DOI:10. 19657/j. geoscience. 1000-8527. 202511250163

鄂尔多斯盆地东南缘深部煤储层有利区测井评价

魏 虎[1]，林 进[1]，李 涛[1]，周柯宇[2]，王齐心[2]，孟旋馨[2]，赵春翔[2]

（1. 陕西延长石油（集团）有限责任公司，陕西 西安 710000；2. 中国地质大学（北京）能源学院，北京 100083）

摘要：鄂尔多斯盆地东南缘延安气田深部煤层气资源量丰富，但由于其含气量分布规律不明确、富集区分类评价难等问题限制其勘探开发。充分利用测井资料，结合岩心观察、现场试验等资料，利用随机森林、多元线性回归的方法对研究区本溪组8#煤储层进行测井解释建模，计算出其煤体结构、渗透率、含气量等因素平面展布特征，采用多层次模糊综合判别法对研究区进行有利区评价。结果表明：（1）研究区本溪组8#煤多发育Ⅰ型原生结构煤，Ⅱ型原生结构煤集中发育在研究区西南部。（2）研究区8#煤含气量高值分布在研究区中西部，整体东部含气量高于西部，均值在22. 9 cm³/g。总体上渗透率的分布范围为0. 0228 ~ 1. 4396 mD之间，平均值为0. 4039 mD。高渗区主要集中在研究区西北，东南部。（3）Ⅰ类有利区集中在研究区西部，对应含气量高值区，此处多发育有泥岩顶板且埋深较浅，有利于煤层气的储存与开采。本研究实现对研究区深部煤层气的定量认识与精细评价，为后续勘探开发提供有力指导。

关键词：深部煤层气；测井评价；有利区评价；随机森林；鄂尔多斯盆地

中图分类号：P618. 13；TE122. 3 **文献标志码：**A **文章编号：**1000-8527(2026)01-0154-15

Logging Evaluation of Favorable Areas for Deep Coalbed Methane Reservoirs in the Southeastern Margin of the Ordos Basin

WEI Hu[1], LIN Jin[1], LI Tao[1], ZHOU Keyu[2], WANG Qixin[2], MENG Xuanxin[2], ZHAO Chunxiang[2]

(1. *Shaanxi Yanchang Petroleum (Group) Co., Ltd., Xi'an, Shaanxi* 710000, *China*;
2. *School of Energy Resources, China University of Geosciences (Beijing), Beijing*, 100083, *China*)

Abstract: The Yan'an gas field on the southeastern edge of the Ordos Basin has abundant deep coalbed methane resources. However, exploration and development are limited due to unclear distribution patterns of gas content and difficulties in classifying and evaluating favorable areas. This study fully utilizes well logging data, combined with core observation and field tests, to perform well logging interpretation modeling of the Benxi Formation No. 8 coal reservoir in the study area using random forest and multiple linear regression methods. The spatial distribution characteristics of coal body structure, permeability, and gas content were calculated, and a multi-level fuzzy comprehensive evaluation method was used to assess favorable areas in the study area. The results show that: (1) Type I primary-structured coals are widely developed in No. 8 coal of the Benxi Formation, while Type Ⅱ primary-structured coals are mainly concentrated in the southwestern part of the study area. (2) High gas content areas of No. 8 coal are distributed in the central and western parts of the study area, with the overall gas content in the eastern part higher than in the western part, with an average of 22. 9 cm³/g.

收稿日期：2025-11-25；**修回日期：**2026-01-04；**编辑：**戚开静。

基金项目：陕西省重点研发计划项目（2025CY-YBXM-165）。

作者简介：魏虎，男，高级工程师，博士，1980年出生，主要从事油气田地质与开发研究工作。Email: weihutiger@163.com。

引用格式：魏虎，林进，李涛，等. 鄂尔多斯盆地东南缘深部煤储层有利区测井评价［J］. 现代地质，2026，40（1）：154-168. DOI：10. 19657/j. geoscience. 1000-8527. 202511250163.

WEI Hu, LIN Jin, LI Tao, et al. Logging Evaluation of Favorable Areas for Deep Coalbed Methane Reservoirs in the Southeastern Margin of the Ordos Basin［J］. GEOSCIENCE, 2026, 40 (1): 154-168. DOI: 10. 19657/j. geoscience. 1000-8527. 202511250163.

Overall, permeability ranges from 0.022,8 mD to 1.439,6 mD, with an average of 0.403,9 mD. High permeability zones are mainly concentrated in the northwest and southeast of the study area. (3) Type I favorable areas are concentrated in the western part of the study area, corresponding to high gas content zones. These areas generally have shale caps and relatively shallow burial depths, which are favorable for coalbed methane storage and extraction. This study provides a quantitative understanding and refined evaluation of deep coalbed methane in the study area, offering strong guidance for subsequent exploration and development.

Key words: deep coalbed methane; well logging evaluation; favorable area assessment; random forest; Ordos Basin

0　引　言

鄂尔多斯盆地深部煤层气资源量丰富，估算资源量超 20×10^{12} m^3 [1-5]。近年来，随着煤层气开发深度逐渐由中—浅层向深部拓展 [6-7]，先后在大宁—吉县、临兴—神府、大牛地气田等多个区块深部煤层气勘探开发取得重大突破 [1-11]，为煤层气产业规模快速发展开创了新的局面。处在盆地东南缘，神木—佳县下方的延安气田深部煤层气资源量同样丰富，但是当前该区域处在勘探开发初期，存在成煤环境演化规律认识不清、含气量分布规律认识不明、富集区分类评价难等问题，极大制约了研究区深部煤层的规模增储和效益开发 [12-16]。

针对煤储层综合特征评价，国内外学者开展了大量研究工作。伴随煤层气研究深入，评价参数指标不断复杂化，王红岩、张建博等 [12-13] 提出煤层厚度、含气量、煤阶、埋藏深度、解吸条件、渗透率、水文地质条件及水文地质条件是煤层气选区的关键。姚艳斌等 [17-18] 认为在我国煤储层低孔低渗强非均质特征下，孔裂隙连通性也是煤层气资源评价中不可忽视的重要参数。数学方法的引入为选区评价的定量表征提供了更有效的手段。郭广山 [19-20] 在对柿庄南区块研究中利用灰色关联方法优选有利区评价的主控因素，进而构建了多层次模糊数学评价体系，并将研究区划分为三级开发单元。此外，灰色聚类法，加权平均法、地震分析技术和灰色关联分析等方法在煤层气选区评价中也得到广泛应用。近年来人工智能方法的引入拓宽了煤层气有利区评价的方法体系 [21-29]。综上，储层评价逐步从定性到定量化，再到细化为多阶段与分类的综合评价，推动资源评价向客观，精确方向发展。由于深部煤层气具有埋藏深度大、钻井成本高、取心难度大、化验测试数据少的特点，其储层特征评价难度较大，测井作为一种快速、高效、低成本的储层评价方法，通过建立适应的解释模型，可以有效解决深部煤层气储层精细评价问题。

因此，本研究充分利用测井资料，结合岩心观察、现场试验等资料，利用随机森林、多元线性回归的方法对鄂尔多斯盆地东南缘延安气田本溪组 8#煤储层进行测井解释建模，计算出其煤体结构、渗透率、含气量等因素，最后采用多层次模糊综合判别法对研究区进行有利区评价，实现对研究区深部煤层气的定量认识与精细评价，为后期勘探开发提供理论依据。

1　研究区概况

鄂尔多斯盆地位于我国中西部地区，地跨陕西、甘肃、宁夏、内蒙古、山西五省区，是国内规模第二大的沉积盆地 [30]。该盆地基底由太古宙麻粒岩及下元古界绿片岩构成，其地质结构由古生代海相与海陆过渡相克拉通盆地，以及中生代陆相湖盆叠置形成 [1, 14-16]。盆地内可划分为六个主要构造单元，分别是西缘逆冲带、天环坳陷、渭北隆起带、伊陕斜坡、伊盟隆起带和晋西挠褶带 [1, 24, 30-31]。本文研究所涉及的煤储层评价井主要分布于盆地中东段的伊陕斜坡区域（图1）。

鄂尔多斯盆地上古生界地层序列中，自下而上依次沉积了上石炭统本溪组、下二叠统太原组与山西组含煤层系，其沉积环境经历了从海陆交互环境向陆相的演变 [29]。该盆地主要的煤层富集场所是本溪组海陆过渡相及山西组三角洲相内的浅水沼泽与湿地。这些成煤环境主要分布于滨浅海区的障壁—潟湖—潮坪复合体系、三角洲平原的河道间湾以及三角洲前缘的浅水湾湖地带 [26-28]。对于本溪组而言，其成煤的关键地质背景是大范围展布的滨海平原。此环境的海岸带为障壁岛、潟湖及潮坪等浅水湿地地貌的发育创造了条件：靠海一侧在潮汐与波浪作用下易形成沿岸沙丘（障壁岛），靠陆一侧则多发育潟湖。滨海地带茂

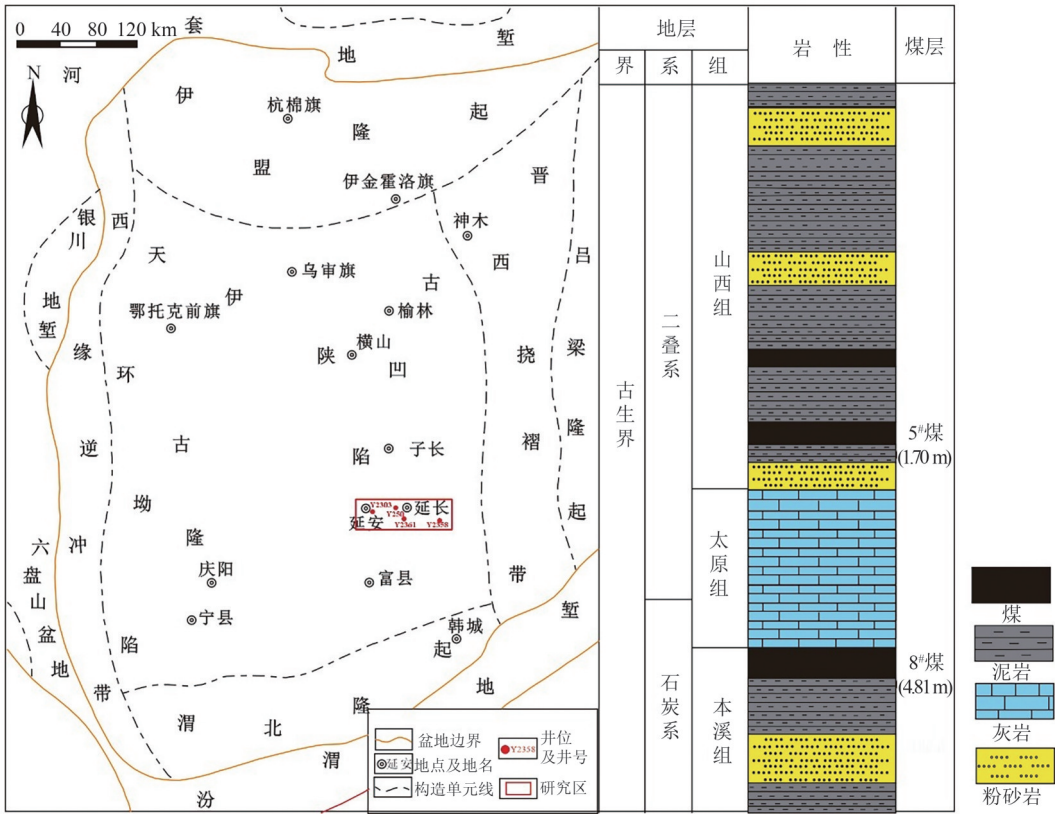


图1 研究区地质概况及综合岩性柱状图（据文献［24，26-29］修改）

Fig. 1 Geological setting and comprehensive lithologic column of the study area（modified from references［24，26-29］）

盛的植被，为泥炭沼泽的堆积提供了必要的有机质来源[27]。

2 测井资料预处理

对于原始测井资料的预处理是解释过程中乃至于勘探开发过程中的基础环节。原始测井资料往往会受到各种不可避免因素的影响从而导致与实际数据存在一定误差。现需要对其进行深度归位，影响环境校正和测井曲线标准化，从而提高数据质量与可靠性，为后续解释与建模奠定基础。

2.1 深度归位

作为测井曲线中一项重要的信息，岩心深度只有与所测量的各项测井参数准确对应才能更加精确地刻画测井信息[32]。而在井深测量过程中，温度梯度、泥浆浮力、井筒压力以及电缆自重、摩擦阻力等多重因素，均会改变电缆的应力-应变状态，导致仪器记录深度与实际井深出现系统性偏差，进而导致取心样品的录井深度与实际深度的不对应，使得测井解释结果产生偏差。现结合如下公式对岩心深度进行校正[33]：

$$\frac{h'}{h}=\frac{d_2'-d_1'}{d_2-d_1}=\frac{d_2'-d'}{d_2-d} \tag{1}$$

$$D=d'=d_2'-(d_2-d) \tag{2}$$

式中：h，h'分别为取心时实测煤层厚度和测井解释煤层厚度，m；d_1，d_2，d分别为取心测量的煤层顶板，底板和取样点深度，m；d_1'，d_2'，d'分别为测井解释煤层顶板，底板和取样点深度，m。

经由公式（1）（2）计算得到Y2015井岩心深度校正后的数据（表1）。

表1 Y2015井部分岩心归位计算数据

Table 1 Depth-shifting calculation data for partial cores from Well Y2015

岩心序号	录井顶深/m	录井底深/m	校正后顶深/m	校正后底深/m
1	2420.35	2420.55	2420.66	2420.82
2	2420.75	2420.91	2420.97	2421.10
3	2421.10	2421.34	2421.25	2421.44
4	2421.34	2421.50	2421.44	2421.56
5	2421.73	2421.93	2421.74	2421.90

2.2 影响环境校正

在钻井过程中，往往会产生扩径现象。这是由于易碎的煤体在被钻遇时可能发生坍塌，进一步会导致煤层的密度测井曲线值与实际密度值有所偏离，扩径越大，泥浆密度对于煤层密度的影

响越大。因此需要对密度曲线进行校正[33]。结合研究区域密度测井曲线值与岩心样品的实验测试密度值，发现在8#煤层扩径段煤的密度测井值显著大于样品测试值。接下来以Y2015井为例，钻井设计中对于500.20～2757.00 m井段的钻头直径为31.12 cm，而该深度范围内8#煤的井径测井值最大为32.72 cm，扩径率为5.16%。岩心测试结果显示2423.6～2423.72 m煤样密度为1.45 g/cm³，而密度测井值为1.77 g/cm³。

一般情况下，泥浆密度小于煤层密度。因扩径而产生的泥浆影响使得密度测井值小于煤的真实密度值[34]。而实际钻井过程中泥浆平均密度高达1.85 cm³/g，远高于煤的实际密度而造成Y2015井8#煤密度测井值显著高于岩心测试值。接下来需要结合扩径率与密度校正值来分析两者的关系。扩径率计算公式如下：

$$\alpha = \frac{\mathrm{CAL} - \mathrm{BITS}}{\mathrm{BITS}} \tag{3}$$

式中：α为扩径率；CAL为井径值，cm；BITS为钻头直径，cm。

计算完成后开展扩径率与密度校正量的相关分析如图2所示，随着扩径率的增加，泥浆密度影响增大，使得校正值增大。所以扩径影响下密度校正量与扩径率呈现正相关关系。

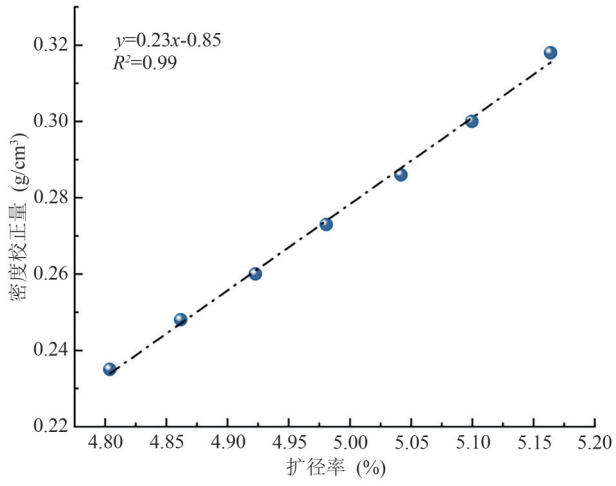


图2　密度校正量与扩径率拟合图

Fig. 2　Fitting plot of density correction versus borehole enlargement rate

因此得到研究区8#煤基于扩径影响的密度测井值校正模型为：

$$\mathrm{DENC} = \mathrm{DEN} - 0.23\alpha + 0.85 \tag{4}$$

式中：DENC为校正后的密度测井值，g/cm³；DEN为校正前的密度测井值，g/cm³；α为扩径率。

2.3　测井曲线标准化

测井曲线标准化是一种通过一系列数据处理的方法来尽量消除测井数据在采集过程时产生的系统误差。测井数据中的系统误差主要是由测井仪器的性能、仪器刻度的偏差、现场人员对于仪器的操作等各种因素所造成的，通过测井曲线标准化可以消除误差，从而使测井曲线的数据更加真实可靠。在本文中，选择频率直方图法进行测井曲线标准化[35-37]。由于常用标准化方法各有优缺点，选用合适的方法既能提升测井数据处理的精度与效率，又可以保证结果的可靠性和准确性[38]。

频率直方图法基于标准层测井响应特征在研究区域内相对稳定的前提。该方法选取关键井和标准层，将各井在标准层的测井值划分为若干区段，统计各井采样点落在各区段的频次，进而生成各井标准层的频率分布图。通过对比目标井与关键井同一标准层的频率分布形态：若两者形态基本一致，说明系统误差较小；若形态差异显著且标准层岩性无明显变化，则表明存在系统误差，据此校正目标井数据即可[38-41]。测井数值标准化只需要确定上下区间，如果某些异常点或错误数值处于理论或经验范围之外，则只需要该处异常点处理的依据。

在研究区内Y2358井的测井曲线数据与地层完整，资料比较全；因此将Y2358井作为标准井，将Y2358井的山西组的泥岩作为标准层，以自然伽马GR标准化为例，从标准井的泥岩GR直方图（图3）可看到其GR的数据分布在40～180 API之间，而峰值处于100～140 API，其中100～120 API与120～140 API之间数据点的频数相差不大；而待标准化井Y2303的泥岩GR数据则分布在20～180 API之间，峰值则在100～120 API（图3）。因此我们需要将Y2303井的GR测井曲线向右平移20 API，以此来完成自然伽马GR曲线的标准化。用上述方法对研究区内所有井的曲线都进行标准化处理。

3　深部煤层气储层测井精细评价

3.1　煤体结构测井精细评价

3.1.1　煤体结构特征

煤的煤体结构反映了煤储层的完整性程度，

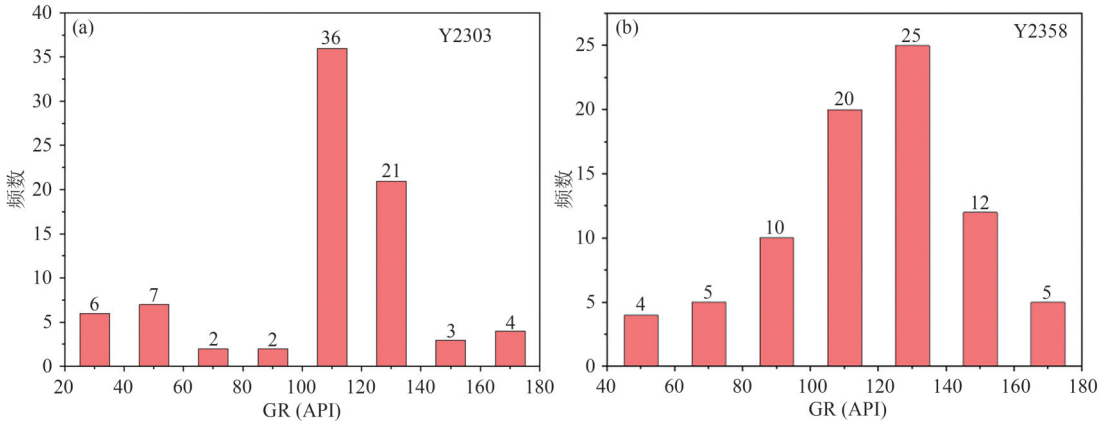


图3 未标准化井的GR直方图（a）和标准化后准井的GR直方图（b）

Fig. 3 GR histograms for unstandardized well（a) and standardized key well（b）

深部煤的煤体结构可分为原生结构煤、碎裂结构煤、碎粒结构煤及糜棱煤。对研究区内6口井的73块煤样进行岩心观察（图4），结果显示区域内多发育为原生结构煤，多见裂隙发育被方解石充填。为更好量化表征煤体结构，避免肉眼观察带来的误差，特引入煤体结构指数计算公式（5），同时进一步将原生结构煤按照割理发育程度划分为Ⅰ型原生结构煤和Ⅱ型原生结构煤，其中Ⅰ型原生结构煤煤体整体较暗，割理裂隙不发育，Ⅱ型原生结构煤割理裂隙较为发育，煤体较亮。分类计算后，研究区共有Ⅰ型原生结构煤33块、Ⅱ型原生结构煤35块，碎裂结构煤共5块。

$$N = \frac{AC \times CAL}{100 \times DEN^2} \tag{5}$$

式中：N为煤体结构指数。当平均煤体结构指数N小于50且多数小于40时，可视为原生结构煤；N处于50～60之间的视为碎裂结构；N大于60且多数大于80时，可视为碎粒-糜棱煤。

3.1.2 测井曲线特征选取

不同煤体结构因破碎程度不同，其物理特性及化学成分发生改变，对应的测井曲线响应特征不同。随着煤体结构破碎程度增加，煤中宏观-微观尺度的孔裂隙也对应增加，孔隙度增加，对应低密度曲线（DEN）；构造煤的低密度、高孔隙度特征也导致声波在其内部的传播速度明显低于原生结构煤，但振动波的折射次数随破碎程度增大而增大，因此表征为声波时差曲线（AC）值较大；另一方面，随着煤层破碎程度的增加，在钻井过程中更容易出现井壁坍塌现象，导致扩径严重，因此井径（CAL）曲线值与煤体结构破碎程度呈正相关关系；同样，煤层破碎使得孔隙发育，吸附并保存更多瓦斯气体，对应的电阻率曲线（RS/RD）增大；同时，可检测到的放射性物质越少，对应的自然伽马曲线（GR）降低。

在对测井曲线进行异常值清洗后，利用皮尔逊相关系数法对测井曲线进行相关性分析。从相关性热力图（图5）中可得，绝对值大于0.5即表现出较强相关性，因此煤体结构类型与井径呈现较大正相关，相关系数为0.84，与深侧向电阻率同样呈现正相关性，相关系数为0.52，与密度、自然伽马呈现较强负相关，相关系数分别为-0.8和-0.7。因此选用CAL、DEN、GR、RD四条测井曲线建立预测模型。

3.1.3 随机森林算法建模

随机森林算法是Breiman在Bagging算法和集成学习思想的基础上提出的一种组合分类预测算法[42-45]。将决策树作为bagging中的模型，其原理为从大小为N的样本中随机有放回的抽取N次，形成一个和原来样本一样大小的新的训练集，样本集中的每个样本被选中的概率相同，为$1/N$，这样重复k次，能得到k个新的训练集，以此为基础建立k个决策树，进而形成森林。随机森林的形成过程实际上对样本和特征都进行随机取样，避免了单个决策树出现的过拟合现象，并且采用的自主采样（bootstrap）在面对小样本数据也能发挥算法特性，可最大化利用数据本身。

在本次分类模型中，对已知煤体结构的煤样进行测井参数对应，得到341个数据点，将其中221个数据点作为训练样本，剩余120个数据作为测试样本。将Ⅰ型原生结构煤、Ⅱ型原生结构煤、碎裂结构煤分别赋值为1、2、3进行建模计算。测试样本不参与模型建立的过程，仅用于检测评估

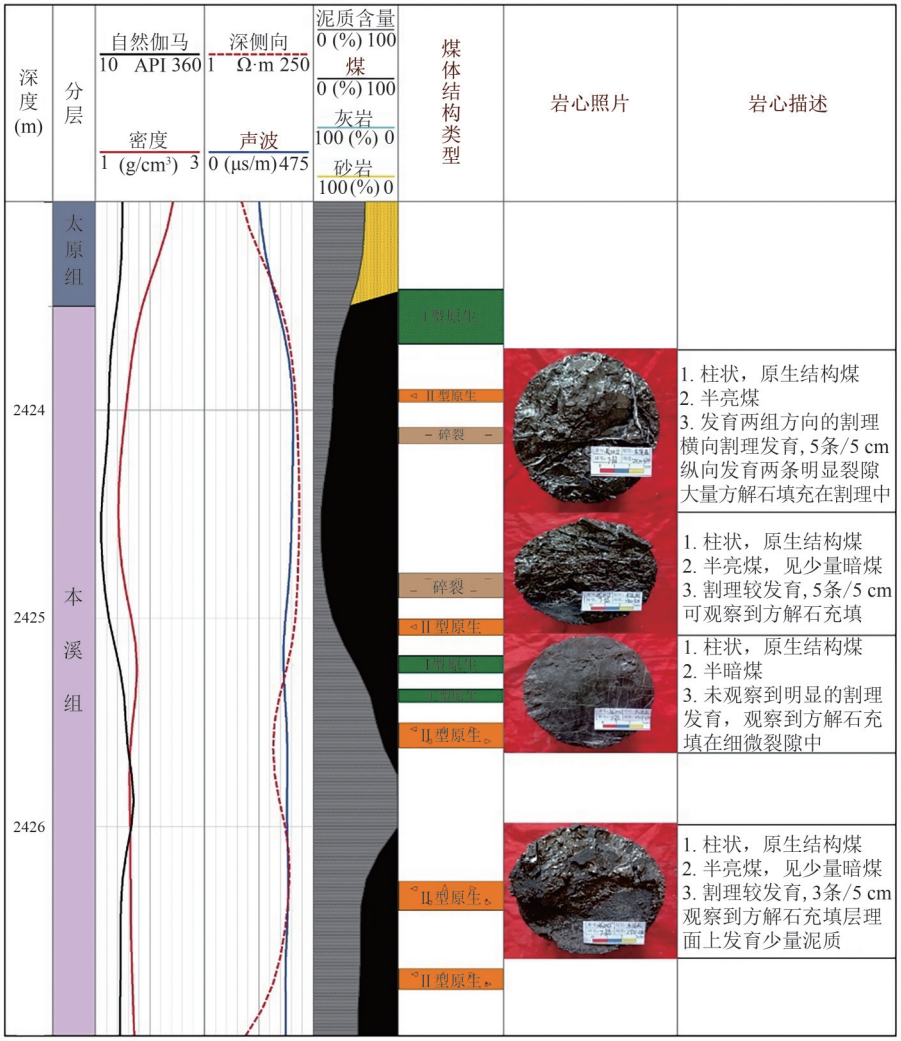


图 4　煤体结构岩心观察及测井曲线对应图

Fig. 4　Correspondence between coal structure from core observation and well logs

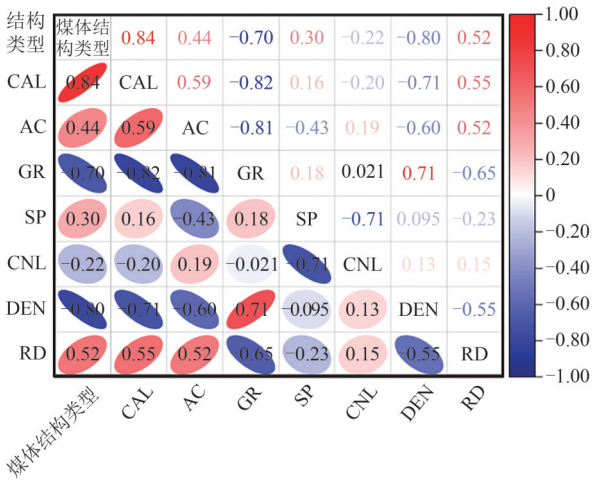


图 5　测井曲线相关性热图

Fig. 5　Correlation heat map of well logs

模型。在建立随机森林分类模型时需确定两个超参数：决策树个数以及节点分裂时选取的特征个数。在本研究中，相关性较大的曲线有 4 条；因此选取 4 作为节点分裂的特征个数，此时平均袋外误差最小。对于决策树个数过少会导致模型泛化，无法收敛影响模型精度，过多则直接会影响模型的训练速度，对精度没有提升且效率降低[38-45]；因此在本研究中默认 200 作为决策树的数量。

确定各参数以后，将 221 个训练样本代入 Python 软件中运行完成，用训练好的随机森林模型对测试样本进行预测，拟合准确度高达 0.97，该模型成立。将全区 114 口井、4576 个数据代入建立好的模型即可得到全区的煤体结构平面展布特征（图 6）。研究区多发育Ⅰ型原生结构煤，Ⅱ型原生结构煤集中发育在研究区西南部、中部，碎裂结构煤零星分布在研究区最南端。

3.2　渗透率测井精细评价

煤层的渗透率在储层评价中起到至关重要的

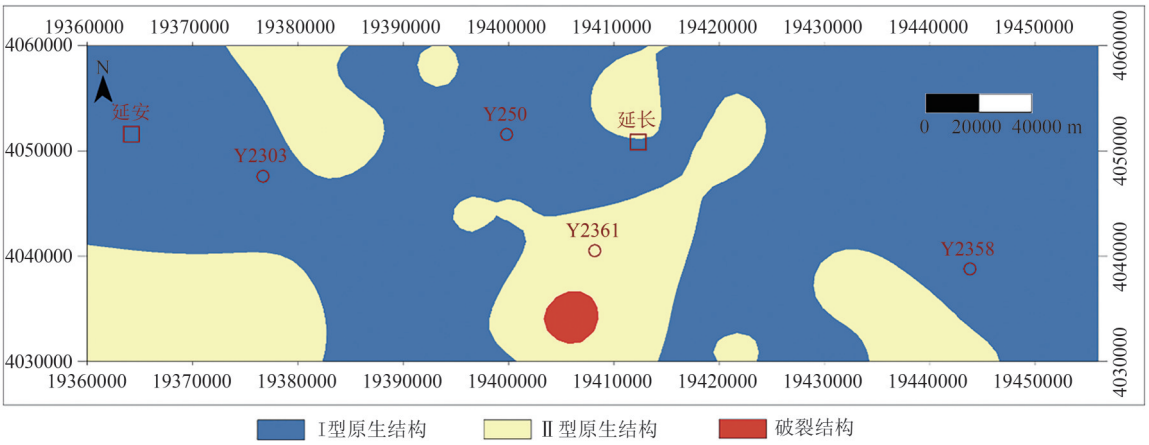


图6 研究区8#煤煤体结构平面分布图

Fig. 6 Distribution map of the No. 8 coal seam structure in the study area

作用[34]，在进行样品的渗透率测试实验中，氦气因其分子直径小、化学惰性强的特点，在恒定压力与温度条件下进行实验，得到研究区本溪组8#煤样测试渗透率数据（表2）。

表2 预测渗透率结果

Table 2 Predicted permeability results

样品序列	深度	层位	测试渗透率（mD）	预测渗透率（mD）
1	2744.64	本溪组	0.0034	0.3428
2	2747.00	本溪组	1.2130	0.3342
3	2747.88	本溪组	0.0161	0.5725
4	2165.04	本溪组	0.0022	0.8478
5	2166.86	本溪组	0.0055	0.7570
6	2224.12	本溪组	0.0073	0.2999
7	2800.78	本溪组	0.0055	0.2127
8	2425.00	本溪组	0.0071	0.1926
9	2174.24	本溪组	0.0032	0.0606
10	2659.42	本溪组	0.1118	0.3591
11	3081.80	本溪组	0.6240	0.4811
12	2744.50	本溪组	0.7130	0.3309
13	3123.96	本溪组	0.0062	0.1792
14	2164.88	本溪组	3.1100	0.8694
15	2467.80	本溪组	0.8200	0.3738
16	2420.60	本溪组	0.8841	0.0725
17	2690.00	本溪组	0.1208	0.4570
18	3294.62	本溪组	0.1020	0.0277

裂缝的发育情况对渗透率的影响最为直接[46-49]。而声波测井，密度测井和深侧向电阻率测井对裂缝发育有很高的敏感性。这是由于煤的裂缝越发育，其内充填的流体密度远低于煤基质，使得体积密度值降低，并且煤基质电阻率很高，地层水又是良好导电体，所以电阻率值明显降低[50-52]。因此最后选取AC、RD和DEN作为模型建立的参数进行多元线性回归拟合，得到渗透率计算公式如下：

$$K = 0.01082AC + 0.00000506302RD + 1.20361DEN - 5.64007 \quad (6)$$

式中：K为渗透率，mD；AC为声波时差值，μs/m；RD为深侧向电阻率值，Ω·m；DEN为密度测井值，g/cm^3。

结合测井资料，根据公式（5）对来自不同井的涉及测试实验的样品渗透率进行预测，结果统计如表2所示。

对统计结果进行均值和标准差处理，绘制误差分析图（图7）。可以观察到误差带面积较为可控，并且预测数据点在实测数据拟合曲线上下较小范围浮动，证明两者整体趋势相似。预测数据与实测数据在大部分区间较为相近，仅样品14的实测值远高于预测值。样品14的裂缝较为发育，而在模型建立时采用的裂缝发育的样本点较少，使得模型存在一定局限性。

采用公式（6）计算全区8#煤渗透率并绘制平面展布图（图8）。总体上渗透率的分布范围为0.0228 ~ 1.4396 mD之间，平均值为0.4039 mD。高渗区主要集中在研究区西北，东南部。西南部Y2303，Y2073井处于低渗区范围。

3.3 含气量测井精细评价

煤层气是一种自生自储的非常规天然气，其在煤储层中主要以吸附态赋存，其次为游离态和溶解态。尤其在深部煤层的高压条件下，吸附气占据绝对主导地位[53-54]。目前煤层气含气量的预测方法包括多元线性回归法，等温吸附计算法，

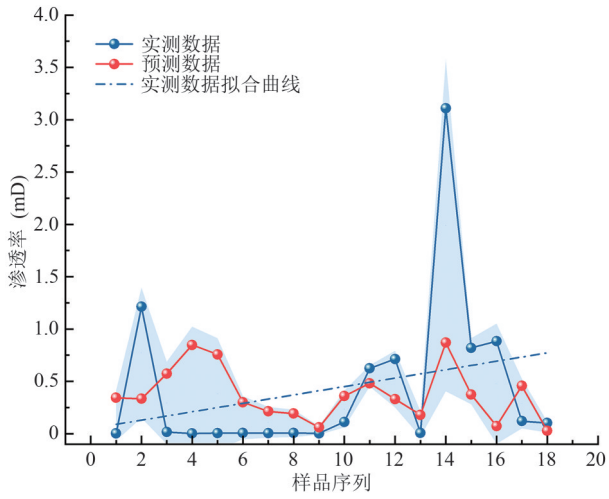


图 7　渗透率模型误差分析图

Fig. 7　Error analysis plot of the permeability model

使用人工智能算法等多种方法[55-57]。本研究采用多元线性回归法进行测井精细评价。

在石文软件中提取研究区内煤层气井的8#煤层的测井曲线中的数据（声波时差，自然电位，深侧向，浅侧向，自然伽马，密度，补偿中子）。用Origin软件把以上提取出来的数据与煤样的现场含气量解析数据进行拟合分别得到声波时差AC、补偿中子CNL、密度DEN、自然伽马GR、深侧向RLLD、浅侧向RLLS和自然电位SP与含气量的交会图。

其中声波时差AC、补偿中子CNL、自然伽马GR和自然电位SP与含气量呈现正相关关系，而密度DEN、深侧向RLLD和浅侧向RLLS与含气量呈现负相关关系。其中密度DEN和自然电位SP与含气量的相关性最高。依据图9的交会图可以看出声波时差AC、深侧向RLLD、浅侧向RLLS、自然电位SP、密度DEN这5种测井曲线与煤层气井的实测含气量的相关性均在0.5以上，因此选取这5个测井曲线来进行下一步的多元线性回归。

通过用Origin软件建立多元线性回归分析，取得的公式（式（7））可以高质量高精度地预测煤层含气量，该公式的相关系数R^2为0.81985，可以更好地预测全区的含气量。

$$V=-63.26131+0.17323\times AC+22.56741\times DEN-0.01921\times RLLD+0.02089\times RLLS-0.07358\times SP \quad (7)$$

式中：V为含气量，cm³/g；AC为声波时差，μs/m；DEN为密度，g/cm³；RLLD为深侧向，Ω·m；RLLS为浅侧向，Ω·m；SP为自然电位，mV。

通过石文软件把研究区内所有煤层气井的测井曲线的数据提取出来，再把提取出来的数据代入式（7），进而计算出整个研究区内的主要煤层气井的含气量，用surfer软件绘制煤层气井的预测含气量的分布趋势图。

用上述模型（式（7））计算的含气量与实测的含气量吻合度比较好（图10），其R^2为0.83549。通过计算所得的公式，测井预测的含气量绝对误差为-3.757 ~ 1.273 cm³/g（表3）。

依据公式（7）与研究区内其他井的测井参数画出研究区预测含气量的等值线图（图11），由图11可以看出，研究区8#煤含气量高值分布在研究区中西部，整体东部含气量高于西部，均值在22.9 cm³/g。

4　储层综合评价

4.1　多层次模糊综合评价法原理步骤

多层次模糊评价法是一种将定性转化为定量分析的方法，同时可以反映客观事物要素之间的不同层次[58-64]。主要解决多层次多指标系统的评价问题。将涉及的评价因素按照相关属性划分为不同类别，并以此建立隶属度函数。按照从低到高

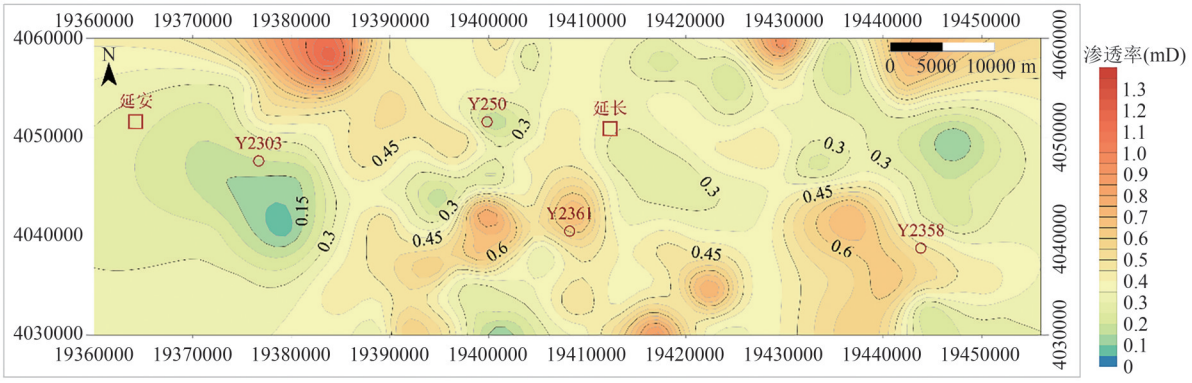


图 8　研究区8#煤储层渗透率平面图

Fig. 8　Permeability distribution map of the No. 8 coal reservoir in the study area

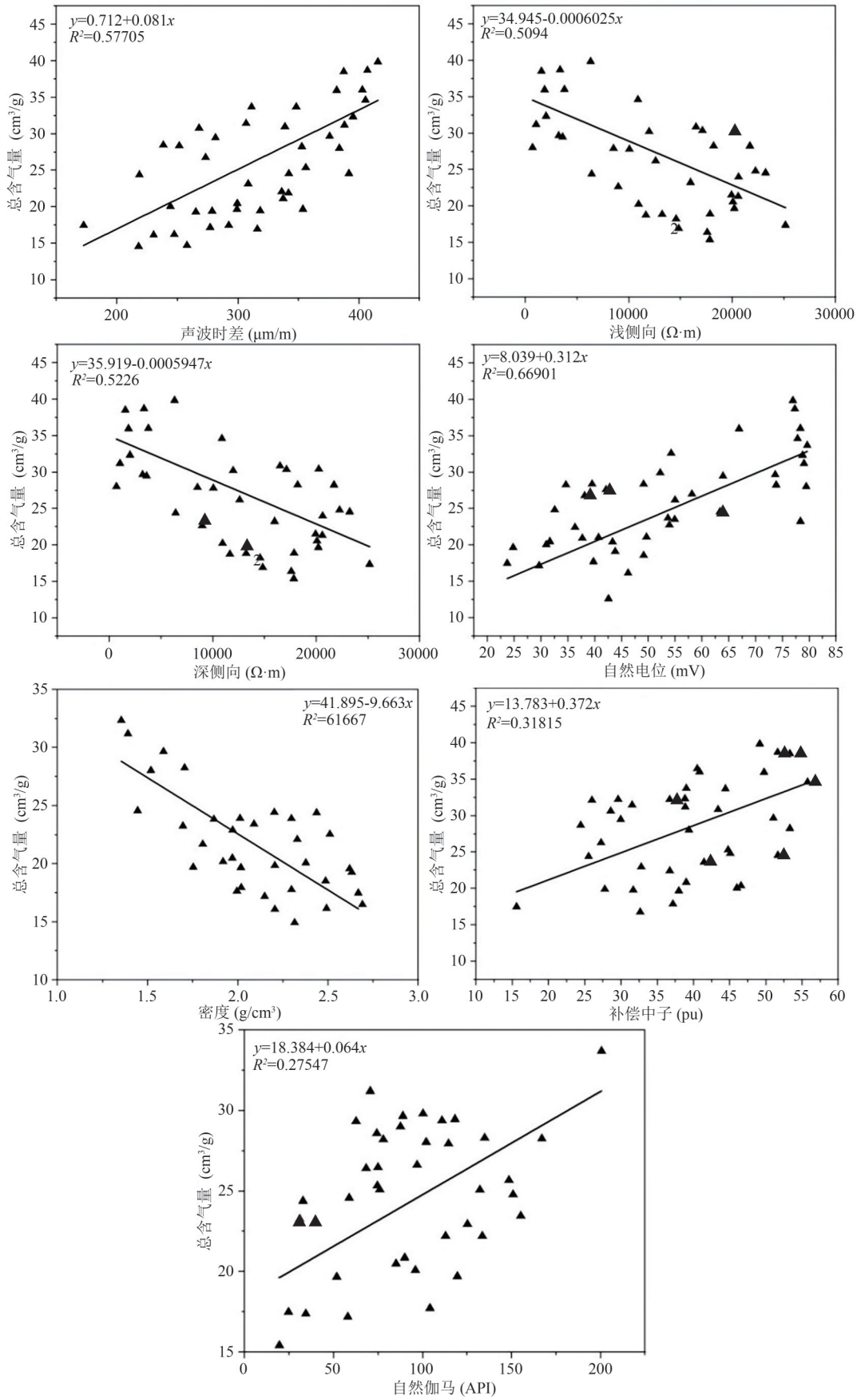


图9 测井参数与含气量交会图

Fig. 9 Crossplot of log parameters versus gas content

表 3　8#煤实测含气量与预测含气量统计

Table 3　Statistics of measured versus predicted gas content for the No. 8 coal seam

井号	样品	实测总含气量(cm³/g)	预测含气量(cm³/g)	绝对误差(cm³/g)
Y2015	Y2015-B1	17.495	18.188	0.693
	Y2015-B2	20.093	21.368	1.275
	Y2015-B3	20.497	18.347	-2.150
	Y2015-B4	17.733	13.976	-3.757
Y2214	Y2214-8-3	31.208	31.948	0.740
	Y2214-8-5	28.043	28.644	0.601
平均		22.512	22.079	-0.433

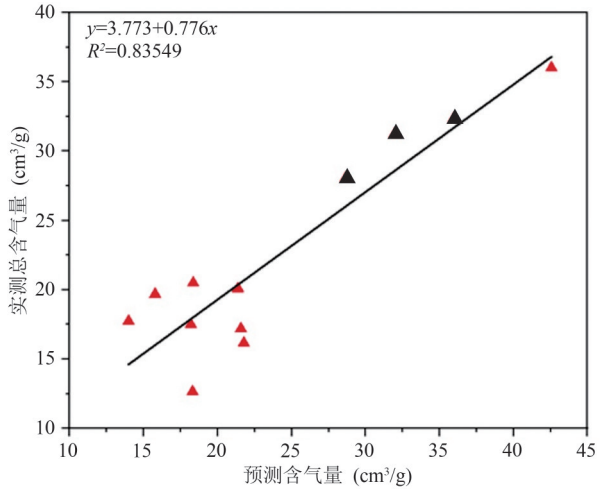


图 10　研究区 8#煤预测与实测含气量交会图

Fig. 10　Crossplot of predicted versus measured gas content for the No. 8 coal seam in the study area

的次序，将底层评价指标的结果作为上一层的模糊关系矩阵，再对上一层指标进行权重赋值计算，直到最高层次，最终得到整个系统的量化评价结果。

4.2　评价模型建立

在本研究中具体评价模型建立步骤如下：

（1）确定评价对象的影响因素集。

依据研究内容，将储层综合评价指数 A 定为评价体系第一级，表征研究区深部煤层气勘探开发潜力，其评价值越高，表明潜力越大、可产出性越强。煤储层地质综合潜力由资源条件、保存条件及开采条件共同确定。资源条件是煤层气井能否具有产能的物质基础；保存条件是煤层气资源形成至今能够存在的前提；而开采条件与煤层气工程开发紧密联系，直接影响开发效益[61-63]。因此本研究选用资源条件（A_1）、保存条件（A_2）及开采条件（A_3）这三类条件作为评价体系的二级评价指标。最后，在每个二级指标下确立对其影响的三级评价参数。煤储层评价参数众多，依据研究区概况及地质试验资料，参考《煤层气地质选取评价标准》NB/T 10013—2014，选用以下指标作为评价参数：含气量（A_{11}）、煤层厚度（A_{12}）、镜质体反射率（A_{13}）从不同方面影响煤层气资源条件；埋深（A_{21}）及顶板岩性（A_{22}）保证煤层气的保存条件；煤体结构（A_{31}）及煤储层渗透率（A_{32}）是保证煤层气开采的两个关键指标。

含气量是表征煤层气资源富集的主要参数之

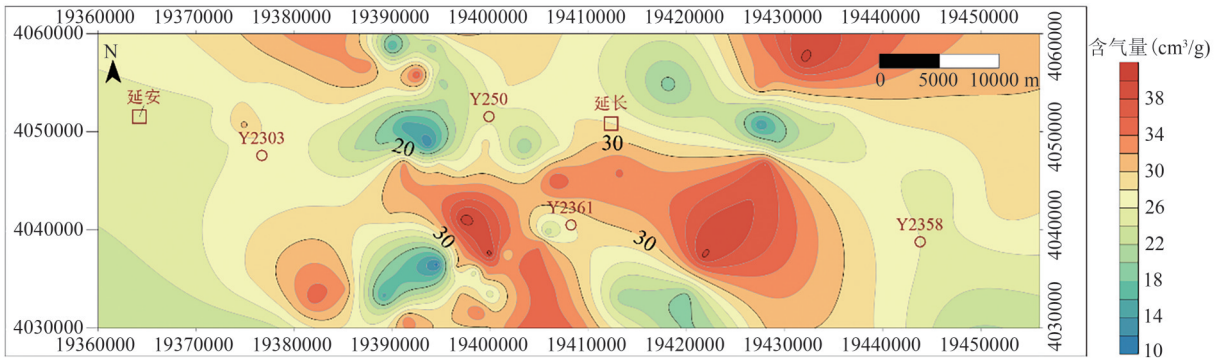


图 11　研究区 8#煤含气量平面展布图

Fig. 11　Gas content distribution map of the No. 8 coal seam in the study area

一[64]，是决定煤层气井能否高产的基础。一般而言，煤储层含气量越高，煤层气井产能越大，越具有开发价值。研究区8#煤含气量平面展布特征用多元线性回归法进行预测。煤层厚度是煤储层资源的物质基础，与含气量共同决定了煤层气储量。煤层厚度与生气潜力呈正相关关系[65]；同时煤层越厚，煤层气向顶底板扩散的路径越长，逸散难度越大[58-59, 61-63]。研究区煤层平均厚度（图12）在4.62 m，呈现西薄东厚的趋势。镜质组反射率是最重要的有机质成熟度指标。研究区8#煤镜质体反射率较大，平均为2.96 %属高阶煤。

煤层埋深的变化煤储层温度和压力同样处于动态变化过程中。埋藏深度过小，不利于煤层气保存，而埋藏深不过深，会导致煤层渗透率较低。因研究区为深煤层，因当前技术条件限制，越深越不利于煤层气的开采。研究区8#煤储层埋深（图12）呈现由西到东逐渐递减的趋势，西南部埋深较厚，达3000 m。顶板岩性是影响盖层封闭能力和煤层气保存的重要条件[58, 63]。封闭性好的顶板可有效减缓煤层气的垂向散失；封闭性差的顶板对流体封存能力弱，气体易于向外散失，致使煤层气藏遭到破坏[66]。前人研究认为泥岩型顶板泥质含量高，渗透率小具有良好的封闭性。灰岩型裂隙、溶孔均较发育，封闭性稍次于泥岩。砂岩对煤层气的封闭性很差。研究区顶板多为太原组灰岩（图13）。

渗透率是表征煤层气可采性的关键参数之一，对煤层气的可采资源量和采收率有直接影响，渗透率与煤层气整个流动过程都密切相关[60, 62]。压裂改造是提高煤层气井产能的重要措施，而煤体结构则是决定压裂效果的关键因素之一。原生煤和碎裂煤坚固性好、塑性差，易通过压裂形成高导能力的人工裂缝，可有效提高煤层渗透能力，提高开采效益；碎粒煤和糜棱煤塑性强，在压裂过程中较难形成主裂缝，所形成的裂缝导流能力差。

（2）确定各影响因素对评价对象的权重。

在建立层次结构后，在同一层次上对各参数重要性进行比较，即确定权重。两两元素通过标度法进行赋值，构造判别矩阵；利用Matlab求取矩阵的最大特征根及特征向量，通过一致性检验后，经归一化处理，最大特征值即为评价指标权

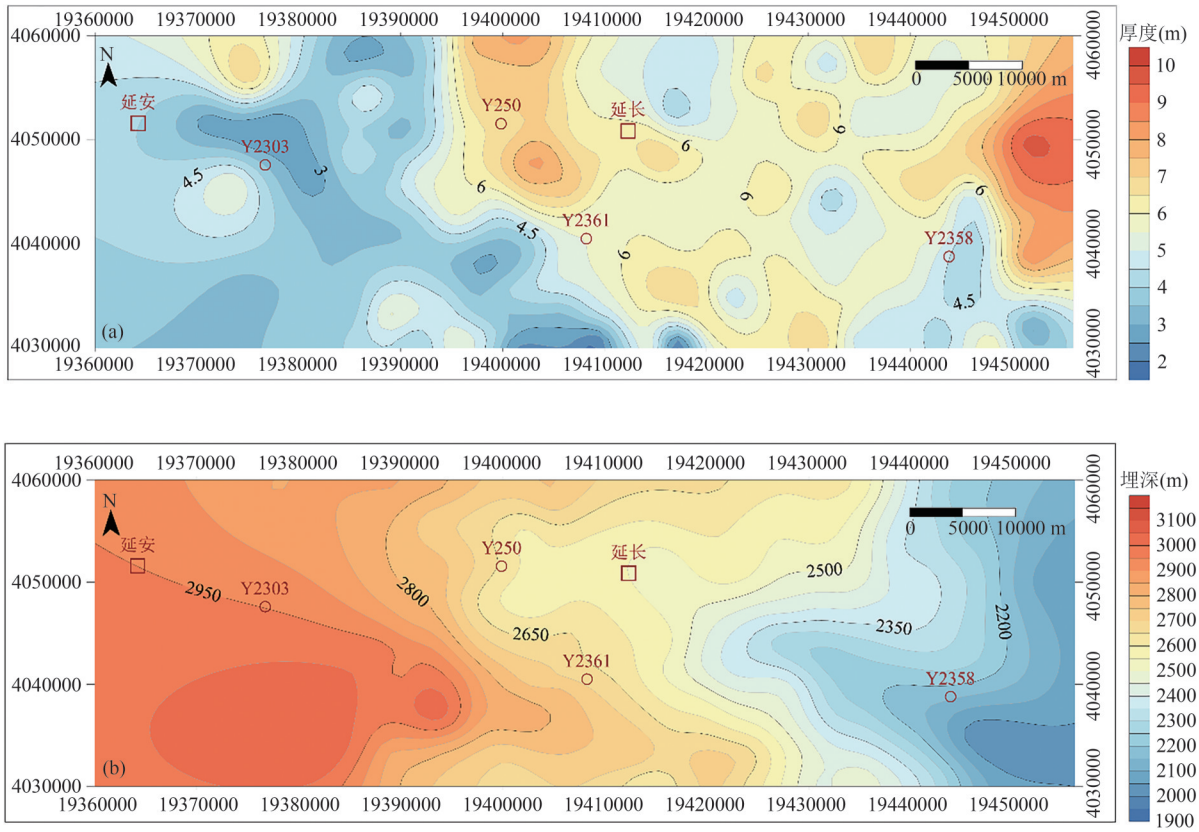


图12 研究区8#煤储层厚度（a）和埋深（b）平面展布图

Fig. 12 Distribution maps of reservoir thickness（a）and burial depth（b）for the No. 8 coal seam in the study area

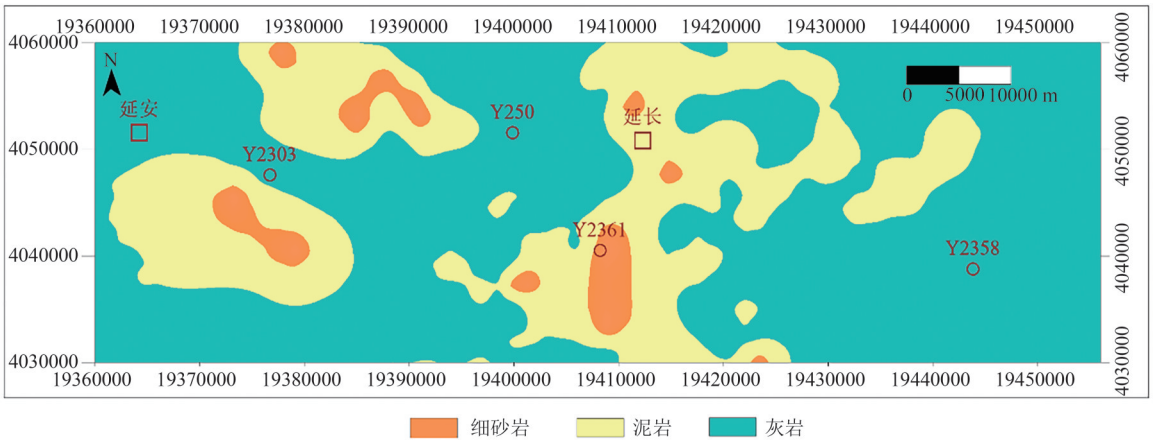


图 13　研究区 8#煤储层顶板岩性平面展布图

Fig. 13　Lithology distribution map of the No. 8 coal seam roof in the study area

重。根据此方法，计算出研究区各评价指标权重。含气量和煤层厚度是众多评价指标中最重要因素，其重要度为0. 254。影响煤层气保存条件的顶板岩性重要性最低，权重为0. 053。

表 4　研究区 8#储层地质综合评价权重划分

Table 4　Weight assignment for the comprehensive geological evaluation of the No. 8 reservoir in the study area

一级指标	二级指标	权重	三级指标	权重
储层综合评价指数	资源条件	0.59	含气量	0.43
			煤厚	0.43
			镜质体反射率	0.14
	保存条件	0.12	埋深	0.56
			顶板岩性	0.44
	开采条件	0.29	煤体结构	0.56
			渗透率	0.44

（3）确定评价对象各影响因素的隶属度。

对于研究区定性指标隶属度的确定，采用模糊统计的方法确定；对于定量指标，根据模糊模式识别的思想将其拓展。结合研究区概况、参考文献资料，研究区隶属度函数如表5所示。隶属度值越高，对煤储层地质开采选取越为有利。

（4）综合评价结果。

确定各指标权重及隶属度后，可根据研究区50口井数据资料计算出研究区8#储层综合评价指数A，A值越大，表明其勘探开发潜力越强。最后依据研究区评价指数A，划分储层类型，优选出有利区。

4. 3　评价结果

为方便研究开发，依据研究区8#煤储层地质评价得分等值线图（图14），结合本研究区实际地质概况，将研究区储层类型划分为3类有利区（表6）。依据综合评分结果及有利区分类标准，在研究区内进行平面优选，8#煤储层地质综合评价图（图15）。

研究区储层Ⅰ类有利区集中在研究区西部，对应含气量高值区，此处多发育有泥岩顶板，有利于煤层气的储存，煤层埋深适中，各影响因素均呈现有利趋势；西南部具有埋深高值区，不利

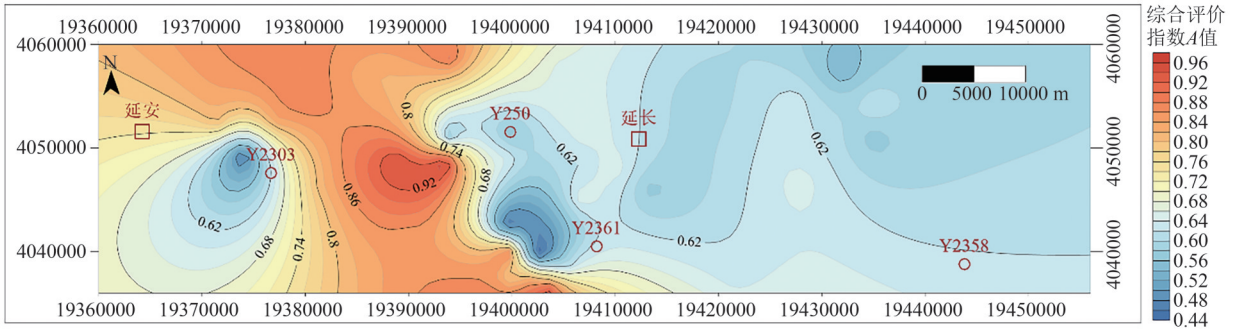


图 14　研究区 8#煤储层综合评价图

Fig. 14　Synthesis map for the comprehensive evaluation of the No. 8 coal reservoir in the study area

表 5 研究区 8#煤储层隶属度划分表

Table 5 Membership classification table for the No. 8 coal reservoir in the study area

评价参数		分类区间	隶属度
资源条件	含气量	≥ 15	1
		12 ~ 15	4/15 × V−3
		< 12	0.2
	煤厚	≥ 6	1
		2 ~ 6	0.2 × H − 0.2
		< 2	0.2
	镜质体反射率	≥ 2.1	1
		1.8 ~ 2.1	8/3 × R_O − 23/5
		< 1.8	0.2
保存条件	埋深	< 2800	1
		2800 ~ 3200	−0.0002 × D+6.6
		≥ 3200	0.2
	顶板岩性	泥岩	1
		灰岩	0.8
		砂岩	0.6
开采条件	煤体结构	原生 1	1
		原生 2	0.8
		碎裂	0.6
	渗透率	≥ 0.04	1
		0.02 ~ 0.04	40 × K − 0.6
		< 0.02	0.2

表 6 研究区 8#煤储层有利区分类

Table 6 Classification of favorable areas for the No. 8 coal reservoir in the study area

有利区类型	Ⅰ类有利区	Ⅱ类次有利区	Ⅲ类不利区
评分区间	(0.65,1]	(0.55,0.65]	(0.45,0.55]

于煤储层的开发，属于Ⅲ类有利区；而东部虽含气量较高，但煤层顶板多发育为灰岩，有逸散风险，不利于长期开发，因此属于Ⅱ类次有利区。研究区整体有利区发育集中，不利区零星分布，表明其勘探开发前景可观。

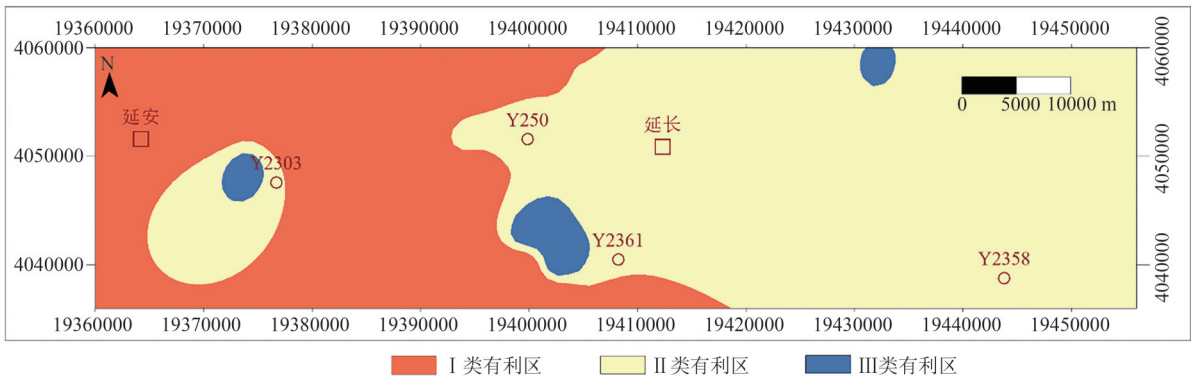


图 15 研究区 8#煤储层有利区平面分布图

Fig. 15 Distribution map of favorable areas within the No. 8 coal reservoir in the study area

5　结　论

本文基于现场岩心观察、实验分析和测井资料，对鄂尔多斯盆地东南缘延安气田本溪组8#煤储层煤体结构、渗透率和含气量特征进行精细评价，并依此构建有利区评价模型，明确甜点分布。

（1）应用随机森林方法，选用CAL、DEN、GR、RD四条测井曲线建立研究区8#煤煤体结构判别模型，结果显示研究区本溪组8#煤多发育Ⅰ型原生结构煤，Ⅱ型原生结构煤集中发育在研究区西南部、中部，碎裂结构煤零星分布在研究区最南端。

（2）应用多元线性回归的方法，基于常规测井参数建立了研究区8#煤渗透率及含气量测井解释模型。研究区8#煤含气量高值分布在研究区中西部，整体东部含气量高于西部，均值在22.9 cm^3/g。渗透率高值区集中在研究区西北，东南部，平均值为0.4039 mD。

（3）采用多层次模糊综合判别法，从资源条件、保存条件、开采条件3个维度构建深部煤储层有利区评价模型，确定了研究区深部煤储层有利区。结果显示Ⅰ类有利区集中在研究区西部，对应含气量高值区，此处多发育有泥岩顶板，有利于煤层气的储存，煤层埋深适中，为后续开采提供有力指导。

参考文献：

[1] 范立勇，周国晓，杨兆彪，等. 鄂尔多斯盆地深部煤层气差异富集的地质控制[J]. 煤炭科学技术，2025，53(1)：203－215.

[2] 吴裕根，门相勇，娄钰. 我国“十四五”煤层气勘探开发新进展与前景展望[J]. 中国石油勘探，2024，29(1)：1-13.

[3] 胡超俊，侯艳，徐礼贵，等. 鄂尔多斯盆地深部煤层气地震勘探关键技术进展与应用成效[J]. 石油学报，2023，44(11)：1903－1917.

[4] 霍超，郭海晓，王蕾，等. 双碳背景下中国深部煤层气勘探开发研究进展[J]. 科学技术与工程，2025，25(14)：5705－5720.

[5] 杨延辉，王玉婷，刘忠，等. 沁水盆地南部高煤阶煤层气高效开发对策与实践[J]. 中国石油勘探，2024，29(4)：17-30.

[6] 张嘉琪，刘曾勤，申宝剑，等. 国内外深层煤层气勘探开发进展与启示[J]. 石油实验地质，2025，47(1)：1－8.

[7] 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.

[8] 秦勇. 中国深部煤层气地质研究进展[J]. 石油学报，2023，44(11)：1791－1811.

[9] 孙昊. 鄂尔多斯盆地大宁-吉县区块深部煤层气富集成藏规律研究[D]. 南昌：东华理工大学，2024.

[10] 陶传奇. 鄂尔多斯盆地东缘临兴地区深部煤层气富集成藏规律研究[D]. 北京：中国矿业大学(北京)，2019.

[11] 徐凤银，聂志宏，孙伟，等. 大宁—吉县区块深部煤层气高效开发理论技术体系[J/OL]. 煤炭学报，1－17. https://doi.org/10.13225/j.cnki.jccs.YH23.1290.

[12] 张聪，李梦溪，胡秋嘉，等. 沁水盆地南部中深部煤层气储层特征及开发技术对策[J]. 煤田地质与勘探，2024，52(2)：122-133.

[13] 张建博，王红岩，钱凯，等. 煤层气勘探研究进展[J]. 中国煤层气，2004(1)：17－20.

[14] 李辉，张涛，侯雨庭，等. 鄂尔多斯盆地三叠系延长组长7段陆相页岩层系致密储层充注物性下限及其控制因素[J]. 现代地质，2024，38(6)：1498－1510.

[15] 贾高文，史建儒，杨永胜，等. 山西太原西山下二叠统太原组鳞木属化石研究[J]. 现代地质，2024，38(1)：240－247.

[16] 程先钰，张天福，张云，等. 鄂尔多斯盆地南缘直罗组顶部古沉积环境恢复：来自泥岩元素组成的证据[J]. 现代地质，2025，39(4)：1129－1142.

[17] 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.

[18] 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.

[19] 郭广山，李昊，田永净，等. 基于测井参数宏观煤岩类型预测及三维地质建模[J]. 中国地质调查，2022，9(1)：125－130.

[20] 郭广山，刘彦成，赵刚，等. 神府南区深部煤层气水平井产能地质-工程主控因素[J]. 煤田地质与勘探，2025，53(5)：65－80.

[21] 陈宗铭，唐玄，梁国栋，等. 基于深度学习的页岩扫描电镜图像有机质孔隙识别与比较[J]. 地学前缘，2023，30(3)：208－220.

[22] 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.

[23] 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.

[24] 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.

[25] 闫欣璐，唐书恒，傅小康，等. 含水层越流补给对煤层气井产能影响的数值模拟：以柿庄南区块为例[J]. 现代地质，2025，39(4)：1143－1155.

[26] 张嘉琪，刘曾勤，申宝剑，等. 国内外深层煤层气勘探开发进展与启示[J]. 石油实验地质，2025，47(1)：1－8.

[27] 牛小兵，喻健，徐旺林，等. 鄂尔多斯盆地上古生界煤岩气成藏地质条件及勘探方向[J]. 天然气工业，2024，44(10)：33－50.

[28] 于兴河，王香增，王念喜，等. 鄂尔多斯盆地东南部上古生

界层序地层格架及含气砂体沉积演化特征[J]. 古地理学报, 2017, 19(6): 935 – 954.
[29] 赵喆, 徐旺林, 赵振宇, 等. 鄂尔多斯盆地石炭系本溪组煤岩气地质特征与勘探突破[J]. 石油勘探与开发, 2024, 51(2): 234 – 247, 259.
[30] 黄方, 何丽娟,吴庆举. 鄂尔多斯盆地深部热结构特征及其对华北克拉通破坏的启示[J]. 地球物理学报, 2015, 58(10): 3671 – 3686.
[31] 万永平, 王振川, 韩双彪, 等. 鄂尔多斯盆地东南缘延安气田深部煤层气成藏地质特征及资源潜力[J]. 天然气地球科学, 2024, 35(10): 1724 – 1739.
[32] 钱志军. 测井数据深度校正方法探析[J]. 石化技术, 2023, 30(12): 53 – 55.
[33] 汤小燕. 煤层气储层密度测井响应特征及扩径影响校正研究[J]. 中国煤层气, 2015, 12(1): 32 – 36.
[34] 郑贵强, 杨德方, 李小明, 等. 沁水盆地柿庄北区块深部煤储层特征测井评价研究[J]. 煤炭科学技术, 2019, 47(6): 178 – 186.
[35] 刘大鹏, 刘长安, 赵小春, 等. 测井曲线标准化方法优选——以延长油田三权回收老井区为例[J]. 化工设计通讯, 2022, 48(7): 28 – 30.
[36] 牟启博. 测井曲线标准化的方法技术研究[J]. 世界有色金属, 2021(2): 172 – 173.
[37] 周万勇, 董亮, 李功强, 等. 鄂尔多斯盆地南部Y地区测井曲线标准化及其效果[J]. 工程地球物理学报, 2025, 22(1): 109 – 117.
[38] 杨嘉慧. 沁水盆地南部LJ区山西组煤层气测井评价[D]. 西安: 西安石油大学, 2023.
[39] 高春云, 周立发,路萍. 测井曲线标准化研究进展综述[J]. 地球物理学进展, 2020, 35(5): 1777 – 1783.
[40] 王振华, 张亮. 测井曲线标准化方法优选及其效果评价——以延长油田化子坪区块为例[J]. 西安石油大学学报(自然科学版): 2018, 33(2): 37 – 43.
[41] 余秋均. 多井测井资料的标准化处理方法——以M油田为例[J]. 石油地质与工程, 2020, 34(6): 118 – 122.
[42] 肖航. 基于随机森林方法的煤体结构测井识别[D]. 荆州: 长江大学, 2022.
[43] 肖航, 张占松, 郭建宏, 等. 基于随机森林结合地球物理测井资料的煤体结构识别方法及应用[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(24): 10174 – 10180.
[44] 张建国, 韩晟, 张聪, 等. 基于聚煤环境分区的煤体结构测井判别及应用——以沁水盆地南部马必东地区为例[J]. 煤田地质与勘探, 2021, 49(4): 114 – 122.
[45] 张云骥, 李倩, 蔡益栋, 等. 基于机器学习测井反演的宏观煤岩类型评价——以鄂尔多斯盆地佳县区块本溪组8号煤为例[J]. 现代地质, 2025, 39(05): 1427 – 1436.
[46] 刘娜, 康永尚, 李喆, 等. 煤岩孔隙度主控地质因素及其对煤层气开发的影响[J]. 现代地质, 2018, 32(5): 963 – 974.
[47] 许启鲁, 黄文辉, 唐书恒, 等. 深部中–高煤级煤储层孔隙结构与吸附性[J]. 现代地质, 2016, 30(2): 413 – 419.
[48] 伍岳, 夏东领, 郭秀娟. 鄂尔多斯盆地南缘长8致密砂岩储层裂缝发育特征及主控因素[J]. 现代地质, 2025, 39(05): 1282 – 1292.
[49] 何佑伟, 谢义翔, 乔宇, 等. 非常规油气藏不规则复杂裂缝表征方法[J]. 石油实验地质, 2024, 46(04): 748 – 759.
[50] 刘杰, 陈志峰, 高红星, 等. 滕县煤田下组煤地应力特征与灰岩夹层顶板稳定性控制研究[J]. 山东科技大学学报(自然科学版), 2024, 43(6): 10 – 23.
[51] 苗禾垚, 张军建, 杨斌, 等. 巨野煤田深部煤层CO2地质封存潜力评价及有利区优选[J]. 山东科技大学学报(自然科学版), 2025, 44(3): 56 – 67.
[52] 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.
[53] 陈小栋, 苏育飞. 大吉52井区深部煤层气储层测井解释精细评价[J]. 华北自然资源, 2024, (4): 20 – 25.
[54] 张喻, 潘月龙. 煤层气储层含气量预测方法[J]. 甘肃科技纵横, 2017, 46(3): 20 – 22.
[55] 白云思雨, 谢非,王赐勋. 基于测井参数的煤储层含气量预测方法研究[J]. 中国煤层气, 2024, 21(3): 29 – 32.
[56] 陈涛, 张占松, 周雪晴, 等. 基于测井参数优选的煤层含气量预测模型[J]. 煤田地质与勘探, 2021, 49(3): 227 – 235, 243.
[57] 刘晓, 陈贞龙, 杨松, 等. 基于测井参数的延川南气田煤层含气量预测模型[J]. 地质通报, 2025, 44(5): 792 – 800.
[58] 胡宝林, 杨起, 刘大锰, 等. 鄂尔多斯盆地煤层气资源多层次模糊综合评价[J]. 中国煤田地质, 2003, (2): 20 – 23.
[59] 胡慧婷, 卢双舫, 薛海涛, 等. 多层次模糊综合判别法在煤层气资源丰度潜力评价中的应用[J]. 数学的实践与认识, 2014, 44(11): 126 – 132.
[60] 李玲, 汤达祯, 许浩, 等. 柳林地区煤层渗透率影响因素及模糊综合评价[J]. 洁净煤技术, 2013, 19(5): 105 – 111.
[61] 石迎爽, 梁冰,薛璐. 基于多层次模糊综合评价的多层煤层气合采层位优选研究[J]. 煤炭技术, 2024, 43(7): 10 – 13.
[62] 杨晓娜, 曲艳伟. 多层次模糊综合评判法在豫西煤层气区块评价中的应用[J]. 河南工程学院学报(自然科学版), 2018, 30(1): 36 – 40.
[63] 张海锋, 张兵, 魏超, 等. 鄂尔多斯盆地东缘杨家坡区块煤层气开发潜力评价及开发地质单元划分[J]. 科学技术与工程, 2025, 25(19): 7920 – 7929.
[64] 郭莹莹, 倪小明, 张海锋, 等. 基于构造递阶优选的煤层气开发甜点区预测:以沁水盆地为例[J]. 现代地质, 2025, 39(6): 1 – 12.
[65] 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.
[66] 戴朝霞, 孙蓓蕾, 曾凡桂. 沁水盆地南部长治区块煤层气田的地应力特征[J]. 现代地质, 2020, 34(2): 266 – 272.