DOI:10. 19657/j. geoscience. 1000-8527. 202508180009

鄂尔多斯盆地东缘佳县地区石炭系本溪组8号煤储层脆性评价及开发有利区预测

何东博[1]，马立民[1,2,*]，丛 彭[1]，王瑞华[1]，邱宇威[1]，张启帆[2]，郭怡琳[2]

（1. 中国石油冀东油田分公司，河北 唐山 063000；2. 中国地质大学（北京）能源学院，北京 100083）

摘要：鄂尔多斯盆地佳县地区深部煤层气资源丰富，目前对煤储层脆性特征研究程度较低，明确脆性特征对深部煤层气开发具有重要意义。基于阵列声波测井、常规测井资料及三轴岩石力学实验，综合考虑力学参数和矿物成分的影响构建了煤层脆性测井评价方法，分析了脆性对煤层力学特征及煤岩学特征的控制作用，明确了本区脆性分布特征。结果表明，佳县地区8号煤层具有上部脆性低、下部脆性高的纵向特征。脆性指数与抗压强度呈负相关，且与宏观煤岩类型、煤体结构均有明显的相关关系：半暗煤、半亮煤、光亮煤的脆性逐渐增强；原生煤、碎裂煤、碎粒煤的脆性逐渐增强。表明煤层黏土矿物含量越低，脆性越强。研究区水力压裂主缝长随煤层脆性指数的增加先升后降，脆性指数居中（45～60）利于压裂裂缝扩张。基于脆性指数与煤层含气性预测了三类煤层气开发有利区，其中Ⅰ类有利区产气效果好，单井日产气量基本高于3.0×10^4 m^3，能够有效指导深部煤层气开发有利区预测。

关键词：力学参数；测井评价；脆性指数；煤岩学特征；有利区预测；深部煤层气；本溪组；鄂尔多斯盆地

中图分类号：TE122. 2；P618. 1 **文献标志码：**A **文章编号：**1000-8527(2026)01-0128-12

Brittleness Evaluation and Favorable Development Zone Prediction of the No. 8 Coal Reservoir in the Carboniferous Benxi Formation, Jiaxian Area, Eastern Margin of the Ordos Basin

HE Dongbo[1], MA Liming[1,2,*], CONG Peng[1], WANG Ruihua[1], QIU Yuwei[1], ZHANG Qifan[2], GUO Yilin[2]

(1. *PetroChina Jidong Oilfield Company*, *Tangshan*, *Hebei* 063000, *China*; 2. *School of Energy Resources*, *China University of Geosciences* (*Beijing*), *Beijing* 100083, *China*)

Abstract: The deep coalbed methane (CBM) resources in the Jiaxian area of the Ordos Basin are abundant; however, studies on coal brittleness characteristics remain limited. Clarifying brittleness features is of great significance for the development of deep CBM. Based on array acoustic logging, conventional logging data, and triaxial rock mechanical experiments, a logging-based coal brittleness evaluation method was established by comprehensively considering the effects of mechanical parameters and mineral composition. The controlling effects of brittleness on the mechanical properties and coal petrological characteristics were analyzed, and the spatial distribution of brittleness in the study area was clarified. The results indicate that the No. 8 coal seam in the

收稿日期：2025-08-18；**修回日期：**2025-10-27；**编辑：**董立。

基金项目：中国石油天然气股份有限公司攻关性应用性科技专项（2023ZZ18）。

作者简介：何东博，男，高级工程师，1972年出生，主要从事储集层评价、天然气开发、新能源开发综合研究与管理工作。Email：311@petrochina. com. cn。

＊通信作者：马立民，男，博士，1985年出生，主要从事油气藏开发地质工作。Email：malimin2015@petrochina. com. cn。

引用格式：何东博，马立民，丛彭，等. 鄂尔多斯盆地东缘佳县地区石炭系本溪组8号煤储层脆性评价及开发有利区预测［J］. 现代地质，2026，40（1）：128-139. DOI：10. 19657/j. geoscience. 1000-8527. 202508180009.

HE Dongbo，MA Liming，CONG Peng，et al. Brittleness Evaluation and Favorable Development Zone Prediction of the No. 8 Coal Reservoir in the Carboniferous Benxi Formation， Jiaxian Area， Eastern Margin of the Ordos Basin ［J］. GEOSCIENCE，2026，40（1）：128-139. DOI：10. 19657/j. geoscience. 1000-8527. 202508180009.

Jiaxian area exhibits a vertical pattern of lower brittleness in the upper part and higher brittleness in the lower part. The brittleness index shows a negative correlation with compressive strength and displays clear relationships with macroscopic coal lithotypes and coal structure: brittleness increases progressively from semi-dull coal to semi-bright coal and bright coal, and from primary coal to fractured coal and granular coal. This suggests that lower clay mineral content corresponds to higher coal brittleness. In the study area, the length of the main hydraulic fracturing fractures increases initially and then decreases with increasing coal brittleness index, with a moderate brittleness index (45–60) being most favorable for fracture propagation. Based on the relationship between brittleness index and gas content, three types of favorable CBM development zones in the No. 8 coal seam were predicted. Among them, Type I favorable zones exhibit good gas production performance, with single-well daily gas production generally exceeding 30,000 m^3, effectively guiding the prediction of favorable zones for deep CBM development.

Key words: mechanical parameter; logging evaluation; brittleness index; coal petrological characteristics; favorable zone prediction; deep coalbed methane; Benxi Formation; Ordos Basin

0　引　言

我国煤层气资源丰富，埋深 2000 m 以下的深部煤层气资源量为 40.71×10^{12} m^3，开发潜力巨大[1]。煤层气开发利用是实现清洁能源供应和“双碳”目标的重要途径[2]。近年来，随着深部煤层气勘探开发的逐渐深入，深部煤储层仍然面临着“高地应力、低孔、低渗、高非均质性”的特点，开发难度大[3]。压裂规模的提升是实现深部煤层气产量突破的关键，目前水力压裂是我国煤层气主要增产手段，而脆性指数是决定水力压裂能否产生大规模缝网的重要力学参数[4-5]。构建合适的煤储层脆性评价方法，对深部煤层气压裂增产具有重要指导意义。

为了准确预测岩石脆性，前人提出了基于矿物成分、力学参数或测井数据评价储层脆性的方法。通常，石英含量高的岩石更脆，而黏土含量高的则更塑性。在页岩气开发中，常用基于矿物成分与含量计算脆性指数的方法[6-7]。但煤属高脆性岩石，具有较低应变易破坏、高回弹能的特点，需要着重考虑力学参数的影响，因此在煤中应用最为广泛的是力学参数法[8]。基于力学参数评价储层脆性涉及杨氏模量和泊松比。通过超声波脉冲法及单轴、三轴力学压缩实验获得动、静态岩石力学参数，但岩心实验仅能获得单点参数[9-10]。因此，基于测井数据的煤层力学特性研究应用广泛。利用阵列声波、常规测井资料将弹性模量、泊松比与岩石密度相结合，计算煤层脆性指数[11-13]。但不同地区煤的力学性质受构造应力影响，需要根据研究区的实测数据确定杨氏模量和泊松比的取值范围[14-15]。并且，当前基于测井曲线构建的脆性指数计算模型局限于提高力学参数的计算精度，缺乏对脆性指数影响因素的研究。

针对目前在煤储层脆性特征研究的不足，笔者基于鄂尔多斯盆地东缘佳县地区 8 号煤层的阵列声波测井、常规测井资料及三轴岩石力学实验建立了煤层力学参数动静态转换模型，考虑了矿物成分对煤储层脆性的影响，综合利用煤储层力学参数和矿物成分构建了煤层脆性评价方法，并对研究区 8 号煤储层的脆性特征及其与其它力学参数、宏观煤岩类型、煤体结构及裂缝扩展规律进行了分析，最后结合脆性指数与煤层含气性预测了研究区深部煤层气开发有利区。

1　地质概况

佳县地区位于鄂尔多斯盆地东缘，地处伊陕斜坡二级构造单元内，区内构造简单，为一自东向西倾的大型单斜构造，断层不发育。研究区自下而上发育奥陶系、上石炭统本溪组、下二叠统太原组、下二叠统山西组和中二叠统石盒子组等地层[16-28]。主要含煤地层位于本溪组、太原组及山西组（图 1）。其中，本溪组 8 号煤层埋深 1900 ~ 2600 m，煤层稳定发育且厚度大，为 6 ~ 14 m，平均厚度约为 8.5 m，最大镜质体反射率为 1.5% ~ 1.9%，属烟煤；宏观煤岩类型以亮煤和半亮煤为主；煤体结构主要为原生结构，少量发育碎裂结构，整体结构完整、利于压裂；煤层水分质量

分数为 0.4% ~ 1.1%；灰分质量分数为 5.8% ~ 38.8%；挥发分产率为 11.0% ~ 25.0%，具有特低水分、中-高灰分和中-高挥发分产率的特点；显微组分测试结果表明，镜质组体积分数在 57.9% ~ 88.1%，惰质组为 9.2% ~ 23.8%，壳质组在 0.4% ~ 4.0%，矿物组分为 5.8% ~ 25.5%，矿物成分以黏土矿物为主。佳县地区发育深水草本沼泽相为主，少部分发育覆水森林沼泽相及湿地草本沼泽相煤相类型；顶板和底板主要为泥岩，封盖条件好；煤层总含气量为 17.7 ~ 22.8 m^3/t，平均含气量为 20.56 m^3/t，含气性较好。是深部煤层气开发的主要目标层，也是本次研究的目标层位。

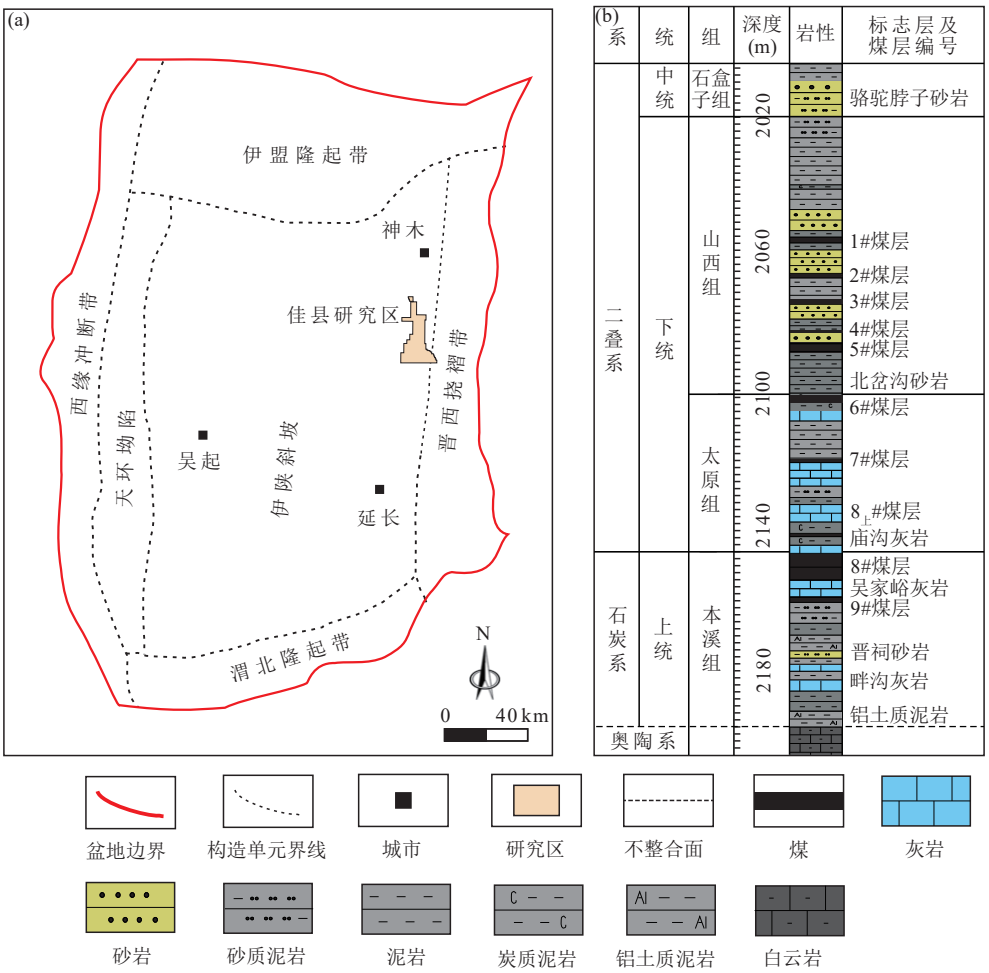


图 1 鄂尔多斯盆地佳县地区构造位置（a）及沉积地层特征（b）（据文献［16］修改）

Fig. 1 Location (a) and stratigraphic column (b) of Jiaxian area, Ordos Basin (modified from reference [16])

2 基于测井的煤储层脆性评价模型

煤层脆性是力学特征和材料特征的综合反映。因此，需要综合分析煤岩特征，充分利用地质、地球物理测井资料构建煤储层脆性评价模型。

2.1 横波时差预测模型

纵波时差及横波时差是计算岩石力学的关键参数，两者均可由阵列声波测井获取，而常规测井仅能获得纵波时差。由于阵列声波测井成本较高，所以绝大部分煤层气井缺少横波时差数据，无法计算岩石力学参数。因此需要利用常规测井资料预测横波时差。由于岩石力学特征受区域影响较大，经验公式不适用，因此，利用研究区 32 口井的阵列声波测井资料 8 号煤层的纵波时差和横波时差进行拟合，如图 2 所示，二者呈线性相关，相关系数达 0.66，预测效果较好。据此得到横波时差预测公式：

$$\Delta t_s = 2.71\Delta t_c - 195.45 \quad (1)$$

式中，Δt_s为煤岩横波时差，μs/m；Δt_c为煤岩纵波时差，μs/m。

2.2 岩石力学特征

脆性指数是储层力学特征、矿物组成及孔裂隙结构的综合反应[15]。杨氏模量和泊松比是表征煤岩脆性指数的主要岩石力学参数，其准确的静

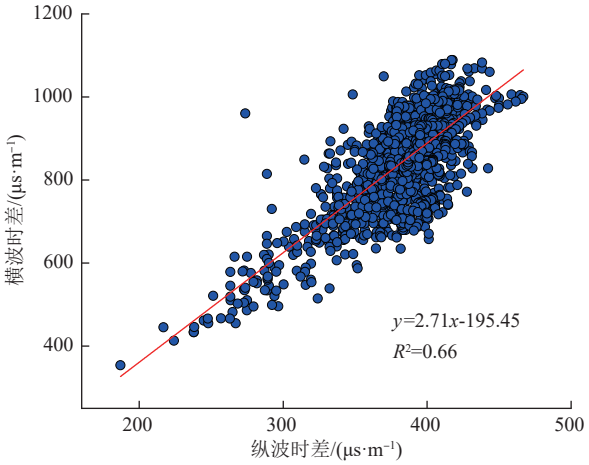


图 2　鄂尔多斯盆地佳县地区 8 号煤层纵、横波时差相关关系

Fig. 2　Correlation between compressional and shear wave transit times in the No. 8 coal seam, Ordos Basin

态值是由室内三轴岩石力学实验获取。以研究区 8 号煤层为实验样品，通过三轴岩石力学实验获得煤层应力应变曲线，根据煤样品在弹性变形阶段的应力应变曲线计算杨氏模量、泊松比、抗拉强度等力学参数，如表 1。实验结果显示，测试围压在 20 MPa 到 25 MPa 之间，近似地层压力，能够更好地反映样品原位状态下的力学特征。同一口井的不同样品围压条件相同，杨氏模量及抗压强度差异明显，泊松比差异较小。整体样品的三轴实验杨氏模量为 1. 07 ~ 12. 72 GPa，泊松比为 0. 11 ~ 0. 54。

2. 3　煤储层脆性指数评价模型的建立

声波在岩石中传播时，岩石颗粒受声波影响产生震动，进而产生弹性形变[29]。因此，基于阵列声波测井提取纵波速度、横波速度，然后利用

表 1　8 号煤层样品静态力学参数

Table 1　Static mechanical parameters of No.8 coal seam samples

样品编号	岩性	直径(mm)	长度(mm)	围压(MPa)	杨氏模量(GPa)	泊松比	抗压强度(MPa)
Z101-01	煤	25.12	42.96	20	10.70	0.35	82.20
Z101-02	煤	25.69	44.58	20	5.86	0.31	78.80
Z101-03	煤	25.49	44.32	20	6.26	0.32	85.40
Z101-04	煤	25.26	45.62	20	6.49	0.31	75.10
Z101-05	煤	25.31	42.38	20	6.23	0.30	73.50
Z1-1	煤	25.38	48.40	22	3.13	0.25	18.94
Z1-2	煤	25.47	48.97	22	2.48	0.25	13.53
Z1-3	煤	25.33	45.20	22	2.52	0.06	20.80
Z1-4	煤	25.56	49.72	22	7.05	0.39	14.10
Z1-5	煤	25.38	49.42	22	6.16	0.22	18.33
Z1-6	煤	25.24	51.29	22	2.95	0.15	18.20
Z1-7	煤	25.28	50.74	22	1.91	0.11	19.66
Z1-8	煤	25.07	50.08	22	2.26	0.17	21.02
Z1-9	煤	25.29	49.26	22	1.98	0.14	15.08
Z1-10	煤	25.46	50.05	22	1.78	0.17	15.55
J36-8-1	煤	25.78	52.35	22	3.75	0.54	13.52
J36-8-2	煤	25.52	50.43	22	5.71	0.42	57.54
J36-8-3	煤	25.51	50.52	22	6.01	0.49	65.27
J36-8-4	煤	25.39	50.21	22	6.54	0.38	61.21
J36-8-5	煤	25.62	52.00	22	11.94	0.33	73.84
J36-8-6	煤	25.38	51.13	22	12.72	0.36	71.97
J104-8-1	煤	25.38	40.39	25	2.69	0.41	38.20
J104-8-2	煤	25.71	43.90	25	1.07	0.40	13.00
J104-8-3	煤	25.44	37.06	25	4.02	0.39	41.90
J201-01	煤	25.42	41.36	25	5.35	0.31	74.32
J201-02	煤	25.49	39.68	25	4.82	0.27	42.06
J201-03	煤	25.83	50.32	25	4.77	0.30	33.38
J201-04	煤	25.41	40.39	25	5.89	0.31	78.48
J201-05	煤	25.32	48.32	25	5.19	0.33	67.28

横波、纵波速度和补偿密度数据代入式（2）、（3）求取煤层的动态弹性力学参数，包括杨氏模量及泊松比[30]：

$$E_{\mathrm{d}}=\frac{10^{9}\times\rho_{s}\times(3\Delta t_{s}^{2}-4\Delta t_{p}^{2})}{\Delta t_{s}^{2}(\Delta t_{s}^{2}-\Delta t_{p}^{2})} \tag{2}$$

$$\mu_{\mathrm{d}}=\frac{\Delta t_{s}^{2}-2\Delta t_{p}^{2}}{2\Delta t_{s}^{2}-2\Delta t_{p}^{2}} \tag{3}$$

式中，E_{d}为动态杨氏模量，MPa；μ_{d}为动态泊松比；ρ_{s}为煤样密度，g/cm^3；Δt_{p}、Δt_{s}分别为纵波时差、横波时差，μs/m。

岩石力学参数分为动态和静态，动态力学参数对煤储层力学性质是间接反映，而三轴岩石力学试验获得的静态力学参数是对煤储层力学性质的直接表征，更为准确。因此，在应用时需要利用将动态力学参数转换为静态[31-32]。

由于三轴力学实验中不同围压条件下获得的力学参数值不同，进行动静转换时须进行数据筛选。煤层动态弹性模量随着围压的增加而增加，煤层动态泊松比随围压的增加而降低[33]。因此，不同压力条件下测量的岩石力学参数不同，会影响脆性指数的计算。研究区8号煤层的实测地层压力约为24 MPa，为充分还原真实地层条件下8号煤层的脆性特征，选用围压为25 MPa的煤层岩石力学参数进行动静转换模型的构建。将式（2）、（3）计算得到的动态力学参数与实验获得的静态力学参数拟合，如图3，得到力学参数动静态转换公式：

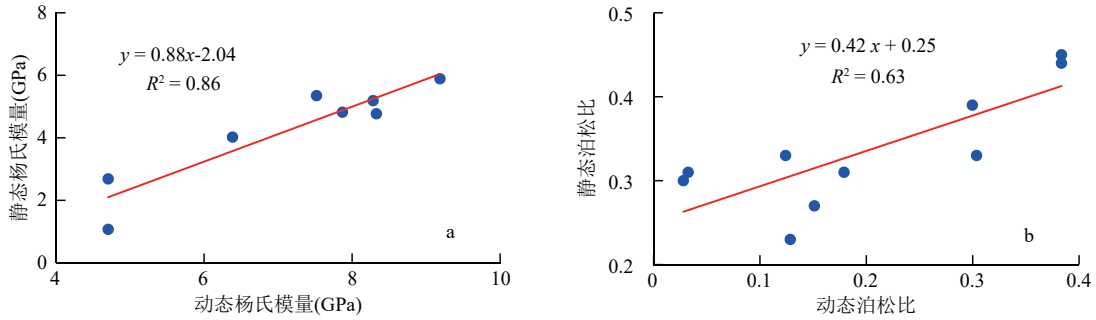


图3 鄂尔多斯盆地佳县地区8号煤层动、静态岩石力学参数转换关系

Fig. 3 Conversions between dynamic and static mechanical parameters of the No. 8 coal seam in the Jiaxian area, Ordos Basin

（a）动、静态杨氏模量转换关系；（b）动、静态泊松比转换关系

$$\begin{aligned}E_{\mathrm{s}}&=0.8792E_{d}-2.037\\ \mu_{\mathrm{s}}&=0.4213\mu_{d}+0.2512\end{aligned} \tag{4}$$

式中，E_{s}为静态杨氏模量，MPa；μ_{s}为静态泊松比。

脆性既是一种变形特性又是一种材料特性。杨氏模量高的岩石通常更硬，脆性更强，而泊松比低的岩石更倾向于脆性。除力学参数外，煤层的矿物成分同样会影响煤的脆性特征。泥质含量越高塑性越强，则脆性越弱，因此将泥质含量（V_{sh}）引入脆性指数模型[34]。由于泥浆颗粒的比表面积大，对放射性物质具有很强的吸附能力。伽马测井记录了岩石中放射性元素的强度，因此可以反映岩石的泥质含量[35]。根据伽马测井评价泥质含量的模型如下：

$$V_{sh}=\frac{2^{GCUR\cdot I_{GR}}-1}{2^{GCUR}-1} \tag{5}$$

式中，V_{sh}为泥质含量，%；GCUR为Hilchie指数，与地层地质年龄相关，一般古近系-新近系地层的GCUR = 3.7，老地层的GCUR = 2；I_{GR}为归一化后的伽马测井曲线，%。

将动静转换后的杨氏模量、泊松比及泥质含量进行归一化，如式（6）、（7）、（8），将结果代入式（9）即可得到煤层脆性指数。

$$E_{B}=\frac{E-E_{\min}}{E_{max}-E_{\min}} \tag{6}$$

$$\mu_{B}=\frac{\mu_{max}-\mu}{\mu_{max}-\mu_{\min}} \tag{7}$$

$$V_{B}=\frac{V_{sh}-V_{\min}}{V_{max}-V_{\min}} \tag{8}$$

式中，E_{B}为归一化杨氏模量，MPa；$E_{\max}$、$E_{\min}$为杨氏模量的最大值、最小值，MPa；μ_{B}为归一化泊松比；$\mu_{\max}$、$\mu_{\min}$为泊松比的最大值、最小值；V_{B}为归一化泥质含量，%；$V_{\max}$、$V_{\min}$为泥质含量的最大值、最小值，%。

结合前人研究确定各因素对脆性指数的影响系数，最终构建脆性指数评价模型[36]：

$$B=0.15\times E_{B}+0.6\times\mu_{B}+0.25\times V_{B} \tag{9}$$

式中，B为煤层脆性指数。

3　煤储层力学特性及开发有利区预测

3.1　煤层脆性特征

脆性指数是储层力学特征及矿物组成的综合反映。岩石力学参数、宏观煤岩类型、煤体结构类型、裂缝发育情况与排采曲线均与煤层脆性特征相关。所以，本文基于研究区 8 号煤层抗拉强度、宏观煤岩类型、煤体结构、裂缝扩展规律和排采数据对煤储层脆性指数评价方法的应用效果进行综合分析。

以研究区内J104，J201 和J36 三口典型井为例，基于测井曲线和脆性指数评价模型，计算 8 号煤层脆性指数并分析其变化规律（图 4）。J104 井中煤层脆性指数呈上部低、下部高的特征，并在 2006. 5 m 及 2010 m 附近脆性指数、密度与自然伽马均出现异常值，其原因是煤层与顶板或夹矸接触面（煤层边界）泥质含量偏多，密度高、伽马高，进而导致储层脆性指数异常升高。其余纯煤层段的脆性指数仍有变化，说明煤层纵向非均质性较强，与宏观煤岩类型、煤体结构等特征相关。J201 井中煤层脆性指数同样呈上部低、下部高的特征，并在 2479 m 附近受夹矸影响出现密度高、伽马高、脆性高的异常段。J36 井中煤层脆性指数同样呈上部低、下部高的特征，相较前两口井，由于煤层段不含夹矸，因此未出现脆性异常段。三口井均有上部脆性低、下部脆性高的纵向特征，这是由于煤层下部在聚煤前期受原始碎屑物影响，泥质含量较高，脆性强；聚煤后期成煤环境稳定，煤质纯，脆性弱。

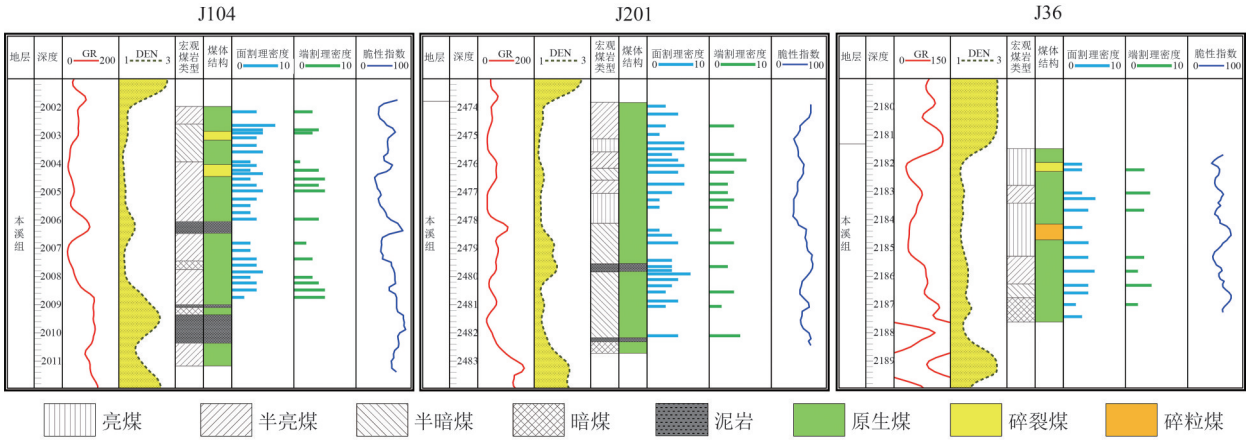


图 4　佳县地区 8 号煤层测井预测脆性指数结果剖面

Fig. 4　The brittleness index distribution from well-log inversion in the No. 8 coal seam in the Jiaxian area

对研究区 32 口井的阵列声波测井资料进行处理分析，结合密度、伽马测井计算 8 号煤层脆性指数，计算煤层段的平均脆性指数，如图 5。研究区 8 号煤层脆性指数为 40 ~ 87，整体呈现西南高、中部低、东北高的趋势，整体变化较为平缓。脆性平面规律与煤层最大水平方向主应力平面规律相关，总体趋势上表现为最大主应力越大，脆性指数越高。但两者在细节处仍有差异，表明除与现今地应力大小相关外，煤层脆性受煤岩学特征影响，因此对脆性与力学性质和煤岩学特征进行了分析。

3.2　煤层脆性与抗压强度的关系

将研究区内 5 口实验井的 29 块样品不同围压下的抗压强度与脆性指数进行相关性分析，如图 6，结果表明不用围压条件下，抗压强度均与脆性指数具有一定的负相关关系。饱水状态下，煤层中水充当润滑剂，岩石内摩擦力减小，力学强度降低[36]。煤层脆性指数越大，越容易被破坏，则煤层力学强度降低，抗压强度越弱。

3.3　煤层脆性与煤岩学特征的关系

根据 18 口井的岩心描述成果统计 8 号煤层的宏观煤岩类型及煤体结构，分别与脆性指数进行相关性分析，结果显示煤层脆性指数与宏观煤岩类型与煤体结构均有明显的相关关系（图 7）。

参考 GB/T 18023—2000《烟煤的宏观煤岩类型分类》，分为光亮煤、半亮煤、半暗煤和暗淡煤。研究区暗淡煤不发育，因此只对光亮煤、半亮煤、半暗煤进行分析（图 7（a））。结果显示光亮煤、半亮煤、半暗煤的脆性逐渐增强。统计不同宏观煤岩类型的矿物成分及含量（表 2），数据显示暗煤中黏土矿物含量高于亮煤（图 7（b）），与常规认识一致[37]。黏土矿物含量越高，石英、方解石、斜长石等脆性矿物成分相对越少，煤层脆性越弱。

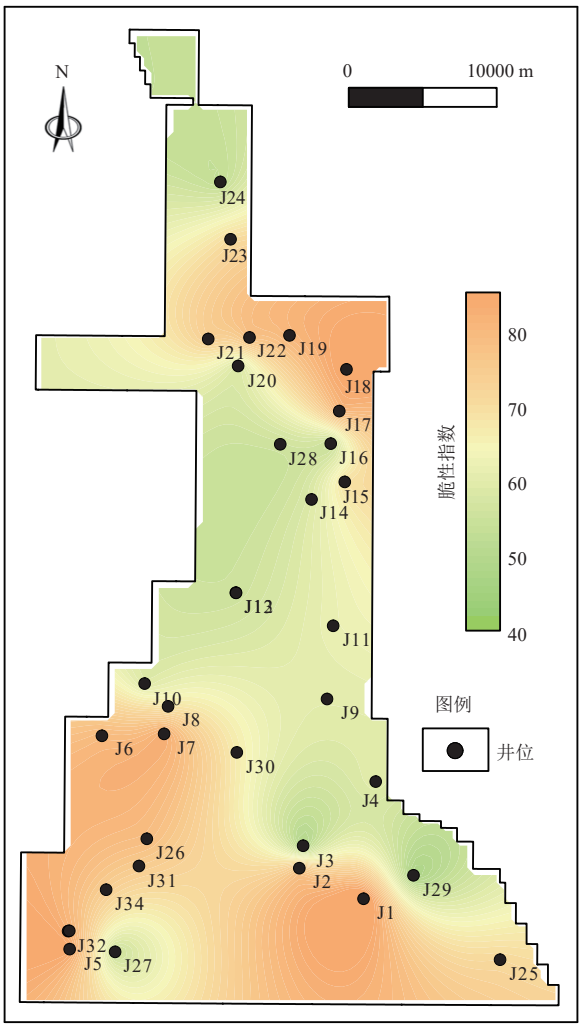


图5 佳县地区8号煤层脆性指数平面分布

Fig. 5 Distribution of brittleness index of No. 8 coal seam in the Jiaxian area

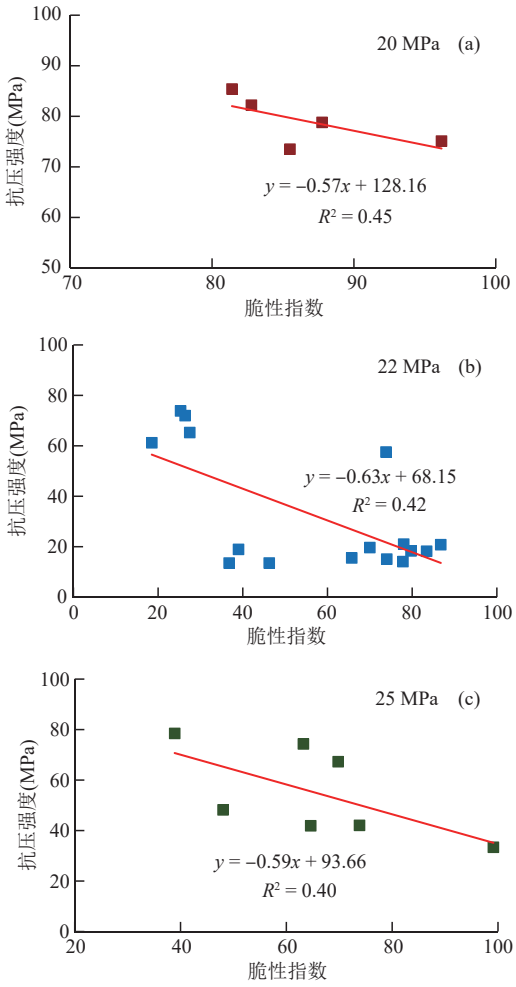


图6 脆性指数与抗压强度的关系

Fig. 6 Relationship between brittleness index and compressive strength of No. 8 coal seam

（a）围压为20 MPa；（b）围压为22 MPa；（c）围压为25 MPa

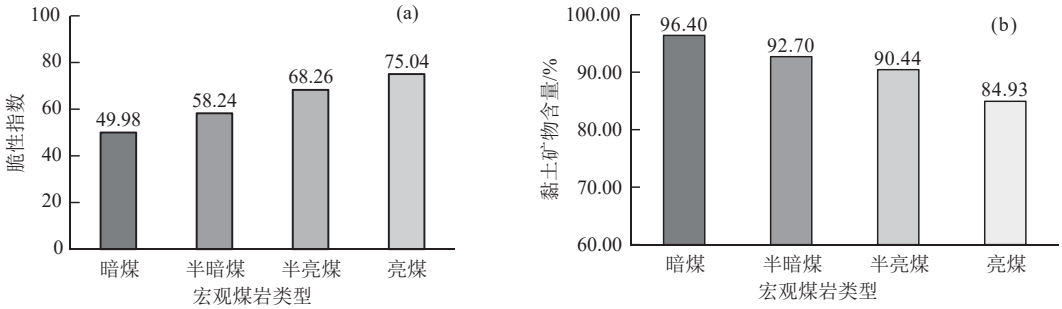


图7 脆性指数与宏观煤岩类型的关系

Fig. 7 Relationship between brittleness index and macrolithotype of No. 8 coal seam

（a）脆性指数与宏观煤岩类型的关系；（b） 黏土矿物含量与宏观煤岩类型的关系

依照GB/T 30050—2013《煤体结构分类》将研究区煤层分为原生结构煤、碎裂煤、碎粒煤和糜棱煤；研究区糜棱煤不发育，少量发育碎粒煤，因此只对原生煤、碎裂煤和碎粒煤进行分析（图8）。结果显示原生煤、碎裂煤、碎粒煤的脆性逐渐增强。煤层力学强度越低，脆性越强，煤体结构越破碎[38-39]。

3.4 煤储层开发有利区预测

3.4.1 脆性指数与水力压裂裂缝扩展

水力压裂是煤层气开发的重要手段。由于研

表 2　佳县地区 8 号煤层样品的宏观煤岩类型及矿物含量

Table 2　Macrolithotype and mineral content of No.8 coal seam samples, Jiaxian area

井名	样品编号	宏观煤岩类型	矿物含量(%)				
			石英	长石	方解石	黏土矿物总量	硫化物
J24	Y1	半暗煤	0.3		3.0	95.4	1.3
	Y2	亮煤				81.7	18.3
	Y3	亮煤	0.6	0.5	3.6	94.8	0.5
	Y4	半亮煤	0.4	0.6		98.8	0.2
	Y5	半亮煤	0.4		7.3	90.2	2.1
	Y6	半亮煤	0.4	0.3	9.0	87.8	2.5
J32	Y1	半亮煤	0.5			80.5	19.0
	Y2	半暗煤	0.6	0.7	6.3	90.2	2.2
	Y3	暗煤		0.6	2.5	96.4	0.5
	Y4	半暗煤		1.0	3.8	92.2	3.0
	Y5	半暗煤		0.7	4.5	94.0	0.8
	Y6	亮煤	0.2	0.6	17	78.3	3.9
	Y7	半亮煤	0.4		1.5	94.9	3.2
	Y8	半暗煤	0.6	0.6	5.8	91.7	1.3

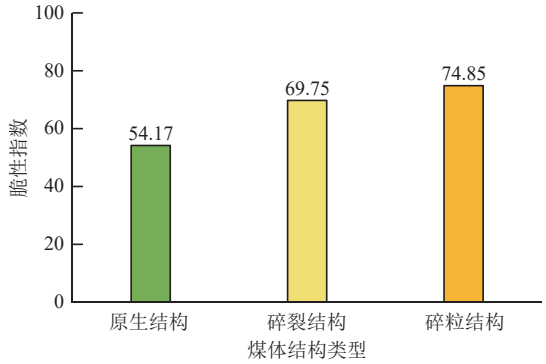


图 8　脆性指数与煤体结构的关系

Fig. 8　Relationship between clay mineral content and coal structure of No. 8 coal seam

究区 8 号煤层类型具有低孔、低渗的特点，水力压裂通过向煤层高压注入携砂及其它化学物质的流体，在煤层中形成裂缝，产生煤层气解吸区域，同时形成流体通道，提高排采效率，达到增产目的[40-43]。微地震检测技术能够对压裂裂缝进行准确的四维检测，通过在时间域上分析裂缝变化过程来监测地下压裂效果。研究区 8 号煤层水力压裂微地震资料（表 3）表明，区内主缝长度为 321 ~ 387 m，缝高为 32 ~ 40 m，主裂缝规模较大。

脆性指数是影响压裂效果的关键参数。通过分析脆性指数与水力压裂主裂缝长度的相关关系（图 9），结果表明，主裂缝长度随煤层脆性指数增加呈现先升后降的趋势。脆性指数较低时，煤层

表 3　佳县地区 8 号煤层水力压裂裂缝监测

Table 3　Hydraulic fracture monitoring of No.3 coal seam, Jiaxian area

井号	缝长(m)	缝高(m)	脆性指数
J1H	321		43.65
J2H	373	37	54.96
J23-2	339	35	59.80
J23-4	342	32	59.49
J24-3	387	40	54.01

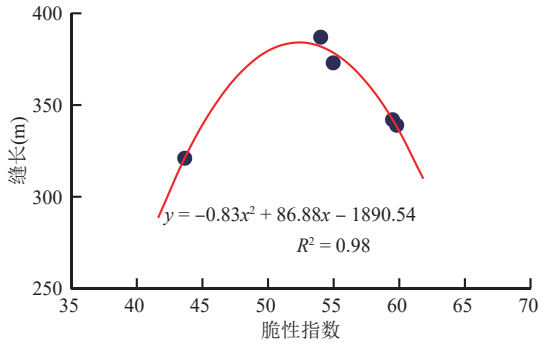


图 9　脆性指数与水力压裂主裂缝长度的相关关系

Fig. 9　The correlation between brittleness index and main fracture length of hydrofracture

力学强度大，不利于压裂裂缝的延伸，压裂效果较差。脆性指数较高时，煤层力学强度减弱，煤体结构较破碎，压裂时容易产生大规模裂缝，压裂效果好。脆性指数过高时，煤体结构破碎，煤层内裂隙发育，压裂时泵压不集中，不利于主裂缝延伸，压裂效果一般。

3.4.2　佳县地区 8 号煤层气开发有利区预测

煤层气开发有利区由地质条件和工程条件共同决定，其中地质条件是由资源条件、保存条件及开采条件等地质类因素综合影响。在前人对煤储层甜点评价参数的研究基础上[44-48]，优选含气量、煤相、镜质体反射率、封盖系数、地层倾角、渗透率作为地质条件评价指标，将水平主应力差和脆性指数作为工程条件评价指标。采用多层次模糊数学方法，基于各评价参数与产气效果的关系采用标度法对各评价参数的重要性进行赋值，构建煤层气开发有利区评价标准，优选研究区煤层气开发有利区[49-57]。

（1）8 号煤层含气性。

镜质体反射率反映煤的变质程度。佳县地区 8 号煤层最大镜质体反射率为 1.5% ~ 1.9%，属烟煤，具备较好的生烃能力。含气量是反映煤层气生产、成藏和保存效果的关键地质因素，是影响

煤层气井产能的重要因素，随着含气量的增加煤层气井产能呈增加趋势。研究区绳索取心及保压取心测试显示8号煤层含气性整体较好，为17.7～22.8 m^3/t，平均含气量为20.56 m^3/t，含气性较好，具有形成规模资源的物质基础。

（2）煤相。

佳县地区煤层分布稳定鄂尔多斯盆地所在的华北地区晚石炭世–早二叠世广泛发育海陆交互相为主的近海盆地含煤沉积体系，主要为障壁海岸成煤环境。受控于区域成煤的有利环境，煤层沉积期间潟湖、潮坪为泥炭沼泽发育提供了有利条件，佳县地区发育深水草本沼泽相为主，少部分发育覆水森林沼泽相及湿地草本沼泽相煤相类型，利于形成稳定发育的优质煤层。

（3）封盖系数。

煤层顶底板的封闭能力是影响煤层气保存条件及富集程度的重要因素之一，如果盖层的封闭能力差，煤储层中后期生成的次生生物气将很容易逸出[58]。在顶底板的岩性、物性及裂缝发育特征的测井评价的基础上，构建封闭性综合计算模型，根据测井模型对研究区煤层顶底板的封闭能力进行定量评价[59]。

（4）地层倾角。

盆地经多阶段、多期次构造作用改造，煤层大多具有不同程度的弯曲变形。这些不同程度的变形特征可指示局部构造的发育，局部构造高部位利于气体富集，地应力相对较低、微裂隙发育、渗透性好，是煤层气井高产的关键。佳县地区本溪组8号煤层埋深在1900～2600 m，构造条件简单，为一简单的单斜构造，倾角较小，煤层整体平缓，局部为小型褶皱核部，有利于煤层气富集。

（5）水平主应力差。

煤层地应力是煤层原位条件下受力情况的综合体现，其组合特征反映了煤储层所处的应力状态，水平主地应力差，差值越大越容易形成单一缝，越接近越容易形成复杂缝，有利于大规模体积压裂[60]。本文基于煤层纵横波速度测试数据，结合阵列声波测井资料计算研究区地应力大小，进而获得水平主应力差的分布。结果显示，研究区中西部水平主应力差相对较小，基本在4 MPa以内，有利于煤储层大规模压裂体积改造形成复杂缝网。依据佳县地区储层地质及工程条件，给出各评价参数的划分指标与相应得分（表4）。

表4 佳县地区8号煤层煤层气开发有利区评价标准及参数

Table 4 Evaluation criteria and parameters for CBM development of No.8 coal seam, Jiaxian area

评价参数			权重系数	划分指标	评价得分
地质条件	资源条件	含气量（$m^3 \cdot t^{-1}$）	0.20	> 18	1
				12～18	(2/15)×V−1.4
				< 12	0.2
		煤相	0.14	覆水森林沼泽	1
				深水草本沼泽	0.8
				湿地草本沼泽	0.6
		镜质体反射率	0.10	> 2	1
				1.6～2	2×R−3
				< 1.6	0.2
	保存条件	封盖系数	0.11	> 0.9	1
				0.5～0.9	2×S−0.8
				< 0.5	0.2
		地层倾角（°）	0.04	< 1	1
				1～8	−(4/35)×D + 39/35
				> 8	0.2
	开采条件	渗透率（mD）	0.11	> 0.3	1
				0.01～0.3	(80/29)×P + (5/29)
				< 0.01	0.2
工程条件	可改造性	水平主应力差(MPa)	0.17	<1	1
				1～4	−(4/15)×S + (19/15)
				> 4	0.2
		脆性指数	0.13	<45	0.2×B−0.8
				45～60	1
				>60	−0.2×B+13

根据8号煤层煤层气开发有利区评价标准将研究区分为三类：有利区评价指数大于0.8定义为Ⅰ类有利区，主要分布在研究区南部及北部小部分区域，区内单井日产气量基本高于3万 m^3，产气效果好；有利区评价指数介于0.6～0.8之间定义为Ⅱ类有利区，主要分布在研究区西南部、东南部及中部，部分为日产气量在1～3万 m^3之间的中产井，部分为日产气量在1万方以内的低产井，产气效果一般；有利区评价指数小于0.6的区域定义为Ⅲ类有利区，少量分布在研究区中南部，区内单井日产气量均在1万 m^3以内，产气效果较差（图10）。生产井产气效果证明基于脆性指数评价模型的煤层气开发有利区的预测效果较好，可以指导煤层气开发方案设计。

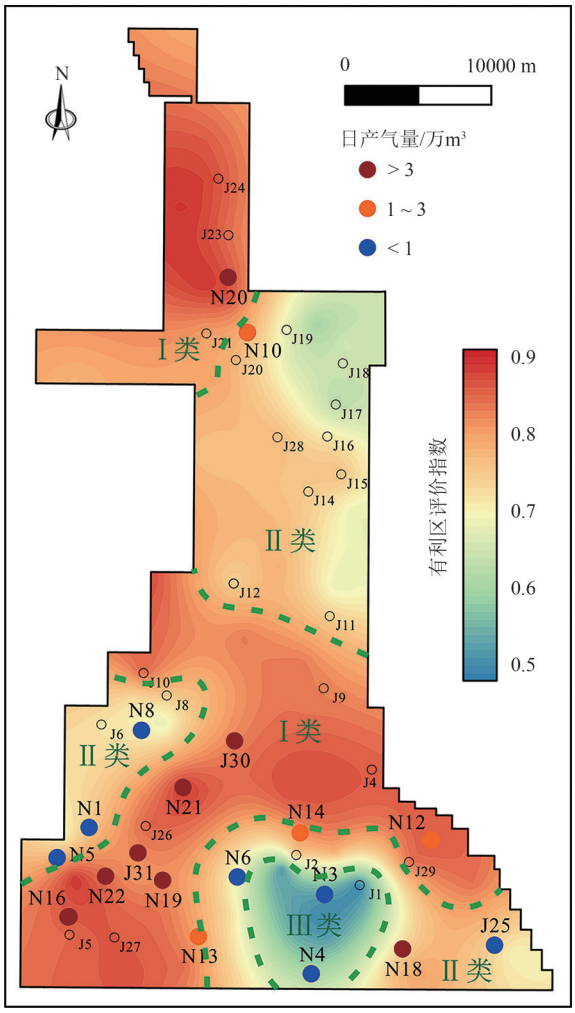


图 10　佳县地区 8 号煤层煤层气开发有利区预测

Fig. 10　Favorable area prediction of CBM development of No. 8 coal seam, Jiaxian area

4　结　论

（1）基于阵列声波测井、常规测井资料及三轴岩石力学实验建立了煤层力学参数动静态转换模型，考虑了矿物成分对煤储层脆性的影响，综合利用煤储层力学参数和矿物成分构建了煤层脆性评价方法。佳县地区 8 号煤层的脆性具有上低下高的纵向特征，西南、东北高，中部低的平面特征。

（2）脆性指数与抗压强度呈负相关，且与宏观煤岩类型、煤体结构均有明显的相关关系：半暗煤、半亮煤、光亮煤的脆性逐渐增强；原生煤、碎裂煤、碎粒煤的脆性逐渐增强。表明煤层孔隙空间越小，脆性矿物含量越高，脆性越强。

（3）压裂主裂缝长度随煤层脆性指数增加呈现先升高后降低的趋势，脆性指数在 45 ~ 60 时压裂缝长最大。基于脆性指数与煤层含气性预测了三类 8 号煤层煤层气开发有利区，其中Ⅰ类有利区产气效果最好，单井日产气量基本高于 3 万 m^3，可以有效指导煤层气开发方案设计。

参考文献：

[1] 罗平亚，朱苏阳. 中国建立千亿立方米级煤层气大产业的理论与技术基础[J]. 石油学报，2023，44(11)：1755 – 1763.

[2] 何发岐，董昭雄. 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[J]. 石油与天然气地质，2022，43(2)：277 – 285.

[3] 唐淑玲，汤达祯，杨焦生，等. 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[J]. 石油学报，2023，44(11)：1854 – 1866，1902.

[4] 张辰庆，许江，彭守建，等. 考虑断裂韧性影响的页岩气储层可压性评价方法[J]. 煤田地质与勘探，2019，47(5)：131 – 137.

[5] 袁俊亮，邓金根，张定宇，等. 页岩气储层可压裂性评价技术[J]. 石油学报，2013，34(3)：523 – 527.

[6] JARVIE D M，HILL R J，RUBLE T E，et al. Unconventional shale gas systems：The Mississippian Barnett shale of north-central Texas as one model for thermogenic shale-gas assessment[J]. AAPG Bulletin，2007，91(4)：475 – 499.

[7] JIN X C，SHAH S N，E TAL. An integrated petrophysics and geomechanics approach for fracability evaluation in shale reservoirs[J]. SPE Journal，2015，20(3)：518 – 526.

[8] 刘晓辉，郑钰，郝齐钧，等. 基于特征应力的准静态三轴煤岩脆性特征分析[J]. 岩石力学与工程学报，2021，40(12)：2454 – 2465.

[9] 申卫兵，张保平. 不同煤阶煤岩力学参数测试[J]. 岩石力学与工程学报，2000，19(增刊 1)：860 – 862.

[10] 杨永杰，宋扬，陈绍杰. 三轴压缩煤岩强度及变形特征的试验研究[J]. 煤炭学报，2006，31(2)：150 – 153.

[11] 艾林，周明顺，张杰，等. 基于煤岩脆性指数的煤体结构测井定量判识[J]. 岩性油气藏，2017，29(2)：139 – 144.

[12] 陈东锐，王延斌，韩文龙，等. 基于常规测井资料计算煤层力学参数[J]. 云南化工，2020，47(6)：135 – 136.

[13] 张杰，范立红，梅杰，等. 测井技术在樊庄地区煤岩结构识别中的应用[J]. 中国煤层气，2017，14(3)：12 – 16.

[14] WU D，LI B，WU J，et al. Influence of mineral composition on rock mechanics properties and brittleness evaluation of surrounding rocks in soft coal seams[J]. ACS Omega，2024，9(1)：1375 – 1388.

[15] 邱峰，刘晋华，蔡益栋，等. 基于测井的煤层力学特性评价及煤层气开发有利区预测-以沁南郑庄区块 3 号煤层为例[J]. 煤田地质与勘探，2023，51(4)：46 – 56.

[16] 李国永，姚艳斌，王辉，等. 鄂尔多斯盆地神木-佳县区块深部煤层气地质特征及勘探开发潜力[J]. 煤田地质与勘探，2024，52(2)：70 – 80.

[17] 赵振宇，郭彦如，王艳，等. 鄂尔多斯盆地构造演化及古地理特征研究进展[J]. 特种油气藏，2012，19(5)：15 – 20.

[18] 张泓，何宗莲，晋香兰，等. 鄂尔多斯盆地构造演化与成煤作用[M]. 北京：地质出版社，2005.

[19] YU L，FEI S X，ZHAO C H，et al. Optimal selection of favorable production areas for low-permeability sandstone gas reservoirs in the Benxi Formation of the Upper Carboniferous in Ordos Basin[J]. Unconventional Resources，2025，7：100134.

[20] 马明，刘池洋，王建强，等. 鄂尔多斯地块庆阳—鄂托克旗古隆起地质特征及其形成与演化[J]. 现代地质，2024，38(6)：1431－1444.

[21] 鞠玮，陶树，杨兆彪，等. 中国深部煤层气研究与勘探开发现状及其发展趋势[J]. 石油实验地质，2025，47(1)：9－16.

[22] 胡芸冰，刘燕，郭英海，等. 鄂尔多斯盆地南缘上石炭统本溪组泥岩元素地球化学特征及沉积环境启示[J]. 山东科技大学学报(自然科学版)，2022，41(1)：13－23.

[23] 孙立春，刘佳，李娜，等. 鄂尔多斯盆地神府区块深部煤层气井产量主控因素及合理压裂规模优化[J]. 石油实验地质，2025，47(1)：43－53.

[24] 石小虎，曹高社，姚泾利，等. 鄂尔多斯盆地陇东地区太原组 L58 井铝土岩元素录井在储层预测中的应用 [J]. 中国石油大学学报(自然科学版)，2025，49(4)：50－61.

[25] 张英男，白青林，束青林，等. 鄂尔多斯盆地西南缘浅埋藏储层致密化成因[J]. 中国石油大学学报(自然科学版)，2024，48(2)：24－36.

[26] 李勇霖，倪智勇，李晓光，等. 鄂尔多斯盆地杭锦旗地区断控气藏差异[J]. 吉林大学学报(地球科学版)，2024，54(3)：773－783.

[27] 余光展，王健，吴楠，等. 鄂尔多斯盆地志靖—安塞地区延长组7段致密砂岩微观孔隙结构评价[J]. 吉林大学学报(地球科学版)，2024，54(1)：83－95.

[28] 何发岐，雷涛，齐荣，等. 鄂尔多斯盆地大牛地气田深部煤层气勘探突破及其关键技术[J]. 石油与天然气地质，2024，45(6)：1567－1576.

[29] 刘卫国，韩登宇，苗文韬，等. 利用地球物理测井数据计算新疆托克逊县白嘴山地区岩石力学参数的方法探讨[J]. 铀矿地质，2013，29(5)：310－314.

[30] RICKMAN R，MULLEN M J，PETRE J E，et al. A practical use of shale petrophysics for stimulation design optimization：all shale plays are not clones of the Barnett Shale[C]// SPE Annual Technical Conference and Exhibition，21-24 September 2008，Denver，Colorado，USA.

[31] 高秋菊，宋亮，刘显太，等. 致密油藏储层地应力预测及微地震监测[M]. 青岛：中国海洋大学出版社，2020.

[32] 路艳军，杨兆中，SHELEPOV V V，等. 煤岩体积压裂脆性评价研究[J]. 油气藏评价与开发，2018，8(1)：64－70.

[33] 李庚. 多煤层煤系气富集效应及其产层组合优化[D]. 徐州：中国矿业大学，2023.

[34] YU K，GAN Y T，JU Y W，et al. Influence of sedimentary environment on the brittleness of coal-bearing shale：Evidence from geochemistry and micropetrology[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering，2020，185：106603.

[35] 侯俊胜. 煤层气储层测井评价方法及其应用[M]. 北京：冶金工业出版社，2000：124－147.

[36] XIA Y J，ZHOU H，ZHANG C Q，et al. The evaluation of rock brittleness and its application：a review study[J]. European Journal of Environmental and Civil Engineering，2022，26(1)：1－41.

[37] 马东民，李沛，张辉，等. 长焰煤中镜煤与暗煤吸附/解吸特征对比[J]. 天然气地球科学，2017，28(6)：852－862.

[38] 赵方钰，邓泽，王海超，等. 煤体结构与宏观煤岩类型对煤体吸附/解吸瓦斯的影响[J]. 煤炭科学技术，2022，50(12)：170－184.

[39] 姚艳斌，王辉，杨延辉，等. 煤层气储层可改造性评价：以郑庄区块为例[J]. 煤田地质与勘探，2021，49(1)：119－129.

[40] ALTAMAR P R，MARFURT K J. Identification of brittle/ductile areas in unconventional reservoirs using seismic and microseismic data：Application to the Barnett Shale[J]. Interpretation，2015，3(4)：T233－T243.

[41] 徐洲，孔祥伟，谢昕，等. 天然裂缝和层理的角度对深煤层水力裂缝扩展的影响[J]. 断块油气田，2025，32(3)：493-501.

[42] 蒋新立，李明忠，宋文宇，等. 鄂北大牛地气田深层煤层气钻完井关键技术及应用[J]. 断块油气田，2025，32(5)：863－868.

[43] 王梓麟，时婧玥，杨英，等. 深层煤岩孔隙结构表征及压裂缝导流能力影响因素[J]. 吉林大学学报(地球科学版)，2025，55(4)：1061－1076.

[44] 向文鑫，桑树勋，吴章利，等. 贵州省煤层气规划区块煤储层特征与有利区优选[J]. 煤田地质与勘探，2022，50(3)：156－164.

[45] 王舵，刘之的，王成旺，等. 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[J]. 石油与天然气地质，2024，45(6)：1772－1788.

[46] 刘大锰，姚艳斌，刘志华，等. 华北安鹤煤田煤储层特征与煤层气有利区分布[J]. 现代地质，2008，22(5)：787-793.

[47] 李俊乾，刘大锰，姚艳斌，等. 基于主地质参数的煤层气有利开发区优选及应用[J]. 现代地质，2014，28(3)：653－658.

[48] 胡鑫，姚卫江，胡正舟，等. 准噶尔盆地白家海地区西山窑组深部煤岩储层孔隙结构表征及发育主控因素[J]. 中国石油大学学报(自然科学版)，2024，48(4)：12－23.

[49] 全国煤炭标准化技术委员会. 煤层气勘探开发选区地质评价方法：NB/T 11145-2023[S]. 北京：中国标准出版社，2023.

[50] LIU D M，ZHAO Z，CAI Y D，et al. Characterizing coal gas reservoirs：A multiparametric evaluation based on geological and geophysical methods[J]. Gondwana Research，2024，133：91－107.

[51] 赵志刚，朱学申，王存武，等. 基于资源性与可压性的深部煤层气“甜点”预测[J]. 煤田地质与勘探，2024，52(8)：22－31.

[52] 闫涛滔，邓志宇，吴鹏，等. 鄂尔多斯盆地东缘临兴东区杨家坡区块煤层气井产能特征及主控因素[J]. 现代地质，2024，38(6)：1545－1556.

[53] LIU Z Q，ZHAO S H，HU Z Q，et al. Characteristics and controlling factors of coal-measure unconventional reservoirs-A case study of the Carboniferous-Permian in the Ordos Basin[J].

Unconventional Resources, 2025, 6: 100153.

[54] 张晓晴,康玉国,孙斌,等. 勃利盆地七台河断陷煤层气富集特征及有利区优选[J]. 吉林大学学报(地球科学版),2023, 53(4):1033 - 1047.

[55] 郭晓娇, 王雷, 姚仙洲, 李旭, 张林科, 王晓双. 深部煤岩地质特征及煤层气富集主控地质因素——以鄂尔多斯盆地东部M区为例[J]. 石油实验地质, 2025, 47(1): 17 - 26.

[56] 李胜利, 张亚雄, 于兴河, 等. 含煤层系相控型致密气储层非均质性评价的沉积要素与甜点预测策略:以鄂尔多斯盆地为例[J]. 地学前缘, 2025, 32(5): 389 - 403.

[57] 杨栋栋, 徐田武, 吴早平, 等. 渤海湾盆地东濮凹陷煤成气形成机理及成藏主控因素[J]. 断块油气田, 2025, 32(3): 398 - 405.

[58] QIN Y, SHEN J, LI X G, et al. Control degree and reliability of CBM resources in China[J]. Natural Gas Industry, 2022, 42(6): 19 - 32.

[59] ZHANG Q F, LI P J, LIU D M, et al. Sealing mechanisms and enrichment patterns of deep coalbed methane: insights from the Jiaxian block, Ordos Basin[J]. Scientific Reports, 2025, 15(1): 16397.

[60] 唐志潭, 刘敬寿, 闫霞, 等. 深层煤岩微构造对现今地应力的控制机理[J]. 地学前缘, 2024, 31(5): 344 - 357.