

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2026.207>



# 深层煤层气地质-工程一体化 “六性”测井评价及应用

丁 蓉<sup>1,2</sup>, 李忠百<sup>1,2</sup>, 陈 彤<sup>1,2</sup>, 姜亚南<sup>1,2</sup>, 胡 刚<sup>3</sup>, 杜 欣<sup>3</sup>, 安晓康<sup>4</sup>, 李 勇<sup>4\*</sup>

1. 中联煤层气国家工程研究中心有限责任公司, 北京 100095
2. 中石油煤层气有限责任公司, 北京 100028
3. 中国石油集团测井有限公司地质研究院, 陕西西安 710077
4. 中国矿业大学(北京)地球科学与测绘工程学院, 北京 100083

**摘 要:** 针对深层煤层气储层高温高压、强非均质性、孔裂隙系统复杂及地应力约束显著等特点, 构建了岩性、生烃性、物性、含气性、可压性和应力特性“六性”地质-工程协同评价体系。岩性表现为低自然伽马、低密度、高中子、高声波时差和相对高电阻率; 生烃性可由元素测井、密度、声波和电阻率联合表征; 物性受孔裂隙结构控制, 可通过密度、声波、核磁共振、电成像和电阻率识别; 含气性表现为高电阻率、中子-密度异常和核磁响应差异; 可压性由阵列声波、密度和元素测井约束; 应力特性通过阵列声波、电成像、密度测井评价。基于上述认识, 构建了由有机显微组分、无机矿物和孔隙流体组成的煤岩测井评价体积模型, 形成岩性识别、生烃性评价、孔渗参数计算、吸附气-游离气含量预测、可压性表征及地应力评价方法。电性响应受岩性组成、生烃演化、孔裂隙结构、含气状态、可压性特征和应力作用共同控制, 具有综合性和多解性; 与密度、声波、核磁、元素和成像测井联合应用, 可降低单一参数解释不确定性, 提高“六性”关键参数解释精度。大吉区块应用结果表明, 优质储层具有低灰分、高镜质组含量、煤体结构较完整、煤层厚度大、含气量高、孔裂隙系统有效、可压性好及应力差适中等特征, 测井上表现为高阻-高时差型。该方法可为甜点预测、水平井部署和压裂层段优选提供支撑。

**关键词:** 煤层气; 地质-工程一体化; 测井评价; 甜点预测; 黑金靶体。

中图分类号: P618.13

文章编号: 1000-2383(2026)07-2462-20

收稿日期: 2025-12-09

## Integrated Geological-Engineering Logging Evaluation and Application of “Six Properties” for Deep Coalbed Methane Reservoirs

Ding Rong<sup>1,2</sup>, Li Zhongbai<sup>1,2</sup>, Chen Tong<sup>1,2</sup>, Jiang Yanan<sup>1,2</sup>, Hu Gang<sup>3</sup>, Du Xin<sup>3</sup>, An Xiaokang<sup>4</sup>, Li Yong<sup>4\*</sup>

1. China United Coalbed Methane National Engineering Research Center, Beijing 100095, China
2. PetroChina Coalbed Methane Co., Ltd., Beijing 100028, China
3. Geologic Research Institute, China Petroleum Logging Co., Ltd., Xi'an 710077, China
4. College of Geoscience and Surveying Engineering, China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083, China

**基金项目:** 国家科技重大专项项目(No. 2025ZD1405700); 中石油煤层气有限责任公司科技项目(No. 2026-KJ-0101)。

**作者简介:** 丁蓉(1987—), 女, 高级工程师, 主要从事煤层气勘探开发及储量管理工作。ORCID: 0009-0003-6706-8552. E-mail: 25670030@qq.com

**\* 通讯作者:** 李勇, ORCID: 0000-0001-8859-156X. E-mail: liyong@cumtb.edu.cn

**引用格式:** 丁蓉, 李忠百, 陈彤, 姜亚南, 胡刚, 杜欣, 安晓康, 李勇, 2026. 深层煤层气地质-工程一体化“六性”测井评价及应用. 地球科学, 51(7): 2462-2481.

**Citation:** Ding Rong, Li Zhongbai, Chen Tong, Jiang Yanan, Hu Gang, Du Xin, An Xiaokang, Li Yong, 2026. Integrated Geological-Engineering Logging Evaluation and Application of “Six Properties” for Deep Coalbed Methane Reservoirs. *Earth Science*, 51(7): 2462-2481.

**Abstract:** To address the high temperature and pressure, strong heterogeneity, complex pore-fracture system, and significant in-situ stress constraints of deep coalbed methane reservoirs, this study establishes a geological-engineering collaborative evaluation framework based on six properties: lithology, hydrocarbon generation potential, petrophysical properties, gas-bearing property, fracability, and stress characteristics. The results show that lithology is characterized by low natural gamma, low density, high neutron response, high acoustic slowness, and relatively high resistivity. Hydrocarbon generation potential can be jointly characterized by elemental logging, density, acoustic, and resistivity logs. Petrophysical properties are controlled by pore-fracture structure and can be identified using density, acoustic, nuclear magnetic resonance, electrical imaging, and resistivity logs. Gas-bearing property is indicated by high resistivity, neutron-density anomaly, and nuclear magnetic resonance response differences. Fracability is constrained by array acoustic, density, and elemental logs, while stress characteristics are evaluated using array acoustic, electrical imaging, and density logs. Based on these understandings, a logging evaluation volume model composed of organic macerals, inorganic minerals, and pore fluids is constructed. Methods are developed for lithology identification, hydrocarbon generation evaluation, porosity and permeability calculation, adsorbed gas and free gas prediction, fracability characterization, and in-situ stress evaluation. Electrical responses are jointly controlled by lithologic composition, hydrocarbon generation evolution, pore-fracture structure, gas-bearing state, fracability, and stress conditions, showing strong comprehensiveness and non-uniqueness. Integrated application of electrical, density, acoustic, nuclear magnetic resonance, elemental, and imaging logs can reduce single-parameter interpretation uncertainty and improve the accuracy of key “six-properties” parameters. Application in the Daji Block shows that high-quality reservoirs are characterized by low ash content, high vitrinite content, relatively intact coal structure, large coal thickness, high gas content, effective pore-fracture systems, favorable fracability, and moderate stress difference, with high-resistivity and high-slowness logging responses. This method provides support for sweet spot prediction, horizontal well deployment, and fracturing interval optimization.

**Key words:** coalbed methane; geology-engineering integration; logging evaluation; sweet spot prediction; black-gold target.

## 0 引言

随着我国能源结构转型深化与“双碳”目标持续推进,非常规天然气资源勘探开发已成为保障国家能源安全和推动天然气增储上产的重要方向.深层煤层气通常指埋深大于1 500 m煤层的天然气,资源潜力大,赋存状态复杂,开发潜力突出,正逐步成为继致密气、页岩气之后非常规天然气勘探开发的重要接替领域(焦方正等, 2025;周立宏等, 2025a).鄂尔多斯盆地是我国重要含煤盆地之一,东缘石炭-二叠系含煤地层发育稳定,煤层厚度大、分布范围广、埋深适中至较大,具备深层煤层气富集成藏的良好地质基础(焦方正等, 2025;周立宏等, 2025a;李勇等, 2026).

与中浅层煤层气相比,深层煤层气储层受高温高压、强压实作用和深部地应力场控制,普遍表现出高温、高压、高含气量、高含气饱和度以及低孔、低渗等特征,吸附气与游离气共存特征更加明显.游离气贡献、割理-裂隙系统有效性、含气饱和状态及压裂改造适应性,对深层煤层气产能形成具有重要控制作用(焦方正等, 2025;周立宏等, 2025a;李勇等, 2026).因此,传统面向中浅层煤层气的“三品质”或单一

地质参数评价方法,已难以满足深层煤层气储层精细评价、甜点预测及工程部署的需求(刘之的等, 2015;郭广山等, 2018).

已有煤层气测井评价研究主要集中于煤层识别、煤岩组分解释、孔渗参数预测、含气量评价及封盖条件分析等方面(石玉江等, 2024;王舵等, 2024;陈峥嵘等, 2026),但针对深层煤层气储层的地质-工程协同评价仍显不足.一是偏重单一地质属性或单项参数解释,对储层地质属性与工程属性之间的协同关系考虑不足;二是对可压性、应力特性及生烃性等关键参数的测井表征不够系统,难以满足压裂层段优选和水平井部署需求;三是对电性响应的约束作用利用不足,尚未充分发挥其在多参数联合反演中的桥梁作用.上述问题制约了深层煤层气储层关键参数解释精度和甜点预测可靠性.

基于此,本文以鄂尔多斯盆地大吉区块深部煤储层为研究对象,综合岩心实验、常规测井、核磁共振、电成像、阵列声波和元素测井等资料,构建由岩性、物性、含气性、生烃性、可压性和应力特性组成的“六性”地质-工程协同测井评价体系,建立融合岩石物理体积模型、多测井信息联动和电性响应约束的储层参数表征方法,并形成“岩心刻度测井-理

论建模-多测井信息联动-井震融合”的综合评价技术流程,以期为深层煤层气甜点层段识别、水平井优化部署及压裂层段优选提供技术支撑。

1 “六性”内涵及组成

本文将深层煤层气储层评价属性归纳为岩性、生烃性、物性、含气性、可压性和应力特性六个方面,简称“六性”。其中,岩性、生烃性、物性和含气性主要表征储层物质组成、气源条件、储集空间及资源赋存状态,属于地质属性;可压性和应力特性主要反映储层压裂改造难易程度、裂缝起裂与扩展能力及深部工程改造条件,属于工程属性。通过“地质属性-工程属性”协同评价,可实现由储层地质甜点识别向工程甜点优选的递进式评价。

1.1 岩性

岩性是煤储层评价的基础属性,主要包括煤岩显微组分、矿物组分、工业组分、宏观煤岩类型、煤体结构、破碎程度及完整性等(石玉江等,2024;周立宏等,2025a,2025b)。深煤层受较高热演化程度和强压实作用影响,其岩石骨架并非单一有机质体系,而是由有机显微组分与无机矿物共同构成的复合介质。其中,有机显微组分以镜质组、惰质组和类脂组为主,无机矿物主要包括黏土矿物、石英、方解石及黄铁矿等(刘新社等,2024;赵喆等,2024)。不同组分对煤岩密度、声波传播、电阻率及自然伽马响应具有显著影响,是开展煤层识别、煤质评价、矿物组分反演及后续物性、含气性和可压性评价的基础。

1.2 生烃性

生烃性反映煤作为烃源岩生成天然气的能力,主要受有机质丰度、有机质类型、显微组分及热演化程度控制。与常规储层不同,煤岩兼具烃源岩与储层双重属性,既是天然气生成的物质基础,也是气体赋存与运移的空间载体。深煤层通常具有较高

热演化程度,有利于热成因气生成,但过高演化程度也可能改变煤岩孔隙结构、吸附能力和力学性质(李勇等,2021)。生烃性不仅决定气源供给强度,也间接影响储层物性、含气性及工程改造响应。测井上,生烃性可通过有机质含量、煤阶、显微组分和矿物组分等间接表征,并需要岩心地球化学测试进行标定。

1.3 物性

物性是表征储集能力和渗流能力的关键属性,主要包括孔隙度、渗透率、孔隙结构、裂隙发育程度及孔裂隙连通性等(李松等,2015;牛小兵等,2024)。深煤层孔隙系统复杂,包括煤基质中的微孔、介孔和宏孔,也包括割理、微裂隙和宏观裂缝(赵伟波等,2024)。深煤层受强压实作用和高地应力影响,基质孔隙和裂隙系统更易发生压缩与闭合,储层整体表现出低孔、低渗特征。基质孔隙主要控制吸附气赋存能力,裂隙和割理系统则决定游离气赋存、气体解吸后的运移效率以及压裂改造后的有效导流能力。物性评价不仅要关注孔隙度大小,还应重视孔裂隙结构、连通性和有效性。

1.4 含气性

含气性直接反映资源基础,主要包括吸附气含量、游离气含量、总含气量、含气饱和度及临界解吸压力等。吸附气主要赋存于煤基质孔隙表面,受煤阶、有机显微组分、比表面积、压力和含水状态等因素控制;游离气主要赋存于有效孔隙和裂隙系统中,其含量与有效孔隙度、地层压力、温度和气体压缩因子密切相关(邓泽等,2025)。与中浅层煤层气相比,深层煤层气在高温高压条件下吸附气与游离气共存特征更加明显,游离气贡献显著增强(徐凤银等,2022;李勇等,2023)。因此,深层含气性评价不能仅沿用以吸附气为主的传统评价思路,而应综合考虑吸附气、游离气及二者之间的动态转化关系。

表 1 “六性”参数体系科学内涵  
Table 1 Scientific connotation of the “six properties” parameter system

| 六性   | 核心内涵 | 关键评价内容                 |
|------|------|------------------------|
| 地质属性 | 岩性   | 工业组分、显微组分、煤岩类型、夹矸与夹层识别 |
|      | 生烃性  | 生气能力与有机质演化             |
|      | 物性   | 储集空间与渗流能力              |
|      | 含气性  | 气体赋存与资源丰度              |
| 工程属性 | 可压性  | 岩石力学特征与可压裂性            |
|      | 应力特性 | 地应力场及其对裂缝的控制           |

### 1.5 可压性

可压性反映煤岩在外力作用下不发生明显塑性变形而发生破裂的能力,是评价储层压裂改造适应性的关键工程属性.可压性受矿物组分、有机质成熟度、煤体结构、割理密度、天然裂隙发育程度及岩石弹性参数等共同控制.一般而言,可压性较高的层段在水力压裂过程中更易起裂和延伸,有利于形成复杂裂缝网络并建立高导流通道(李小刚等,2024;林波等,2025).但煤不同于砂岩、页岩等可压性储层,其结构面和弱面发育,过高可压性或过强破碎性也可能诱发煤粉生成、裂缝支撑失效及导流能力衰减.因此,可压性评价应同时关注“易压开”和“压后有效保持”两个方面,避免简单以高可压性作为唯一有利判据.

### 1.6 应力特性

应力特性主要表征储层所处地应力场及其对压裂改造和渗流能力的控制作用,包括垂向主应力、最大水平主应力、最小水平主应力、水平应力差、应力各向异性及应力敏感性等.深煤层埋深大,地应力水平高,天然割理和裂隙在高有效应力作用下易发生闭合,导致储层渗透率降低和渗流通道有效性减弱.应力大小及其差异不仅决定人工裂缝的开启压力、延伸方向和几何形态(李小刚等,2024;高德利等,2025;林波等,2025;周立宏等,2025c),还控制压裂裂缝复杂程度、裂缝导流能力保持以及煤粉启动和运移过程.因而,应力特性是连接储层地质属性与工程改造效果的关键约束条件,应与脆性评价联合用于工程甜点识别.

## 2 “六性”参数测井响应

### 2.1 电性综合响应机制

电性响应是深煤层测井评价中反映储层多因素耦合效应的重要信息.煤岩导电性主要受煤岩骨架、孔隙流体、裂隙连通性和导电矿物共同控制.其中,煤基质和有机质通常表现为高阻特征,孔隙水、裂隙水以及黄铁矿等导电矿物可增强导电能力,降低电阻率(Feng *et al.*, 2018; Chen *et al.*, 2019; Li *et al.*, 2020; 汤小燕等, 2023; Wang *et al.*, 2024).随埋深和热演化程度增加,深煤层电性响应不再仅受含水饱和度和孔隙流体性质控制,还与有机质丰度、石墨化程度、多尺度孔裂隙结构、裂隙开闭状态和地应力作用密切相关.含气性增强通常使电阻率升高,含水裂隙连通、泥质或导电矿物增加

则使电阻率降低,裂隙闭合、应力集中和煤体结构变化可导致电阻率各向异性或局部异常.

因此,电性参数具有明显综合性和多解性,可作为岩性、生烃性、物性、含气性、脆性和应力特性测井解释的重要约束.实际评价中,应将电阻率与自然伽马、密度、声波、核磁共振、电成像、阵列声波和元素测井等资料联合应用,以提高“六性”关键参数解释精度.

### 2.2 测井综合响应特征

深煤层“六性”参数测井响应是岩性识别、储层评价、含气性判别和工程甜点预测的重要依据(表2).基于岩石物理实验、测井响应机理和勘探开发实践,各类参数主要响应特征如下.

岩性响应:煤层富含有机质,通常表现为低自然伽马、低密度、高中子孔隙度、高声波时差、低光电吸收截面指数和相对高电阻率.自然伽马( $GR$ )对泥质含量敏感,泥岩夹矸或黏土矿物含量增加时 $GR$ 值升高;密度( $DEN$ )是识别煤层的重要指标,煤的体积密度一般为 $1.2\sim 1.8\text{ g/cm}^3$ ,明显低于常见围岩;中子测井( $CNL$ )受煤中氢元素影响,常表现为异常高值;声波时差( $AC$ )通常高于围岩;光电吸收截面指数( $Pe$ )较低,可用于区分煤层与砂岩、泥岩和灰岩等岩性(乔雨朋等, 2016; 石玉江等, 2024).元素测井可提供C、O、Si、Ca、Fe等元素相对产额,用于煤岩识别、矿物组分计算和夹矸判别.

生烃性响应:生烃性主要通过有机质丰度、煤阶和热演化程度表征.元素测井可利用碳元素含量计算总有机碳含量( $TOC$ ),评价有机质丰度和生烃潜力.电阻率、声波和密度测井对有机质含量及成熟度具有间接响应,可通过多元回归或 $\Delta\lg R$ 方法建立 $TOC$ 预测模型(石玉江等, 2024; 张亮等, 2025).有机质含量较高的煤层通常表现为低密度、高声波时差和较高电阻率,但需结合岩心地球化学测试进行标定.

物性响应:物性参数包括孔隙度、渗透率、孔隙结构和裂隙发育程度.孔隙度可利用密度、声波和核磁共振测井计算;核磁共振测井可提供总孔隙度、有效孔隙度和可动流体孔隙度, $T_2$ 谱形态可反映孔径分布和流体可动性.渗透率难以由常规测井直接获得,通常基于孔隙度、可动流体参数和Coates、Timur等模型预测(秦勇等, 2014; 李夏伟等, 2018; 唐淑玲等, 2023; 石玉江等, 2024).裂隙发育层段可通过双侧向电阻

表 2 “六性”参数测井响应特征  
Table 2 Logging response characteristics of the “six properties” parameters

| 测井方法 | 主要测量参数                         | 核心响应特征与“六性”评价应用                                                                          |
|------|--------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------|
| 常规测井 | GR、DEN、CNL、AC、RT、<br>CAL、SP、Pe | 岩性识别:煤层表现为“三高(AC、CNL、RT)三低(GR、DEN、Pe)”；含气性:<br>RT升高与“气测效应”指示含气；物性:DEN、AC、CNL用于计算孔隙度      |
| 核磁共振 | T <sub>2</sub> 谱、孔隙度、可动流体      | 物性:T <sub>2</sub> 谱表征孔隙结构,评价孔隙度、渗透率；含气性:孔隙度亏损与 T <sub>1</sub> -T <sub>2</sub> 谱识别吸附气与游离气 |
| 电成像  | 动静态成像                          | 岩性/结构:识别煤体结构、层理与宏观裂隙；应力特性:井壁崩落与诱导缝指示地应力方向                                                |
| 阵列声波 | DTC、DTS、快横波方位                  | 脆性:计算动态杨氏模量与泊松比；应力特性:横波各向异性反演应力方向,结合模型预测应力大小                                             |
| 元素测井 | Si、Ca、Al、Fe、C、O等               | 岩性:定量计算矿物组成与工业组分等；生烃性:计算 TOC 等；<br>脆性:脆性矿物(石英、方解石)含量计算                                   |

率差异、电成像裂缝特征及斯通利波反射识别.

含气性响应:含气性主要表现为电阻率升高、中子-密度异常和核磁响应差异.孔隙或裂隙中的导电地层水被天然气替代后,储层导电能力降低,电阻率升高.中子-密度测井对气体敏感,含气层段在交会图上常向密度降低和中子孔隙度降低方向偏移.核磁共振测井可通过 T<sub>2</sub> 谱分布、流体组分和可动流体特征识别吸附气、游离气及含水状态,并用于总含气量预测(秦勇等,2014;李夏伟等,2018;唐淑玲等,2023).含气性评价需结合含气量测试、等温吸附实验和多测井资料综合解释.

可压性响应:可压性主要通过弹性参数和矿物组分表征.纵波时差(DTC)和横波时差(DTS)是计算动态杨氏模量、动态泊松比等岩石力学参数的基础.脆性较高的岩石通常声波传播速度较快,时差值较低,表现为高杨氏模量和低泊松比.元素测井可计算石英、方解石等脆性矿物及黏土矿物含量,用于建立矿物组分脆性指数模型.深煤层可压性评价需综合声波、密度、元素测井和岩心力学实验结果.

应力特性响应:应力特性主要依靠密度、声波、阵列声波和电成像测井表征.密度测井可通过上覆岩层密度积分获得垂向主应力剖面.声波测井提供动态弹性参数,是水平主应力计算的重要输入;结合破裂压力、孔隙压力和岩石力学模型,可利用 Eaton、Matthews & Kelly 等方法估算最大和最小水平主应力(李小刚等,2024;米洪刚等,2024;高德利等,2025;林波等,2025;赵海峰等,2025).阵列声波测井可通过快、慢横波速度差异及方位各向异性识别地应力方向.电成像测井可根据诱导缝、井壁崩落等井壁破坏特征判定水平主应力方向,并结合岩石力学模型和数值模拟开展地应力定量评价(米洪刚等,2024;赵海峰等,2025).

3 “六性”测井评价方法

基于深煤层“六性”内涵及测井响应机理,结合鄂尔多斯盆地东缘大吉区块深层煤层气储层地质特征,建立面向地质属性与工程属性协同表征的测井综合评价方法体系.该方法以岩心实验标定为基础,以常规测井、核磁共振、电成像、阵列声波和元素测井等资料为约束,分别实现岩性、生烃性、物性、含气性、可压性和应力特性的定量或半定量评价,为深煤层储层品质评价、甜点层段识别和工程部署优化提供依据.

3.1 测井系列优化

针对深层煤层气储层非均质性强、孔裂隙系统复杂、游离气贡献增强及地应力约束显著等特点,单一测井资料难以满足“六性”参数精细评价需求.本文建立“常规测井定基础、核磁共振识孔隙、元素测井判组分、电成像描裂缝、阵列声波强工程”的裸眼井测井技术系列(表3).其中,常规测井用于煤层识别与基础参数解释,核磁共振用于孔隙结构和流体赋存表征,元素测井用于矿物组分与有机质识别,电成像用于煤体结构和裂隙系统刻画,阵列声波用于岩石力学参数和地应力评价.该系列为岩性、生烃性、物性、含气性、可压性和应力特性的协同测井评价提供资料基础.

3.2 测井评价体积模型

基于体积分数守恒的测井参数反演是储层测井评价的重要方法,其核心是构建岩石组分、孔隙流体与测井响应之间的定量关系,并利用多测井资料联合约束储层参数计算(梁明星等,2013;石玉江等,2024).该方法已广泛应用于常规孔隙性储层和页岩气储层评价,但深层煤层气储层具有有机质含量高、煤岩组分复杂、孔裂隙系统多尺度发育及吸附气-游离气共存等特征,常规体积模型难以直接适用.

表 3 煤岩与页岩、常规油气储层骨架差异性  
Table 3 Matrix differences among coal, shale, and conventional oil and gas reservoirs

| 特征       | 常规油气储层          | 页岩气储层             | 煤岩储层       |
|----------|-----------------|-------------------|------------|
| 有机骨架占比   | <1%             | 5%~30%(中等)        | >80%(绝对主导) |
| 无机矿物占比   | >95%(主导)        | 70%~95%(主要)       | <20%(次要杂质) |
| 核心有机组分   | 无(干酪根可忽略)       | 干酪根(I/II型)        | 煤基质(镜质组为主) |
| 孔隙主导类型   | 粒间孔/溶蚀孔(>50 nm) | 有机孔+无机孔(5~100 nm) | 微孔(<2 nm)  |
| 流体赋存主导形式 | 游离态(100%)       | 吸附态(30%~60%)+游离态  | 吸附态(>80%)  |

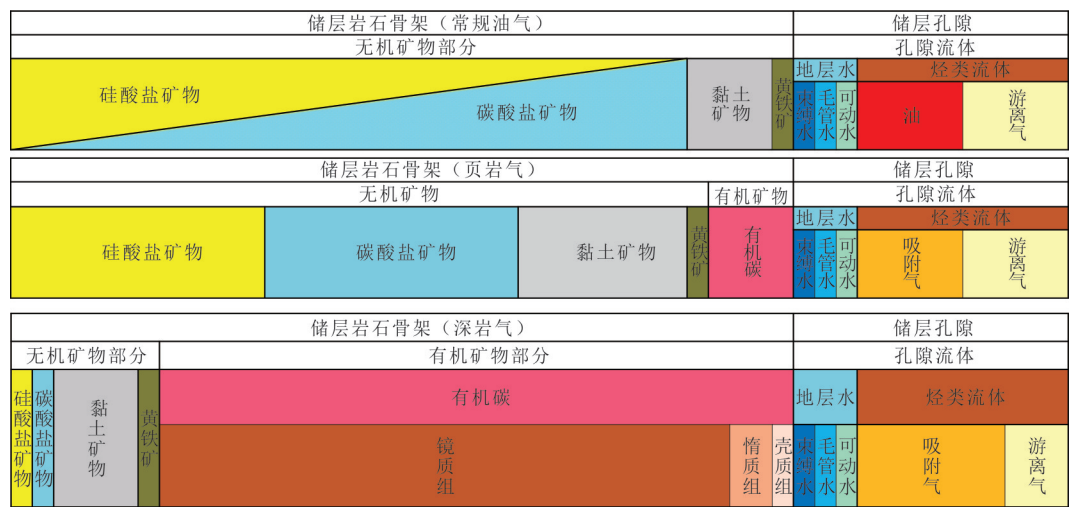


图 1 煤层气与常规油气储层和页岩储层体积模型对比

Fig.1 Comparison of volumetric models among coalbed (coal rock) gas, conventional oil and gas reservoirs, and shale reservoirs

针对深煤层储层特征,本文构建了由有机显微组分、无机矿物和孔隙流体三类基本单元组成的测井评价体积模型(图1)。其中,有机显微组分包括镜质组、惰质组和类脂组;无机矿物包括硅酸盐矿物、碳酸盐矿物、黏土矿物和黄铁矿;孔隙流体包括地层水和烃类流体。模型以体积分数守恒为基础。

3.3 关键参数评价方法

3.3.1 岩性评价 岩性评价是深层煤层气储层的基础性工作,主要包括煤层的识别、煤岩类型的划分及煤体结构的评估。深煤层岩性复杂,顶底板岩性变化较大,且纵向分布不均,传统的测井评价方法已难以满足精细化勘探和开发的需求。通过综合应用常规测井、元素测井和交会图法,可以有效提高岩性识别的准确性和精度。

(1)岩性精细识别。煤层识别主要依赖于常规测井敏感参数(如自然伽马、密度、声波时差等)与交会图法、元素测井相结合。煤层在常规测井中具有典型的“三高两低”特征,即高电阻率、高声波时差、高补偿中子,以及低自然伽马和低补偿密度(图2、表4)(刘之的等,2015;石玉江等,2024;王舵等,

2024;周立宏等,2025c)。其中,自然伽马和元素测井可有效识别煤层的泥质含量和矿物组分,密度和声波测井则可区分煤层和围岩,电阻率和中子测井有助于辅助判别煤层的含气性。结合交会图法,可进一步提升岩性识别的准确度,克服单一测井方法的多解性问题,从而实现煤层、夹矸与围岩的精细划分。

(2)宏观煤岩类型判别。宏观煤岩类型的划分主要依据煤岩的有机质丰度、矿物含量及裂隙发育程度。煤岩类型的测井响应受煤阶、成煤物质组成及演化程度的影响(刘之的等,2015;石玉江等,2024;王舵等,2024;周立宏等,2025c)。光亮煤通常表现为低密度、高声波时差、高电阻率和低自然伽马,主要是由于镜质组含量高,灰分低;而暗淡煤则呈现较高的密度、低声波时差、低电阻率和高自然伽马,这与惰质组含量较高以及黏土矿物的增多密切相关(图3)。针对鄂尔多斯盆地大吉区块的高煤阶煤岩,选取GR、DEN、AC、RD、静态杨氏模量( $E_s$ )和静态泊松比( $V_s$ )等参数,构建宏观煤岩类型指数 $H_{gmy}$ ,实现了煤岩类型的有效判别(表5、图4)。

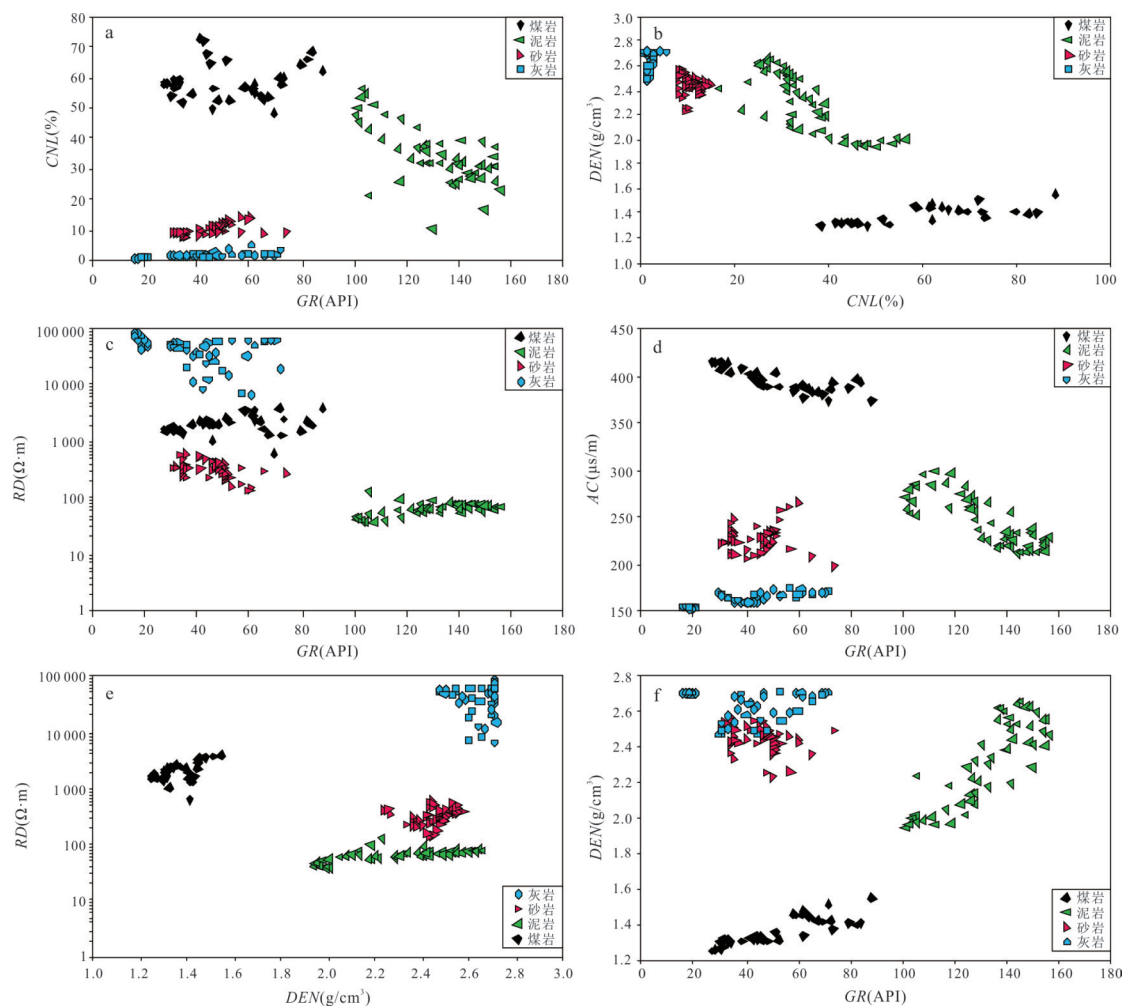


图 2 测井曲线参数交会识别岩性  
Fig.2 Lithology identification using crossplots of logging parameters

表 4 不同岩性测井参数响应特征

| 测井参数岩性 | 电阻率(Ω·m)    | 自然伽玛(API)   | 补偿密度(g/cm³) | 补偿中子(%)   | 声波时差(μs/m)  |
|--------|-------------|-------------|-------------|-----------|-------------|
| 煤层     | 100~3 000   | 15.0~100.0  | 1.20~1.60   | 40.0~60.0 | 350.0~450.0 |
| 泥岩     | 5.0~40.0    | 150.0~300.0 | 2.15~2.76   | 20.0~55.0 | 200.0~330.0 |
| 砂岩     | 40.0~200.0  | 18.0~110.0  | 2.35~2.79   | 2.5~20.0  | 197.0~260.0 |
| 灰岩     | 200.0~2 000 | 18.0~95.0   | 2.50~2.88   | 0~7.0     | 150.0~200.0 |

$$H_{\text{gmy}} = \frac{\lg(RD) \cdot AC \cdot V_s}{DEN^2 \cdot GR \cdot E_s}, \quad (1)$$

式中： $H_{\text{gmy}}$ 为宏观煤岩类型判别指数，无量纲； $RD$ 为深侧向电阻率， $\Omega \cdot \text{m}$ ； $AC$ 为声波时差， $\mu\text{s}/\text{m}$ ； $V_s$ 为静态泊松比，无量纲； $DEN$ 为补偿密度， $\text{g}/\text{cm}^3$ ； $GR$ 为自然伽马，API； $E_s$ 为静态杨氏模量，GPa。

(3)煤体结构评价.煤体结构对深层煤岩气储层的改造潜力与产能具有重要影响.煤体结构的差

表 5 深层煤层气储层宏观煤岩类型判别标准

| 宏观煤岩类型 | 宏观煤岩类型判别指数     |
|--------|----------------|
| 光亮煤    | $>0.6$         |
| 半亮煤    | $0.4 \sim 0.6$ |
| 半暗煤    | $0.2 \sim 0.4$ |
| 暗淡煤    | $<0.2$         |

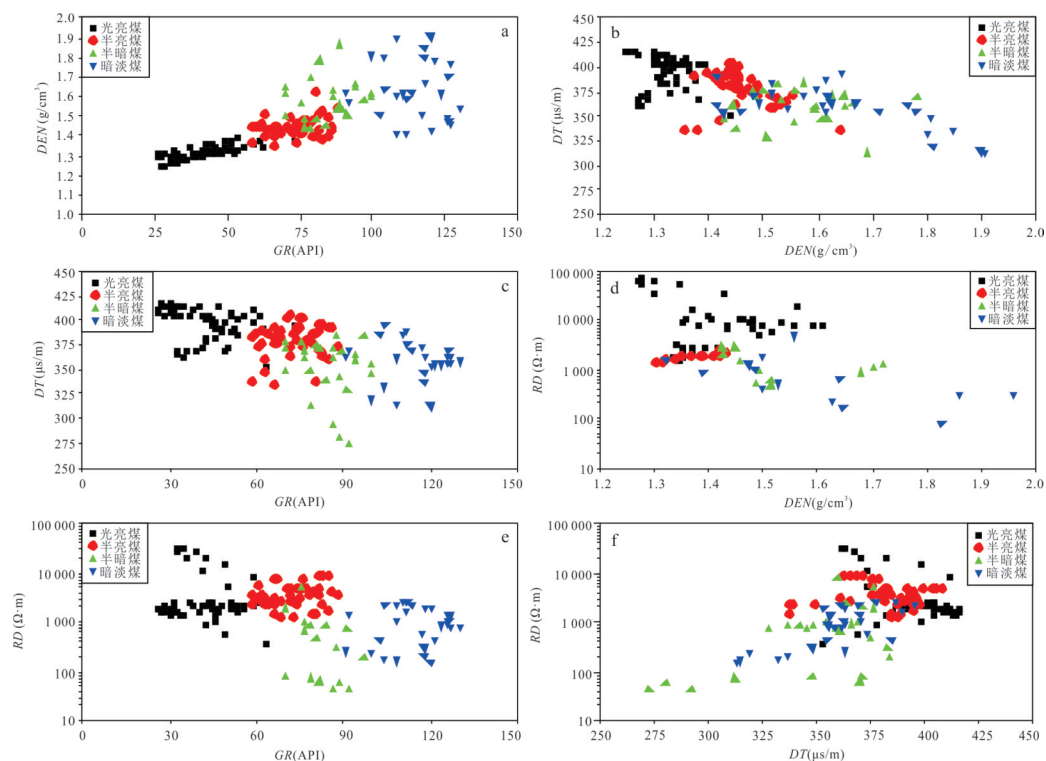


图3 宏观煤岩类型测井交会识别图版

Fig.3 Well-log crossplots for macrolithotype identification

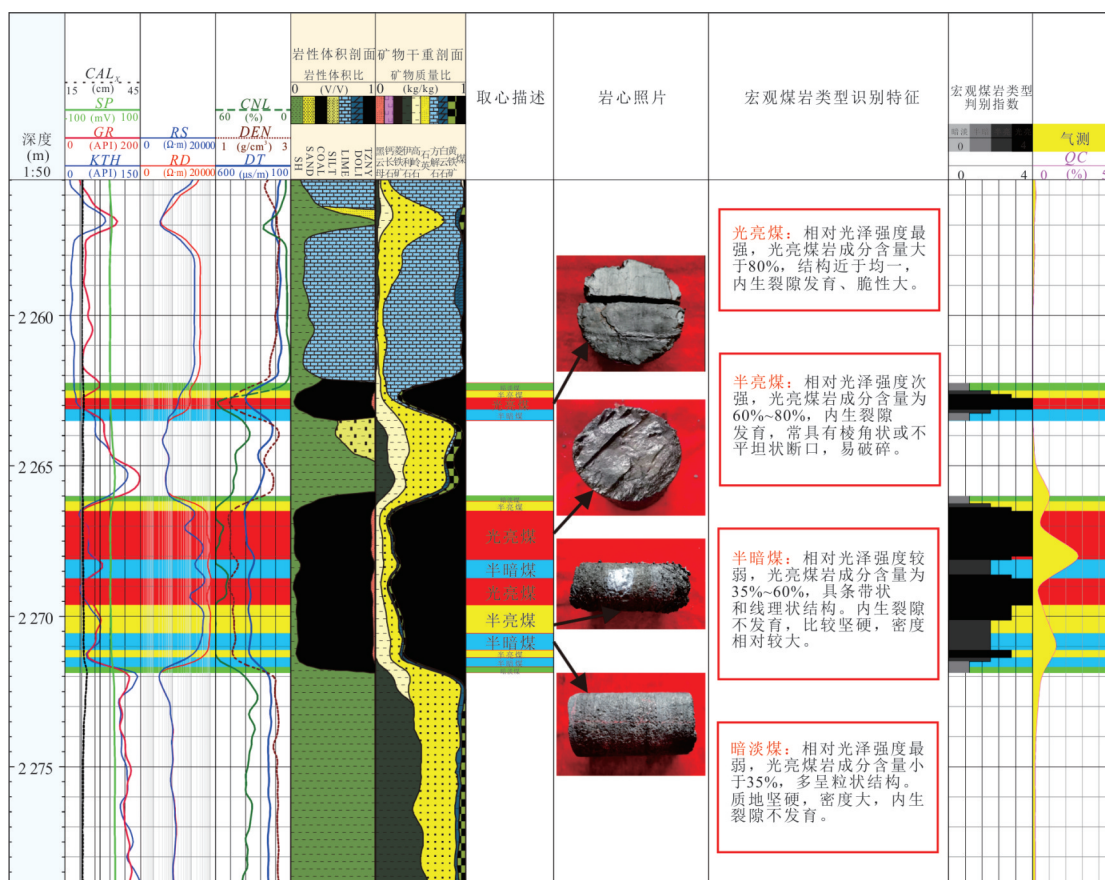


图4 宏观煤岩类型测井定性与定量识别成果

Fig.4 Qualitative and quantitative identification results of macrolithotypes from well logs

异直接决定了储层的渗透性、孔隙度和压裂改造的适应性(刘之的等, 2015; 石玉江等, 2024; 王舵等, 2024; 龚飞等, 2025; 周立宏等, 2025b, 2025c; 陈峥嵘等, 2026). 原生结构煤受构造运动影响较小, 煤质较纯, 基质致密, 表现为较高的密度、较低的自然伽马和较低的声波时差; 碎裂煤则由于外生裂隙的发育, 孔隙度较大, 煤基质破碎, 密度显著降低. 随着煤体破碎程度的增加, 煤层的密度降低, 声波时差增大, 呈现出低密度、高  $GR$  的特征. 大吉区块主要由原生结构煤和碎裂结构煤组成, 破碎程度低, 具备较好的压裂改造潜力.

基于煤岩岩心分析, 将煤体结构划分为四级(I类原生结构煤至IV类糜棱煤). 通过测井参数与岩心数据统计, 构建以地质强度因子( $GSi$ )为核心的定量评价模型. 选取双井径扩径率、 $GR$ 、 $DEN$ 及双侧向电阻率幅度差( $\Delta RT$ )作为敏感参数, 建立  $GSi$  计算公式如下:

$$GSi = 92.3997 - 0.16205 \cdot GR - 1.45888 \cdot \frac{CAL_X + CAL_Y}{2} + 0.002938 \cdot \Delta RT + 7.8895, \quad (2)$$

式中,  $GR$  为自然伽马值, API;  $CAL_X$ 、 $CAL_Y$  为 X-Y 方向双井径值, cm;  $\Delta RT$  为深浅侧向电阻率幅度差,  $\Omega \cdot m$ ;  $DEN$  为补偿密度,  $g/cm^3$ .

**3.3.2 生烃性** 生烃性是评价深层煤岩气储层资源潜力与开发价值的核心参数. 测井评价需综合考虑有机质丰度、热演化程度及生烃潜力等多维度指标. 深层煤层气生烃性测井评价的关键参数以评价煤岩显微组分和总有机碳含量为主.

热演化程度是影响煤层生气量的核心要素, 但对于相同或相近煤阶的煤层, 煤岩显微组分是生烃性测井评价的关键参数, 并且该参数与总有机碳含量之间密切相关. 煤岩显微组分主要包括镜质组、惰质组和类脂组三大类. 类脂组生烃能力最强, 但其含量较低; 镜质组生烃能力较强且含量高, 是主要的生烃贡献者; 惰质组生烃能力最弱, 含量也较低. 根据岩心实验和测井数据分析, 选用  $AC$  和  $GR$  测井曲线, 通过岩心刻度建立显微组分测井解释模型, 计算公式为:

$$VIT = 0.2318 \cdot AC - 0.1658 \cdot GR + 2.733, \quad (3)$$

$$INE = -0.9715 \cdot VIT + 96.784, \quad (4)$$

$$LIP = 100 - VIT - INE, \quad (5)$$

式中,  $VIT$  为镜质组体积分数, %;  $INE$  为惰质组体积分数, %;  $LIP$  为类脂组体积分数, %.

$TOC$  是评价烃源岩生烃潜力的关键参数. 常规测井曲线中,  $GR$  与  $DEN$  对有机质响应敏感, 富有机质层段通常表现为低  $GR$  值 ( $< 80$  API) 和低  $DEN$  值 ( $< 1.5 g/cm^3$ ), 其响应机制与有机质对伽马射线的吸收差异以及孔隙度效应相关. 针对深层煤岩强非均质性, 采用元素测井直接测量地层中的碳元素总含量 ( $C_{total}$ ), 总有机碳含量通过从  $C_{total}$  中扣除无机碳 (主要存在于碳酸盐矿物中) 得到 (图 5). 具体计算公式为:

$$TOC = \frac{MW_C}{MW_{COAL}} \cdot [C_{total} - (C_{carb} \cdot W_{carb})], \quad (6)$$

式中,  $TOC$  为总有机碳含量, %;  $MW_C$  和  $MW_{COAL}$  分别为碳和煤的分子量, 无量纲;  $C_{total}$  为总碳质量分数, %;  $C_{carb}$  碳酸盐矿物中的碳含量质量分数, %;  $W_{carb}$  为元素测井中计算的碳酸盐矿物质量分数, %.

**3.3.3 物性评价** 深煤层受成岩作用、构造应力和流体运移等因素影响, 骨架密度表现出显著的非均质性. 传统的固定骨架密度模型难以准确计算煤岩储层的物性参数(刘之的等, 2015; 张雷等, 2023; 石玉江等, 2024; 王舵等, 2024; 周立宏等, 2025b, 2025c; 龚飞等, 2025; 唐书恒等, 2025; 陈峥嵘等, 2026). 为此, 本文构建了变骨架孔隙度模型, 并结合常规测井和元素测井数据, 通过多参数耦合建模与动态响应分析, 建立了基于元素测井的变骨架孔隙度计算模型, 以求取煤层在原位状态下的孔隙度.

$$\rho_{ma} = \sum_{i=1}^n V_i \cdot \rho_{ma,i}, \quad (7)$$

$$\phi = \frac{\rho_{ma} - \rho_b}{\rho_{ma} - \rho_f} \cdot \frac{1}{\frac{K_{ma}}{K_f} - 1}, \quad (8)$$

式中,  $\rho_{ma}$  为煤岩基质骨架密度,  $g/cm^3$ ;  $V_i$  为矿物  $i$  的组分体积百分含量, %;  $\rho_{ma,i}$  为矿物  $i$  的骨架密度,  $g/cm^3$ ;  $\phi$  为煤岩储层孔隙度, %;  $\rho_b$  为测井测量的补偿密度值,  $g/cm^3$ ;  $\rho_f$  为地层流体密度,  $g/cm^3$ ;  $K_{ma}$  与  $K_f$  分别为干燥煤岩骨架和流体的体积模量, GPa.

采用变骨架密度法计算的孔隙度结果表明, 大吉区块深层煤岩气储层孔隙度范围为 2.18%~9.42%, 平均值为 5.06%. 计算结果与岩心实验测试孔隙度高度吻合, 能够准确反映煤岩储层在纵向上的孔隙度变化 (图 6).

渗透率主要受煤阶、煤质、裂缝发育程度、煤体结构及原地应力等因素的影响, 通过“孔隙+裂隙”双孔介质系统共同作用于渗流能力. 根据测井数据和煤岩实验样品测试, 结合深侧向电阻率和自然伽

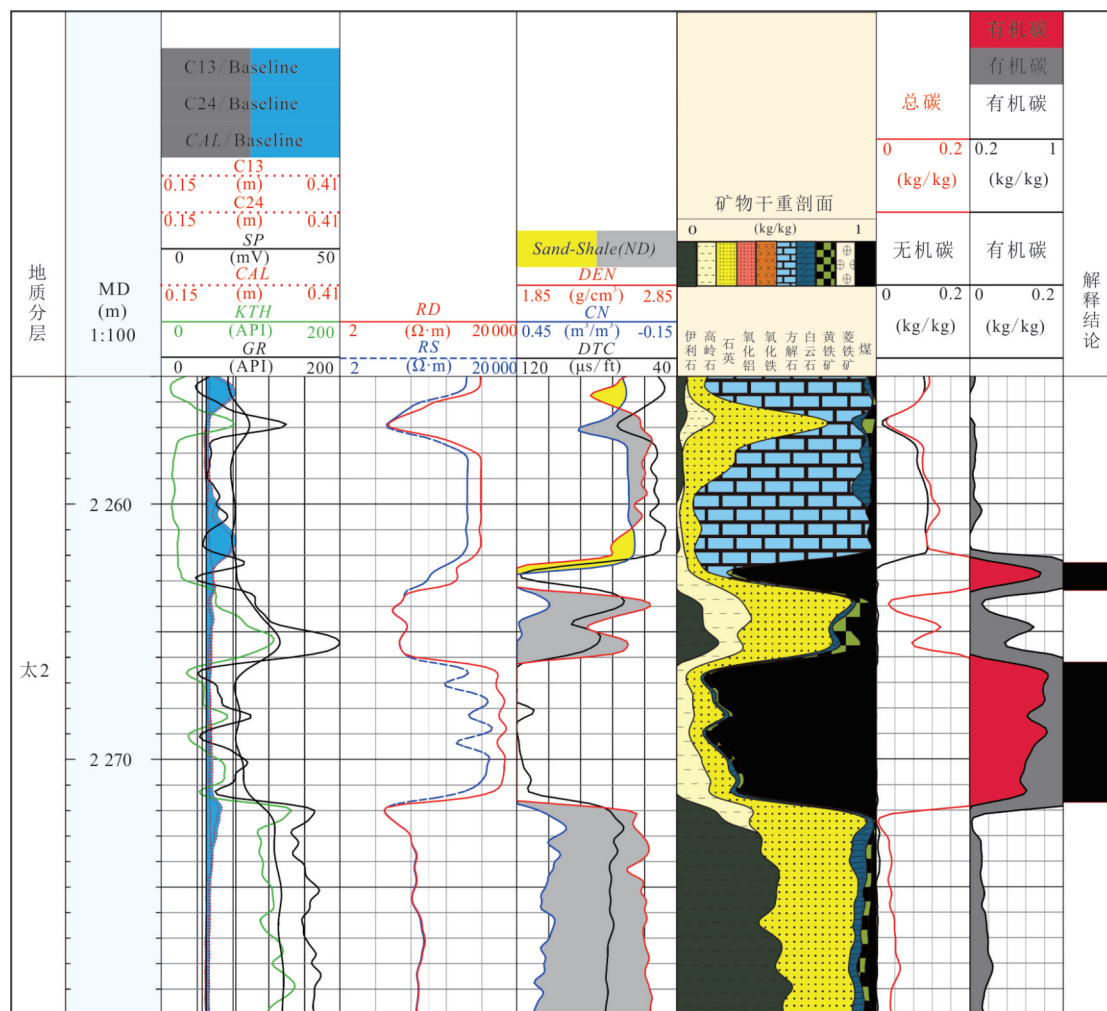


图5 煤层总有机碳含量测井表征

Fig.5 Well-log characterization of total organic carbon (TOC) content in coals

马测井曲线,本文构建了煤储层渗透率计算模型,具体公式为:

$$K = 0.008 \cdot (0.8 + 0.2 \cdot \frac{RD}{RD_{base}}) \cdot e^{-0.015 \cdot GR}, \quad (9)$$

式中,  $K$  为煤岩储层渗透率,  $mD$ ;  $RD$  为深侧向电阻率,  $\Omega \cdot m$ ;  $RD_{base}$  为纯煤层深侧向电阻率基准值(一般取  $50 \sim 80 \Omega \cdot m$ ),  $\Omega \cdot m$ ;  $GR$  为自然伽马测井值,  $API$ .

渗透率计算结果与实验测试数据吻合较好,能够较为准确地反映煤岩储层静态渗透率在纵向上的变化(图6)。

**3.3.4 含气性** 深煤层富含游离气,与吸附气的相对比例随埋深、温度、压力及岩石成熟度显著变化.传统的吸附气评价模型难以全面描述含气性,因此需结合多种测井敏感参数,构建综合评价方法模型.核磁共振测井技术通过量化孔隙流体的弛豫特性,为含气性评价提供了关键数据支持.大吉区块多个煤岩样品的等温吸附-核磁共

振联测实验结果表明,该区块煤岩气储层的吸附气占比为  $82\% \sim 87\%$ ,游离气占比为  $13\% \sim 18\%$ ,与保压取心测试成果一致(图7).根据二维核磁共振解释吸附孔隙部分的孔容与含气性关系,建立了吸附气含量计算模型.游离气含量则通过二维核磁共振解释的游离孔隙部分,结合气体状态方程进行定量计算.具体计算公式为:

$$\text{吸附气含量: } V_{ab} = A \cdot 620 \cdot \frac{\varphi_{ab}}{\rho_b}, \quad (10)$$

$$\text{游离气含量: } V_{fr} = B_g \cdot \frac{\varphi_{fr}}{\rho_b}, \quad (11)$$

$$\text{总含气量: } V_{gas} = V_{ab} + V_{fr}, \quad (12)$$

式中,  $V_{ab}$  为吸附气含量,  $m^3/t$ ;  $A$  为地区校正系数,无量纲;  $\varphi_{ab}$  为吸附气孔隙度,  $\%$ ;  $\rho_b$  为煤层视密度,  $g/cm^3$ ;  $V_{fr}$  为游离气含量,  $m^3/t$ ;  $B_g$  为气体压缩系数,无量纲;  $\varphi_{fr}$  为核磁共振测井计算的煤储层游离气

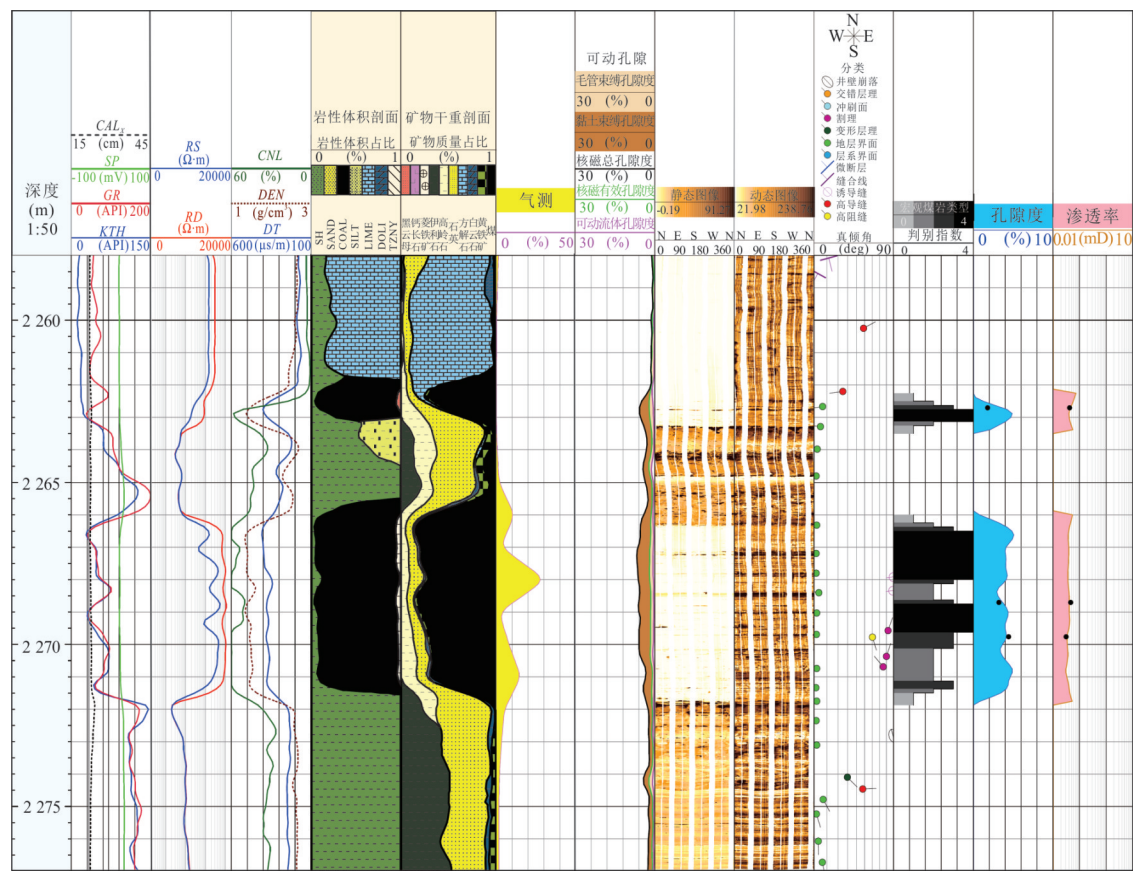


图6 深层煤层气储层孔隙度、渗透率测井综合评价成果

Fig.6 Integrated well-log evaluation of porosity and permeability in deep coalbed methane reservoirs

孔隙度，%； $V_{\text{gas}}$  为总含气量， $\text{m}^3/\text{t}$ 。

运用核磁共振测井技术计算的深层煤层气含气量结果显示，大吉区块游离气占比10%~20%，总含气量计算结果在25~36  $\text{m}^3/\text{t}$ 之间，与保压取心样品测试结果吻合度高(图8)。

深层煤层气储层通常含水率极低，但在靠近构造断裂带的区域，顶板灰岩和底板砂岩可能存在滞留水，且在构造变化或压裂生产过程中容易与含水层沟通(李夏伟等，2018；石玉江等，2024；王舵等，2024)。因此，气层与气水同层的精准识别及测井评价对于产能预测和开发方案优化至关重要。气层与气水同层在测井响应上有显著差异。气层具有低DEN、低GR、高CNL、高AC和高感应电阻率(M2RX)的特征；而气水同层则表现为电阻率与声波时差呈负相关，电阻率更低。利用敏感测井曲线交会图法，能够有效识别储层中的气层和气水同层(图9)。

**3.3.5 可压性评价** 可压性是决定煤气储层压裂改造效果的关键岩石力学属性。准确表征深层煤储层的可压性，不仅有助于压裂层段优选，还为体积压

裂设计优化提供关键依据。传统的可压性评价方法主要依赖声波测井推算弹性参数或基于矿物组成的经验公式，单一方法难以兼顾连续性和定量精度(刘之的等，2015；李小刚等，2024；石玉江等，2024；王舵等，2024；高德利等，2025；林波等，2025)。随着元素测井技术的成熟，能够实时获取岩屑的化学组成，为矿物组分估算提供了更精确的支持。

可压性评价主要考虑以下3个关键维度：①岩性控制(镜质组含量、黏土矿物类型)；②矿物组成(石英、长石、方解石含量)；③力学特性(杨氏模量、泊松比)。通过测井数据与岩心实验结果标定，建立了相应的参数体系。

动态力学参数与静态参数的差异主要源于煤岩的非均质性、裂隙发育程度、煤岩矿物组成等。基于大吉区块深层煤岩样品三轴压缩实验以及岩电实验，结合测井数据，建立杨氏模量( $E_s$ )与泊松比( $V_s$ )计算模型以及动静态参数转换关系。具体计算模型为：

$$E_d = \frac{\rho_b(3\Delta t_s^2 - 4\Delta t_p^2)}{10^6}, \tag{13}$$

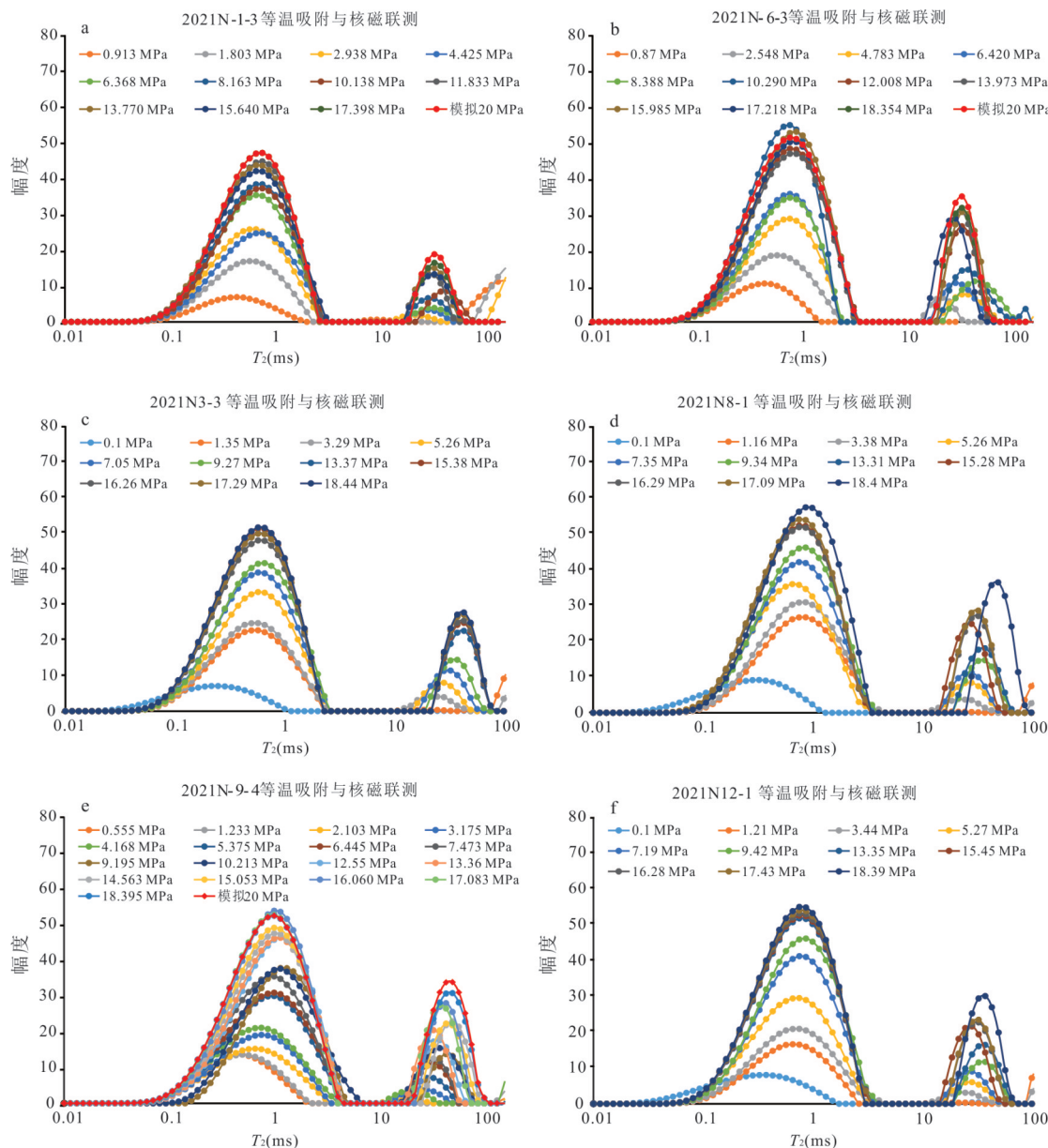


图7 深层煤岩样品等温吸附-核磁共振联测实验

Fig.7 Combined isothermal adsorption and nuclear magnetic resonance (NMR) measurements on deep coal samples

$$V_d = \frac{\Delta t_s - 2\Delta t_p}{2(\Delta t_s - \Delta t_p)}, \quad (14)$$

$$E_s = E_d \cdot e^{-0.0003T + 0.0005P}, \quad (15)$$

$$V_s = V_d + 0.05 \cdot \ln \varphi, \quad (16)$$

式中,  $E_d$  为动态杨氏模量, GPa;  $\rho_b$  为地层密度,  $g/cm^3$ ;  $\Delta t_s$  为横波时差,  $\mu s/m$ ;  $\Delta t_p$  为纵波时差,  $\mu s/m$ ;  $V_d$  为动态泊松比, 无量纲;  $E_s$  为静态杨氏模量, GPa;  $T$  为地层温度,  $^{\circ}C$ ;  $P$  为地层压力, MPa;  $V_s$  为静态泊松比, 无量纲;  $\varphi$  是孔隙度, %.

基于测井数据, 选择常规测井与阵列声波以及元素测井, 综合考虑岩性组合、矿物组分

及力学特性, 构建适用于深层煤储层的可压性指数计算模型, 公式为:

$$BI = 0.4 \cdot \frac{E_s - E_{\min}}{E_{\max} - E_{\min}} + 0.3 \cdot \frac{V_{\max} - V_s}{V_{\max} - V_{\min}} + 0.3 \cdot \frac{V_{\text{crtz}} + 2V_{\text{qtz}}}{2}, \quad (17)$$

式中,  $BI$  为脆性指数, 无量纲;  $E_s$  为静态杨氏模量, GPa;  $E_{\max}$ 、 $E_{\min}$  分别为研究区内静态杨氏模量最大、最小值, GPa;  $V_s$  为静态泊松比, 无量纲;  $V_{\max}$ 、 $V_{\min}$  分别为研究区内静态泊松比最大、最小值, 无量纲;  $V_{\text{crtz}}$  为长石类矿物体积分数, %;  $V_{\text{qtz}}$  为石英矿物体积分数, %.

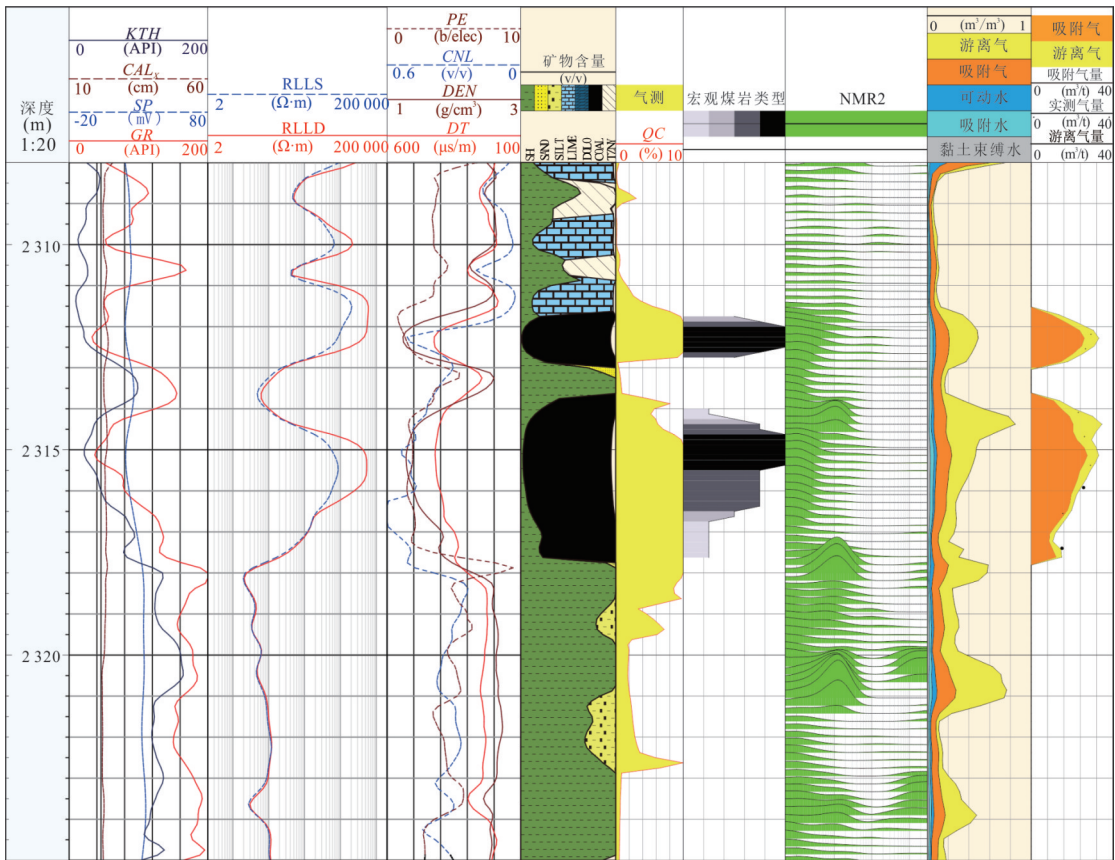


图 8 深层煤储层测井解释含气量成果

Fig.8 Well-log interpretation results of gas content in deep coal reservoirs

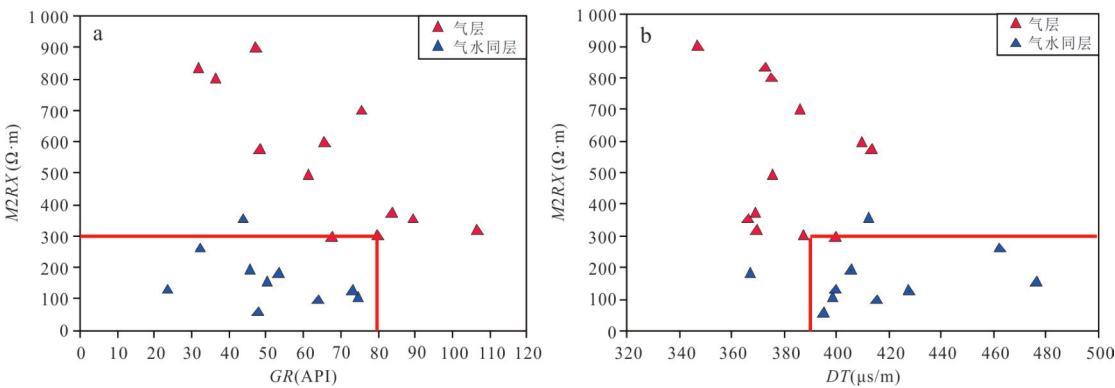


图 9 深层煤储层含气含水测井识别图版

Fig.9 Well-log crossplots for gas-water identification in deep coal reservoirs

表 6 深层煤岩气储层脆性评价理论基础与参数体系

| Table 6 Theoretical basis and parameter framework for brittleness evaluation in deep coal reservoirs |                                           |             |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------|-------------|
| 参数类型                                                                                                 | 测井响应参数                                    | 物理意义        |
| 常规测井                                                                                                 | 自然伽马( $GR$ )                              | 泥质含量与成熟度指示  |
|                                                                                                      | 补偿密度( $DEN$ )                             | 体积密度与孔隙度计算  |
| 伽马能谱测井                                                                                               | 钾(K)、钍(Th)、铀(U)含量                         | 有机质与放射性矿物指示 |
| 阵列声波测井                                                                                               | 纵波时差( $\Delta t_p$ )、横波时差( $\Delta t_s$ ) | 孔隙度与岩性表征    |
| 元素测井                                                                                                 | 硅(Si)、铝(Al)、钙(Ca)含量                       | 矿物组分定量表征    |

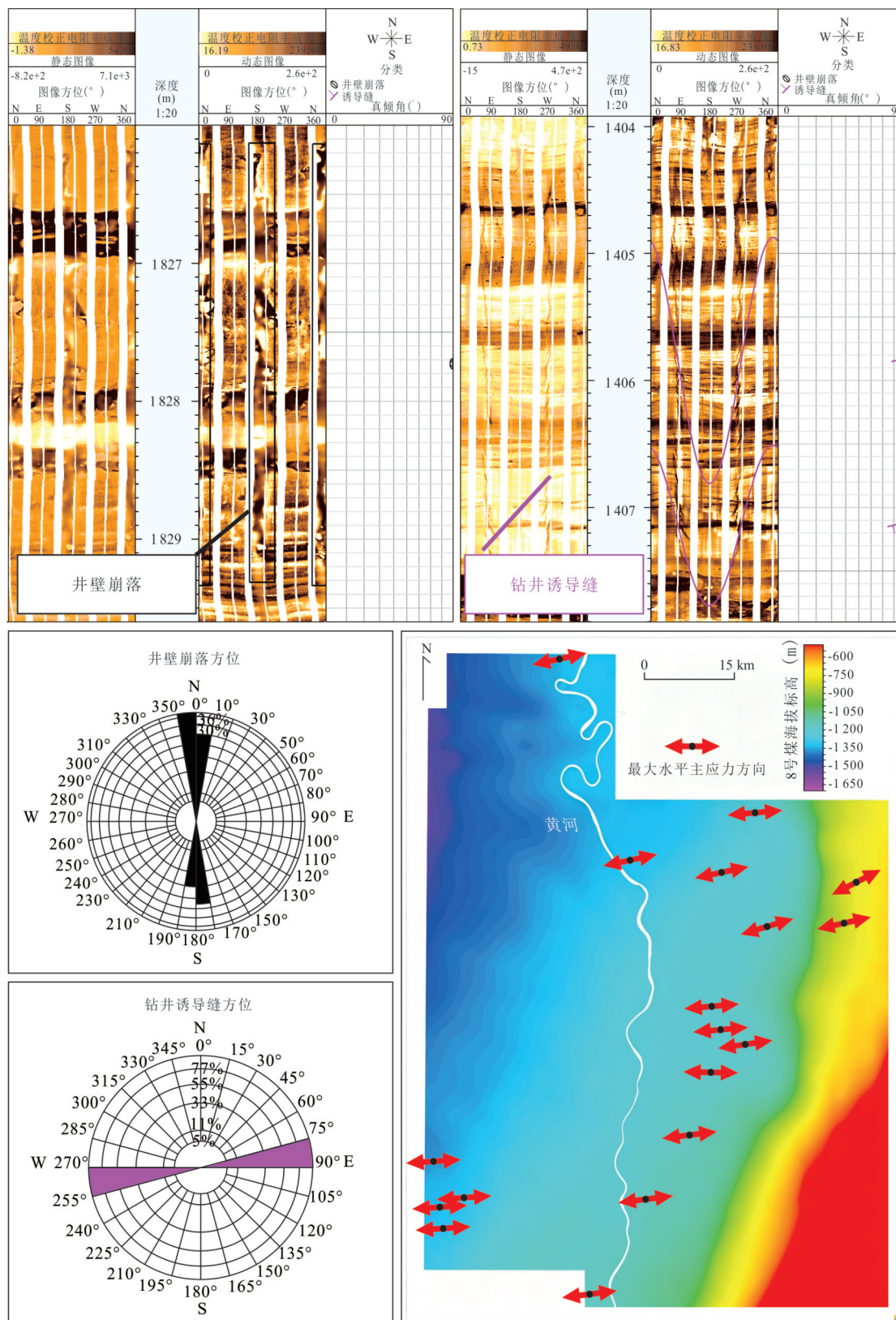


图 10 大吉区块深层煤层气“成像+声波”测井的双轨联动地应力评价成果

Fig.10 Integrated evaluation results of in-situ stress from image and sonic logs in the Daji Block deep coalbed methane reservoirs

**3.3.6 地应力评价** 地应力方向的确定主要依赖岩石在应力作用下的变形特征.对于垂直井眼,

地层在最大水平主应力方向发生压实,导致岩石致密化;而在最小水平主应力方向,由于应力

释放,易形成井壁崩落或钻井诱导缝(李小刚等,2024;米洪刚等,2024;石玉江等,2024;高德利等,2025;林波等,2025;赵海峰等,2025)。

电成像测井能够获取井壁崩落椭圆长轴方向及天然裂缝产状(米洪刚等,2024;赵海峰等,2025)。井壁崩落是岩石在钻井过程中由于应力集中而发生剪切破坏的直观表现,其长轴方向平行于最小水平主应力方向,短轴方向则指示最大水平主应力方向。钻井诱导裂缝,包括应力释放缝、重泥浆压裂缝及钻具振动缝,其走向受地应力场控制。应力释放缝呈雁列状分布,重泥浆压裂缝的延伸方向垂直于最大水平主应力方向,二者均指向最小水平主应力方向。

偶极子阵列声波测井适用于各向同性、脆性地层。在无显著层理或天然裂隙、井眼无扩径的条件下,通过横波分裂现象反演地应力方向。对于应力非均衡或裂缝发育的各向异性地层,横波传播会产生分裂,形成快横波与慢横波两个偏振分量。快横波的偏振方位平行于最大水平主应力方向或裂缝走向,且传播速度显著高于慢横波。通过分析快慢横波的分裂方位,可验证并修正成像解释结果,提升评价准确性。

基于大吉区块18口探评井的电阻率成像测井资料分析,发现大吉区块深层煤层气开发区的地应力方向为近东西方向,最大水平主应力方向平均为81°。在东侧复杂构造区,如大吉68井区,地应力方向发生偏转,趋向北东东方向。推测该现象与局部构造快速抬升及褶曲边部侧向应力增加有关,边界附加应力叠加后,地应力方向局部发生了偏转(图10)。

地应力大小是压裂设计、井壁稳定性分析及断层活动性评价的关键参数。现有的水平地应力计算模型主要由两部分构成:一部分计算上覆岩层压力,另一部分预测地质构造活动引起的构造应力。针对鄂尔多斯盆地东缘深层煤层气储层的地质和构造特征,综合考虑煤岩及其顶底板的泊松比、弹性模量、地层孔隙压力及构造作用对地应力的影响,采用组合弹簧模型,结合多测井数据,通过注入/压降试井分析、岩心岩石力学实验及刻度测井方法进行验证,建立地应力大小的计算模型。具体计算公式为:

$$P_0 = \rho_{\text{平均}} h_0 g + \int_{h_0}^h \rho g dh, \quad (18)$$

$$\sigma_h = \frac{\nu}{1-\nu} (\sigma_v - \alpha P_p) + \frac{E \epsilon_h}{1-\nu^2} + \frac{\nu E \epsilon_H}{1-\nu^2} + \alpha P_p, \quad (19)$$

$$\sigma_H = \frac{\nu}{1-\nu} (\sigma_v - \alpha P_p) + \frac{E \epsilon_H}{1-\nu^2} + \frac{\nu E \epsilon_h}{1-\nu^2} + \alpha P_p, \quad (20)$$

式中, $P_0$ 为上覆岩层压力,MPa; $h_0$ 为起始深度(密度测井值深度),m; $\rho$ 为岩石体积密度,g/cm<sup>3</sup>;g为重力加速度,一般取9.8 m/s<sup>2</sup>; $\rho_{\text{平均}}$ 为起始深度以上的岩层平均密度,g/cm<sup>3</sup>; $\sigma_H$ 、 $\sigma_h$ 为最大、最小水平主应力,MPa; $\sigma_v$ 为垂向主应力,MPa; $\nu$ 为泊松比,无量纲; $E$ 为杨氏模量,GPa; $\epsilon_h$ 、 $\epsilon_H$ 分别为最小、最大水平主应力方向上的应变系数,在同一断块内为常数,无量纲; $\alpha$ 为Biot系数,无量纲; $P_p$ 为地层孔隙压力,MPa。

## 4 应用实例与效果分析

测井综合评价是资源勘探开发的重要环节,单一测井信息无法满足复杂储层精细表征与工程甜点判识的需求。基于多物理场耦合的测井综合评价技术,通过集成常规测井与多种特殊测井信息,构建了深层煤层气储层“六性”关系测井表征与关键参数测井综合评价方法体系。结合大吉区块深层煤岩气储层地质特点,开展多维度测井数据融合与多学科交叉分析,提出了基于“六性”关系的储层测井综合评价分类标准(表7),并将储层划分为I、II、III类。I类优质煤岩气储层特征包括低灰分、高镜质组含量,主要由光亮煤组成,煤体结构以原生结构煤为主,煤层厚度超过5 m,总含气量大于20 m<sup>3</sup>/t,顶底板由灰岩、煤和泥岩组成,两向水平应力差约2 MPa,电性特征为高阻-高时差型,气体绝缘效应强,裂缝发育良好。

以大吉区块大吉X井为例(图11),井下数据分层显示,第一道为地质分层道;第二道为深度道;第三道为电性相关测井曲线,包括常规测井、伽马能谱测井、深浅侧向电阻率测井曲线;第四道为岩性、生烃性、含气性评价的关键参数成果;第五道为电性和物性解释成果,主要包括电成像、核磁共振及元素测井;第六道为可压性和应力特性解释成果;第七道为煤岩气储层分类。基于“六性”关系的测井综合评价结果显示,该井煤层厚度大,总含气量平均为26.7 m<sup>3</sup>/t,与保压取心测试结果高度吻合。储层分类结果为:I类煤岩气储层厚度3.0 m,II类储层1.8 m,III类储层2.6 m。解释结果有效指导了压裂

表 7 基于“六性”关系的深层煤层气储层测井综合评价分类指标

Table 7 Classification criteria for comprehensive well-log evaluation of deep coalbed methane reservoirs based on the six-property relationships

| 评价参数 |                         | 评价指标    |         |         |
|------|-------------------------|---------|---------|---------|
|      |                         | I 类     | Ⅱ 类     | Ⅲ 类     |
| 岩性   | 灰分                      | <15%    | 15~30%  | >30%    |
|      | 镜质组                     | >70%    | 50~70%  | <50%    |
|      | 宏观煤岩类型                  | 光亮煤     | 光亮煤+半亮煤 | 半亮煤+半暗煤 |
|      | 煤岩厚度(m)                 | >5.0    | 5.0~3.0 | <3.0    |
|      | 顶底板岩性组合                 | 灰-煤-泥组合 | 泥-煤-泥组合 | 砂-煤-泥组合 |
| 生烃性  | 镜质体反射率 $R_{o,max}$ (%)  | 1.9~4.0 | 1.9~2.5 | <1.9    |
|      | $TOC$ (%)               | >70     | 50~70   | <50     |
| 物性   | 孔隙度 (%)                 | >5.0    | 3.0~5.0 | <3.0    |
|      | 渗透率(mD)                 | >0.2    | 0.1~0.2 | <0.1    |
| 含气性  | 总含气量(m <sup>3</sup> /t) | >20     | 15~20   | <15     |
| 可压性  | 煤体结构                    | 原生-碎裂   | 碎裂-碎粒   | 碎粒-糜棱   |
|      | 脆性指数                    | >40     | 25~40   | <25     |
| 应力特性 | 顶板应力差(MPa)              | >15     | 10~15   | <10     |
|      | 底板应力差(MPa)              | >10     | 7~10    | <7      |
|      | 两向应力差(MPa)              | <2      | 2~4     | >4      |

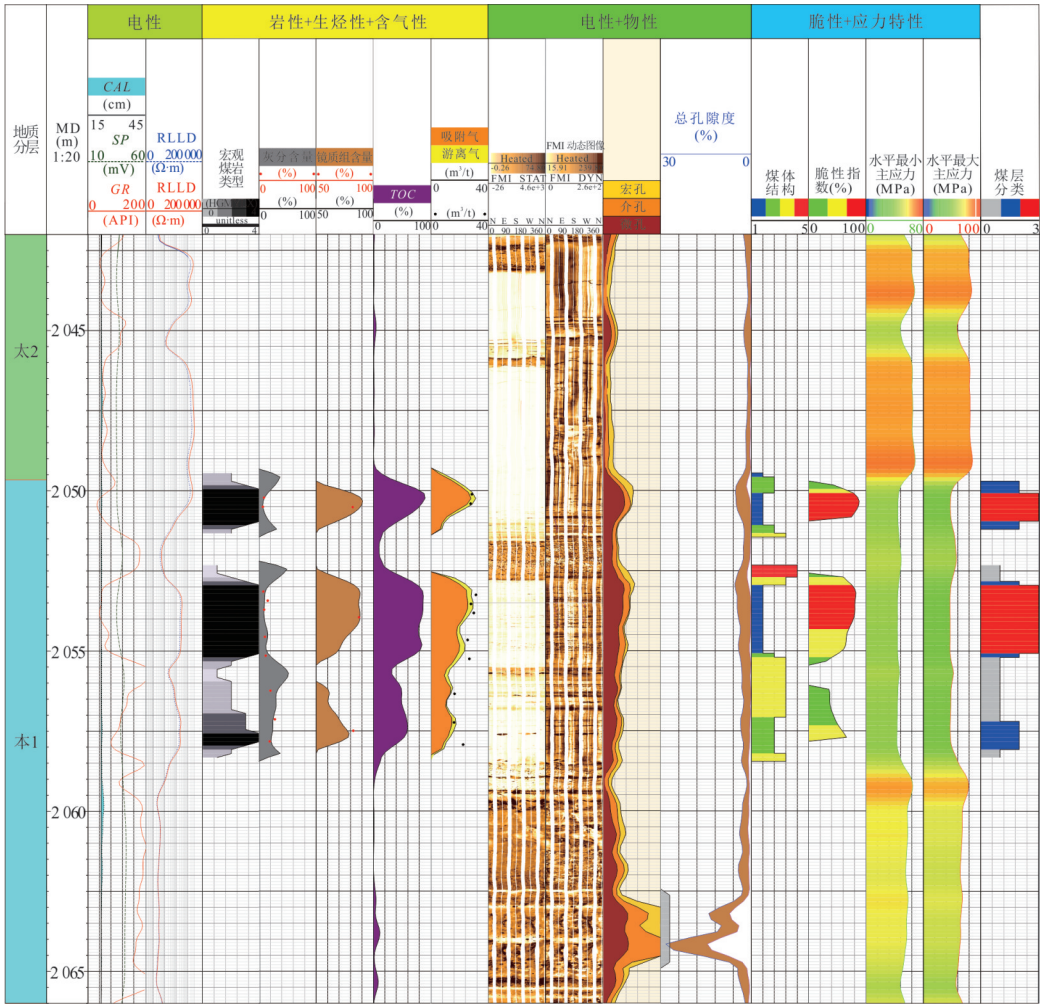


图 11 大吉 X 井“六性”关键参数综合测井评价成果

Fig.11 Integrated well-log evaluation results of key six-property parameters in Well Daji-X

设计,确定了最优压裂层位.后期产气效果表明,该井稳定日产气量为  $7\,388\text{ m}^3/\text{d}$ ,产气效果良好.

## 5 结论

(1)建立了深层煤层气储层“六性”地质-工程协同评价体系.将岩性、生烃性、物性和含气性归为地质属性,将可压性和应力特性归为工程属性,实现了储层物质组成、气源条件、储集空间、资源赋存、压裂改造适应性和地应力约束的统一评价,为深层煤层气由地质甜点识别向工程甜点优选提供了评价框架.

(2)形成了多测井信息约束的“六性”关键参数测井评价方法.基于岩心实验、常规测井、核磁共振、电成像、阵列声波和元素测井资料,构建了由有机显微组分、无机矿物和孔隙流体组成的煤岩测井评价体积模型,实现了岩性、生烃性、物性、含气性、可压性和应力特性的定量或半定量表征.电性响应与密度、声波、核磁、元素和成像测井联合应用,有效降低了单一参数解释的多解性,提高了深煤层储层关键参数解释精度.

(3)大吉区块应用验证表明,该方法能够有效识别优质深层煤层气储层和压裂有利层段.优质储层具有低灰分、高镜质组含量、煤体结构较完整、煤层厚度大、含气量高、孔裂隙系统有效、可压性较好和应力差适中等特征,测井上表现为高阻-高时差型.大吉X井应用结果显示,识别Ⅰ类储层  $3.0\text{ m}$ 、Ⅱ类储层  $1.8\text{ m}$ 、Ⅲ类储层  $2.6\text{ m}$ ,评价结果可为深层煤层气甜点预测、水平井部署和压裂层段优选提供支撑.

## References

- Chen, Y., Ma, D.M., Guo, C., et al., 2019. An Experimental Study on the Conductivity Changes in Coal during Methane Adsorption-Desorption and Their Influencing Factors. *Acta Geologica Sinica (English Edition)*, 93(3): 704–717. <https://doi.org/10.1111/1755-6724.13873>
- Chen, Z. R., Liu, W., Shi, X., et al., 2026. Prediction of In-Situ Stress Field of Deep Coalbed Methane Considering Coalbed Structure Differences. *Coal Science and Technology*, 54(2): 360–369 (in Chinese with English abstract).
- Deng, Z., Zhao, Q., Fan, L. Y., et al., 2025. Key Controlling Factors of Coal-Rock Gas of Benxi Formation in Ordos Basin and Its Practical Significance. *Coal Science and Technology*, 53(S1): 233–251 (in Chinese with English abstract).
- Feng, Z.C., Wang, C., Dong, D., et al., 2018. Experimental Study of the Characteristic Changes of Coal Resistivity during the Gas Adsorption/Desorption Process. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2018:1–7. <https://doi.org/10.1155/2018/1450187>
- Gao, D. L., Yao, J., Wang, Z. M., et al., 2025. A Brief Discussion on Interdisciplinary Research of Mechanics and Oil & Gas Engineering. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 57(12): 2773–2788 (in Chinese with English abstract).
- Gong, F., Peng, S. P., Han, G., et al., 2025. Orthorhombic Rock Physics Modeling for Deep Coalbed Methane Reservoirs and Its Application: An Example of Benxi Formation Coal in Ordos Basin. *Chinese Journal of Geophysics*, 68(12): 4835–4850 (in Chinese with English abstract).
- Guo, G. S., Xing, L. R., Liao, X., et al., 2018. Analysis of Main Controlling Geological Factors of Production Based on “Three Qualities” of CBM Reservoir. *Natural Gas Geoscience*, 29(8): 1198–1204 (in Chinese with English abstract).
- Jiao, F. Z., Zhao, Q., Xiao, Y. H., et al., 2025. A Major Transformation from Coalbed Methane to Coal-Rock Gas Leading the “Coal-Rock Gas Revolution”. *Acta Petrolei Sinica*, 46(12): 2211–2225 (in Chinese with English abstract).
- Li, S., Tang, D. Z., Xu, H., et al., 2015. Evolution of Physical Differences in Various Buried Depth of Coal Reservoirs under Constraint of Stress. *Acta Petrolei Sinica*, 36(S1): 68–75 (in Chinese with English abstract).
- Li, X.C., An, Z.X., Zhang, Q., et al., 2020. Analysis of Resistivity Anisotropy of Loaded Coal Samples. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2020: 1–13. <https://doi.org/10.1155/2020/9016583>
- Li, X. G., Tang, Z., Zhu, J. Y., et al., 2024. Research Progress and Prospect of Deep Coalrock Fracturing. *Natural Gas Industry*, 44(10): 126–139 (in Chinese with English abstract).
- Li, X. W., Liu, D. M., Cai, Y. D., et al., 2018. Moisture Content Characteristics of High Rank Coal Reservoir and Its Influence on Adsorption Capacity. *Earth Science Frontiers*, 25(4): 237–244 (in Chinese with English abstract).
- Li, Y., Gao, S., Wu, P., et al., 2023. Evaluation and Correction of Prediction Model for Free Gas Content in Deep Coalbed Methane: A Case Study of Deep Coal

- Seams in the Eastern Margin of Ordos Basin. *Acta Petrolei Sinica*, 44(11): 1892—1902 (in Chinese with English abstract).
- Li, Y., Xu, W. K., Gao, J. X., et al., 2021. Mechanism of Coal Measure Gas Accumulation under Integrated Control of “Source Reservoir-Transport System”: A Case Study from East Margin of Ordos Basin. *Journal of China Coal Society*, 46(8): 2440—2453 (in Chinese with English abstract).
- Li, Y., Zou, C. N., Wang, M. W., et al., 2026. Formation, Distribution, Enrichment Pattern and Development Prospect of Coal-Rock Gas Worldwide. *Natural Gas Industry*, 46(1): 24—40 (in Chinese with English abstract).
- Liang, M. X., Sun, W. J., 2013. Application of Geophysical Logging in Parameters’ Integrated Interpretation of Coal Reservoir—Taking the Well-A in PS Mining Area as an Example. *Science Technology and Engineering*, 13(18): 5121—5126, 5140 (in Chinese with English abstract).
- Lin, B., Chen, S., Yan, X. Y., et al., 2025. Efficient and Variable Viscosity Fracturing Fluid of Deep Coal Rock Gas and Popularization in Ultimate Volume Fracture. *Journal of China Coal Society*, 50(2): 1162—1174 (in Chinese with English abstract).
- Liu, X. S., Huang, D. J., Hu, J. L., et al., 2024. Reservoir Characteristics of Carboniferous Benxi Formation Coal-Rock Gas in the Central and Eastern Ordos Basin. *Natural Gas Industry*, 44(10): 51—62 (in Chinese with English abstract).
- Liu, Z. D., Zhao, J. Z., Shi, B. H., et al., 2015. Study on the Method of Quantitative Evaluation for “Three Qualities” of CBM Reservoir Using Logging Data: A Case Study from the Hancheng Mine at the Eastern Edge of the Ordos Basin. *Natural Gas Geoscience*, 26(5): 966—978 (in Chinese with English abstract).
- Mi, H. G., Wu, J., Peng, W. C., et al., 2024. Mechanical Characteristics and Fracture Propagation Mechanism of Deep Coal Reservoirs in the Shenfu Block. *Coal Geology & Exploration*, 52(8): 32—43 (in Chinese with English abstract).
- Niu, X. B., Fan, L. Y., Yan, X. X., et al., 2024. Enrichment Conditions and Resource Potential of Coal-Rock Gas in Ordos Basin, NW China. *Petroleum Exploration and Development*, 51(5): 972—985 (in Chinese with English abstract).
- Qiao, Y. P., Shao, X. J., Huo, M. Y., et al., 2016. Progress and Prospect of CBM Geophysical Logging. *Fault-Block Oil and Gas Field*, 23(2): 181—184 (in Chinese with English abstract).
- Qin, Y., Tang, D. Z., Liu, D. M., et al., 2014. Geological Evaluation Theory and Technology Progress of Coal Reservoir Dynamics during Coalbed Methane Drainage. *Coal Science and Technology*, 42(1): 80—88 (in Chinese with English abstract).
- Shi, Y. J., He, Y. F., Wan, J. B., et al., 2024. Research on Logging Evaluation Methods for Geological Quality and Gas Content of Deep Coal Measure Gas. *China Petroleum Exploration*, 29(4): 126—141 (in Chinese with English abstract).
- Tang, S. H., Xi, Z. D., Zhang, S. H., et al., 2025. Occurrence Phase and Gas-Bearing Evolution of Deep Coalbed Methane. *Coal Science and Technology*, 53(3): 91—100 (in Chinese with English abstract).
- Tang, S. L., Tang, D. Z., Yang, J. S., et al., 2023. Pore Structure Characteristics and Gas Storage Potential of Deep Coal Reservoirs in Daning-Jixian Block of Ordos Basin. *Acta Petrolei Sinica*, 44(11): 1854—1866, 1902 (in Chinese with English abstract).
- Tang, X. Y., Chen, X. Y., Zheng, L. Q., et al., 2023. Review of Conductive Characteristics of Gas-Bearing Coal. *Science Technology and Engineering*, 23(25): 10617—10624 (in Chinese with English abstract).
- Wang, D., Liu, Z. D., Wang, C. W., et al., 2024. Logging-Based Evaluation for Geological-Engineering Sweet Spots in Deep Coal Reservoirs of the DJ Block, Ordos Basin. *Oil & Gas Geology*, 45(6): 1772—1788 (in Chinese with English abstract).
- Wang, H. Y., Yang, S. G., Zhang, L. P., et al., 2024. Experimental Analysis of the Mechanical Properties and Failure Behavior of Deep Coalbed Methane Reservoir Rocks. *Processes*, 12(6): 1125. <https://doi.org/10.3390/pr12061125>
- Xu, F. Y., Yan, X., Lin, Z. P., et al., 2022. Research Progress and Development Direction of Key Technologies for Efficient Coalbed Methane Development in China. *Coal Geology & Exploration*, 50(3): 1—14 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, L., Bian, L. H., Hou, W., et al., 2023. Pore Structure Characteristics and Exploration Significance of Deep Coal Reservoirs: A Case Study of Daning-Jixian Block in the Eastern Margin of Ordos Basin. *Acta Petrolei Sinica*, 44(11): 1867—1878 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, L., Xia, Z. L., Wang, B., et al., 2025. Well Log Evaluation Methods of Deep Source Rocks: The Jurassic Yangxia Formation in Kuqa Depression. *Progress in Geophysics*, 40(4): 1563—1576 (in Chinese with English abstract).

English abstract).

- Zhao, H. F., Shi, H. W., Xie, F., et al., 2025. A Novel Model for Calculating In Situ Stress within Deep Coal Seams Considering Microstructural Characteristics and Its Application. *Coal Geology & Exploration*, 53(11): 120—129 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, W. B., Liu, H. L., Wang, H. C., et al., 2024. Microscopic Pore Characteristics of Coal Seam and the Controlling Effect of Sedimentary Environment on Pore Structure in No. 8 Coal. *Coal Science and Technology*, 52(6): 142—154 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, Z., Xu, W. L., Zhao, Z. Y., et al., 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 (in Chinese with English abstract).
- Zhou, L. H., Xiong, X. Y., Ding, R., et al., 2025a. Connotation, Enrichment Mechanism and Practical Significance of Coal-Rock Gas. *Natural Gas Industry*, 45(3): 1—15 (in Chinese with English abstract).
- Zhou, L. H., Li, Y., Ding, R., et al., 2025b. Differential Accumulation Characteristics and Production of Coalbed Methane/Coal-Rock Gas: A Case Study of the No. 8 Coal Seam of the Carboniferous Benxi Formation in the Daji Block, Ordos Basin, NW China. *Petroleum Exploration and Development*, 52(4): 772—781 (in Chinese with English abstract).
- Zhou, L. H., Li, S. G., Wang, Y., et al., 2025c. Key Technologies and Practices for Cost-Effective Development of Deep Coal-Rock Gas: A Case Study of the Daning-Jixian Block in Ordos Basin. *Acta Petrolei Sinica*, 46(8): 1536—1549 (in Chinese with English abstract).

## 中文参考文献

- 陈峥嵘, 刘伟, 时贤, 等, 2026. 考虑煤体结构差异的深层煤层气地应力场预测方法. *煤炭科学技术*, 54(2): 360—369.
- 邓泽, 赵群, 范立勇, 等, 2025. 鄂尔多斯盆地本溪组煤岩气含气性主控因素及其实践意义. *煤炭科学技术*, 53(S1): 233—251.
- 高德利, 姚军, 汪志明, 等, 2025. 简要论述力学与油气工程交叉研究. *力学学报*, 57(12): 2773—2788.
- 龚飞, 彭苏萍, 韩刚, 等, 2025. 深部煤层气储层正交各向异性岩石物理建模及应用: 以鄂尔多斯盆地本溪组煤岩为例. *地球物理学报*, 68(12): 4835—4850.
- 郭广山, 邢力仁, 廖夏, 等, 2018. 基于储层“三品质”的煤层气产能主控地质因素分析. *天然气地球科学*, 29(8): 1198—1204.
- 焦方正, 赵群, 肖宇航, 等, 2025. 煤层气到煤岩气的“蝶变”引领“煤岩气革命”. *石油学报*, 46(12): 2211—2225.
- 李松, 汤达祯, 许浩, 等, 2015. 应力条件制约下不同埋深煤储层物性差异演化. *石油学报*, 36(S1): 68—75.
- 李小刚, 唐政, 朱静怡, 等, 2024. 深层煤岩气压裂研究进展与展望. *天然气工业*, 44(10): 126—139.
- 李夏伟, 刘大锰, 蔡益栋, 等, 2018. 高煤级煤储层含水性特征及其对吸附能力的影响. *地质前缘*, 25(4): 237—244.
- 李勇, 高爽, 吴鹏, 等, 2023. 深部煤层气游离气含量预测模型评价与校正——以鄂尔多斯盆地东缘深部煤层为例. *石油学报*, 44(11): 1892—1902.
- 李勇, 许卫凯, 高计县, 等, 2021. “源-储-输导系统”联控煤系气富集成藏机制——以鄂尔多斯盆地东缘为例. *煤炭学报*, 46(8): 2440—2453.
- 李勇, 邹才能, 王明伟, 等, 2026. 全球煤层(岩)气形成分布、富集模式及发展前景. *天然气工业*, 46(1): 24—40.
- 梁明星, 孙文杰, 2013. 地球物理测井在煤储层参数综合解释中的应用——以 PS 矿区 A 井为例. *科学技术与工程*, 13(18): 5121—5126, 5140.
- 林波, 陈帅, 严向阳, 等, 2025. 深层煤岩气高效能变黏压裂液及在极限体积压裂中的推广应用. *煤炭学报*, 50(2): 1162—1174.
- 刘新社, 黄道军, 虎建玲, 等, 2024. 鄂尔多斯盆地中东部地区石炭系本溪组煤岩气储层特征. *天然气工业*, 44(10): 51—62.
- 刘之的, 赵靖舟, 时保宏, 等, 2015. 煤层气储层“三品质”测井定量评价方法研究——以鄂尔多斯盆地东缘韩城矿区为例. *天然气地球科学*, 26(5): 966—978.
- 米洪刚, 吴见, 彭文春, 等, 2024. 神府区块深部煤储层力学特性及裂缝扩展机制. *煤田地质与勘探*, 52(8): 32—43.
- 牛小兵, 范立勇, 闫小雄, 等, 2024. 鄂尔多斯盆地煤岩气富集条件及资源潜力. *石油勘探与开发*, 51(5): 972—985.
- 乔雨朋, 邵先杰, 霍梦颖, 等, 2016. 煤层气地球物理测井研究现状及前景展望. *断块油气田*, 23(2): 181—184.
- 秦勇, 汤达祯, 刘大锰, 等, 2014. 煤储层开发动态地质评价理论与技术进展. *煤炭科学技术*, 42(1): 80—88.
- 石玉江, 何羽飞, 万金彬, 等, 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.
- 唐书恒, 郝兆栋, 张松航, 等, 2025. 深部煤层气赋存相态与含气性演化. *煤炭科学技术*, 53(3): 91—100.
- 唐淑玲, 汤达祯, 杨焦生, 等, 2023. 鄂尔多斯盆地大宁-吉县区块深部煤储层孔隙结构特征及储气潜力. *石油学报*, 44(11): 1854—1866, 1902.
- 汤小燕, 陈昕怡, 郑雷清, 等, 2023. 含瓦斯煤岩导电特性研究综述. *科学技术与工程*, 23(25): 10617—10624.
- 王舵, 刘之的, 王成旺, 等, 2024. 鄂尔多斯盆地 DJ 区块深

部煤储层地质-工程甜点测井评价技术. 石油与天然气地质, 45(6):1772—1788.

徐凤银, 闫霞, 林振盘, 等, 2022. 我国煤层气高效开发关键技术研究进展与发展方向. 煤田地质与勘探, 50(3): 1—14.

张雷, 边利恒, 侯伟, 等, 2023. 深部煤储层孔隙结构特征及其勘探意义——以鄂尔多斯盆地东缘大宁-吉县区块为例. 石油学报, 44(11):1867—1878.

张亮, 夏宗立, 王斌, 等, 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.

赵海峰, 史宏伟, 谢斐, 等, 2025. 考虑微构造特征的深部煤层地应力模型及其应用. 煤田地质与勘探, 53(11): 120—129.

赵伟波, 刘洪林, 王怀厂, 等, 2024. 煤层微观孔隙特征及沉积环境对孔隙结构的控制作用——以鄂尔多斯盆地 8 号煤层为例. 煤炭科学技术, 52(6):142—154.

赵喆, 徐旺林, 赵振宇, 等, 2024. 鄂尔多斯盆地石炭系本溪组煤岩气地质特征与勘探突破. 石油勘探与开发, 51(2):234—247, 259.

周立宏, 熊先钺, 丁蓉, 等, 2025a. 煤岩气内涵、富集机理及实践意义. 天然气工业, 45(3):1—15.

周立宏, 李勇, 丁蓉, 等, 2025b. 煤层(岩)气“同生异构”控藏特征及开发实践——以鄂尔多斯盆地大吉区块石炭系本溪组 8 号煤为例. 石油勘探与开发, 52(4): 772—781.

周立宏, 李曙光, 王渊, 等, 2025c. 深层煤岩气效益开发关键技术与实践——以鄂尔多斯盆地大宁-吉县区块为例. 石油学报, 46(8):1536—1549.