. 2024a. Application of geophysical well logs in solving geologic issues: Past, present and future prospect. *Geoscience Frontiers*, 15(3): 101779.
- Lai J, Zhao F, Xia Z L, Su Y, Zhang C C, Tian Y H, Wang G W, Qin Z Q. 2024b. Well log prediction of total organic carbon: a comprehensive review. *Earth-Science Reviews*, 258: 104913.
- Li X Z, Wang Y H, Jiang Z C, Chen Z L, Wang L Z, Wu Q. 2016. Progress and study on exploration and production for deep coalbed methane. *Journal of China Coal Society*, 41(1): 24-31.
- Li Y, Xu F Y, Tang S H, Wang Y B, Meng S Z, Xu Q. 2024. Progress and development direction of coalbed methane (coal-rock gas) exploration and development in the Ordos Basin. *Natural Gas Industry*, 44(10): 63-79.
- Liu Z D, Zhao J Z. 2016. Quantitatively evaluating the CBM reservoir using logging data. *Journal of Geophysics and Engineering*, 13(1): 59-69.
- Niu X B, Fan L Y, Yan X X, Zhou G X, Zhang H, Jing X Y, Zhang M B. 2024. Enrichment conditions and resource potential of coal-rock gas in Ordos Basin, NW China. *Petroleum Exploration and Development*, 51(5): 1122-1137.
- Su Y, Lai J, Dang W L, Bie K, Zhao Y D, Zhao X J, Li D, Zhao F, Wang G W. 2024. Pore structure characterization and reservoir quality prediction in deep and ultra-deep tight sandstones by integrating image and NMR logs. *Journal of Asian Earth Sciences*, 272: 106232.
- Tang X Y. 2017. Quantitative evaluation of CBM reservoir fracturing quality using logging data. *Journal of Geophysics and Engineering*, 14(2): 226-237.
- Wang S, Wang G W, Huang L L, Song L T, Zhang Y L, Li D, Huang Y Y. 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.
- Zhang S R, Men X Y, Deng Z Y, Hu Q P. 2023. Prediction method of coal texture considering longitudinal resolution of logging curves and its application: taking No. 15 coal seam in the Shouyang block as an example. *ACS Omega*, 8(31): 28702-28714.
- Zhao F, Lai J, Xiao L, Xia Z L, Wang Z R, Li L, Wang B, Wang G W. 2025a. Pore structure and gas content evaluation of coal-rock gas using well log data. *Unconventional Resources*: 100247.
- Zhao F, Lai J, Xia Z L, Wang Z R, Li L, Wang B, Xiao L, Su Y, Wang G W. 2025b. Coaly source rock evaluation using well logs: the Jurassic Kezilenuer Formation in Kuqa Depression, Tarim Basin, China. *Petroleum Science*, 22(9): 3599-3612.
- Zhao Z, Xu W L, Zhao Z Y, Yi S W, Yang W, Zhang Y Q, Sun Y S, Zhao W B, Shi Y H, Zhang C L, Gao J R. 2024. Geological characteristics and exploration breakthroughs of coal rock gas in Carboniferous Benxi Formation, Ordos Basin, NW China. *Petroleum Exploration and Development*, 51(2): 234-247, 259.

(责任编辑 李新坡)