DOI:10. 19657/j. geoscience. 1000-8527. 202511060143

内蒙古五间房盆地低煤阶煤层气成藏地质特征及勘探方向

李 彬[1]，张云骥[2]，姚良文[1]，胡迎春[2]，赵柯鉴[2]，
谷美珊[2]，陈佳明[2]，蔡益栋[2,*]

（1. 内蒙古煤炭地质勘查(集团)一五三有限公司，内蒙古 呼和浩特 010000；2. 中国地质大学(北京)能源学院，北京 100083）

摘要：五间房盆地位于内蒙古锡林郭勒盟，其下白垩统大磨拐河组发育6层可采煤层，煤类以褐煤和长焰煤为主，属典型低煤阶煤层气藏。受低含气量、成藏机理复杂等因素制约，该类煤层气系统的系统性研究不足。综合地质、测井及岩心测试等多源数据，系统剖析了研究区煤层发育特征、储层物性、含气性及保存条件；基于XGBoost机器学习模型，实现了全区煤层含气量的高精度反演（决定系数R^2=0. 972）；进一步耦合层次分析法（AHP）与模糊数学方法，构建了涵盖资源条件与保存条件的多参数综合评价体系，圈定了煤层气有利富集区。研究结果表明：（1）3-3#煤层含气性最优，平均含气量达1. 71 m^3/t，高含气区随聚煤中心由盆地中部向东北部迁移；（2）“顶泥-底泥”型顶底板组合占比高、封闭性好，最有利于煤层气富集；（3）水文地质系统呈弱径流-半封闭状态，矿化度低，水动力微弱，满足生物成因煤层气生成与保存的关键条件；（4）综合评价显示，3-3#煤层Ⅰ类和Ⅱ类有利区分布最广，连续性最佳，资源潜力突出，具备优先勘探与开发价值。

关键词：低煤阶煤层气；成藏条件；有利区预测；五间房盆地；内蒙古；二连盆地

中图分类号：TE122；P618. 1 **文献标志码：**A **文章编号：**1000-8527(2026)01-0207-13

Geological Characteristics of Low-rank Coalbed Methane Accumulation and Exploration Directions in the Wujianfang Basin, Inner Mongolia

LI Bin[1], ZHANG Yunji[2], YAO Liangwen[1], HU Yingchun[2], ZHAO Kejian[2],
GU Meishan[2], CHEN Jiaming[2], CAI Yidong[2,*]

(1. *Inner Mongolia Coal Geological Exploration (Group) 153 Co., Ltd., Hohhot, Inner Mongolia* 010000, *China*;
2. *School of Energy Resources, China University of Geosciences (Beijing), Beijing* 100083, *China*)

Abstract: The Wujianfang Basin in Xilingol League, Inner Mongolia, hosts six mineable coal seams in the Lower Cretaceous Damoguahe Formation, dominated by lignite and long-flame coal, representing a typical low-rank coalbed methane (CBM) reservoir. Systematic study of such systems remains limited due to low gas content and complex accumulation mechanisms. Integrating geological, well-log, and core-test data, this study

收稿日期：2025-11-06；**修回日期：**2025-12-15；**编辑：**戚开静。

基金项目：内蒙古地质矿产集团有限公司重点科技研发项目（DKZDYF-202510）；国家自然科学基金项目（42130806，42372195）；中央高校基本科研业务费深时数字地球前沿科学中心“深时数字地球”中央高校科技领军人才团队项目（2652023001）；中央高校青年教师科研创新能力支持项目（ZYGXQNJSKYCXNLZCXM-E14）。

作者简介：李 彬，男，硕士，正高级工程师，1985年出生，从事非常规油气地质与开发研究。Email：56711792@qq. com。

＊通信作者：蔡益栋，男，教授，博士生导师，1985年出生，矿产普查与勘探专业，从事煤层气地质与开发研究。Email：yidong. cai@cugb. edu. cn。

引用格式：李彬，张云骥，姚良文，等. 内蒙古五间房盆地低煤阶煤层气成藏地质特征及勘探方向［J］. 现代地质，2026，40（1）：207-219. DOI：10. 19657/j. geoscience. 1000-8527. 202511060143.

LI Bin, ZHANG Yunji, YAO Liangwen, et al. Geological Characteristics of Low-rank Coalbed Methane Accumulation and Exploration Directions in the Wujianfang Basin, Inner Mongolia［J］. GEOSCIENCE, 2026, 40（1）: 207-219. DOI: 10. 19657/j. geoscience. 1000-8527. 202511060143.

systematically examines coal seam characteristics, reservoir properties, gas content, and preservation conditions. A high-precision gas-content inversion across the basin was achieved using an XGBoost model (R^2= 0.972). Coupling the Analytic Hierarchy Process (AHP) with fuzzy mathematics, we established a multi-parameter evaluation system incorporating resource and preservation conditions to identify favorable CBM enrichment zones. Results show: (1) the 3-3# seam has the highest gas content (0.93 m^3/t), with high-gas zones migrating northeastward from the basin center; (2) "top mudstone-bottom mudstone" roof-floor assemblages are prevalent and provide excellent sealing, favoring CBM enrichment; (3) the hydrogeological system exhibits weak runoff and semi-closed conditions, with low salinity and minimal water flow, satisfying key requirements for biogenic CBM generation and preservation; (4) class Ⅰ and Ⅱ favorable areas of the 3-3# seam are most extensive and continuous, indicating high resource potential and priority for exploration and development.

Key words: low-rank coalbed methane; accumulation condition; favorable area prediction; Wuijianfang Basin; Inner Mongolia; Erlian Basin

0 引 言

"十四五"以来，我国煤层气勘探开发取得显著成效，资源潜力持续释放。据我国勘探数据[1-2]，我国低、中、高煤阶煤层气的资源量分别为9.62×10^{12} m^3、11.12×10^{12} m^3和9.32×10^{12} m^3。低煤阶煤储层普遍存在含气量低、成藏机理复杂及富集规律认识不足等问题，导致当前国内煤层气研究与开发仍以中高煤阶区域为主，对低煤阶煤层气的系统性研究相对薄弱，显著制约了其规模化开发进程[3-4]。

五间房盆地位于内蒙古自治区锡林郭勒盟西乌珠穆沁旗，主要含煤地层为大磨拐河组，含可采煤层6层，煤类为褐煤及长焰煤，镜质体反射率(R_o)普遍低于0.5%，均为低煤阶煤[5]。近年来，随着勘探开发工作的持续推进，在盆地中部和北部实现该类型资源的突破，证实了五间房盆地具备低煤阶煤层气成藏的现实地质条件，并展现出良好的勘探潜力。

目前对五间房盆地大磨拐河组煤层气的含气性主控因素、成藏过程及空间富集规律尚缺乏系统认识，有利区带划分标准亦未明确，难以有效指导后续勘探部署。本文以五间房盆地大磨拐河组低煤阶煤层气为研究对象，综合运用多源数据，系统开展了基础地质条件、煤层发育特征、储层物性、含气性及保存条件等关键要素研究，阐明了低煤阶煤层气成藏地质主控地质因素与成藏模式，并构建了多参数融合的选区评价体系，预测了煤层气有利富集区带，以期为五间房盆地及同类低阶煤盆地煤层气资源勘探开发提供理论参考。

1 区域地质概况

五间房盆地在区域大地构造上位于内蒙古中部地槽褶皱系的西乌珠穆沁旗晚华力西地槽褶皱带，现今构造则隶属于二连盆地群（图1）[6]。该盆地群展现为"五坳一隆"的构造格局，其内部各主构造单元进一步发育出一系列北东向展布的次级凹陷与隆起，二者呈相间排列，构成多个地堑式或半地堑式断陷盆地[7]。研究区位于乌尼特坳陷西南部，总体表现为一轴向北东—南西的宽缓半地堑式向斜盆地，其两翼地层产状南缓北陡。盆地主体构造线方向与区域构造走向一致，内部地层主要包括侏罗系、下白垩统、新近系及第四系；边缘构造相对复杂，而盆地内部构造则较为简单[8]。

研究区内断裂构造不甚发育（图2），基于二维地震勘探资料，共解释断层4条、褶曲1条。所有断层均为正断层：其中，DF1断层位于研究区西南部，对大磨拐河组煤层的连续性造成一定程度的破坏；DF3与DF4断层平行分布于研究区西部，仅局部影响红旗组煤层的连续性；DF2为东部盆缘正断层，属控制性边界断裂，规模较大，构成了含煤地层的东部边界。研究区内唯一识别的褶皱构造为S1背斜，位于西部，轴向北东，两翼基本对称。综合构造发育特征、断层数量与影响程度分析，研究区构造复杂程度属简单类型。煤层主要赋存于宽缓向斜构造中，受断裂扰动较小，空间展布稳定，有利于煤层气的富集与保存[9]。

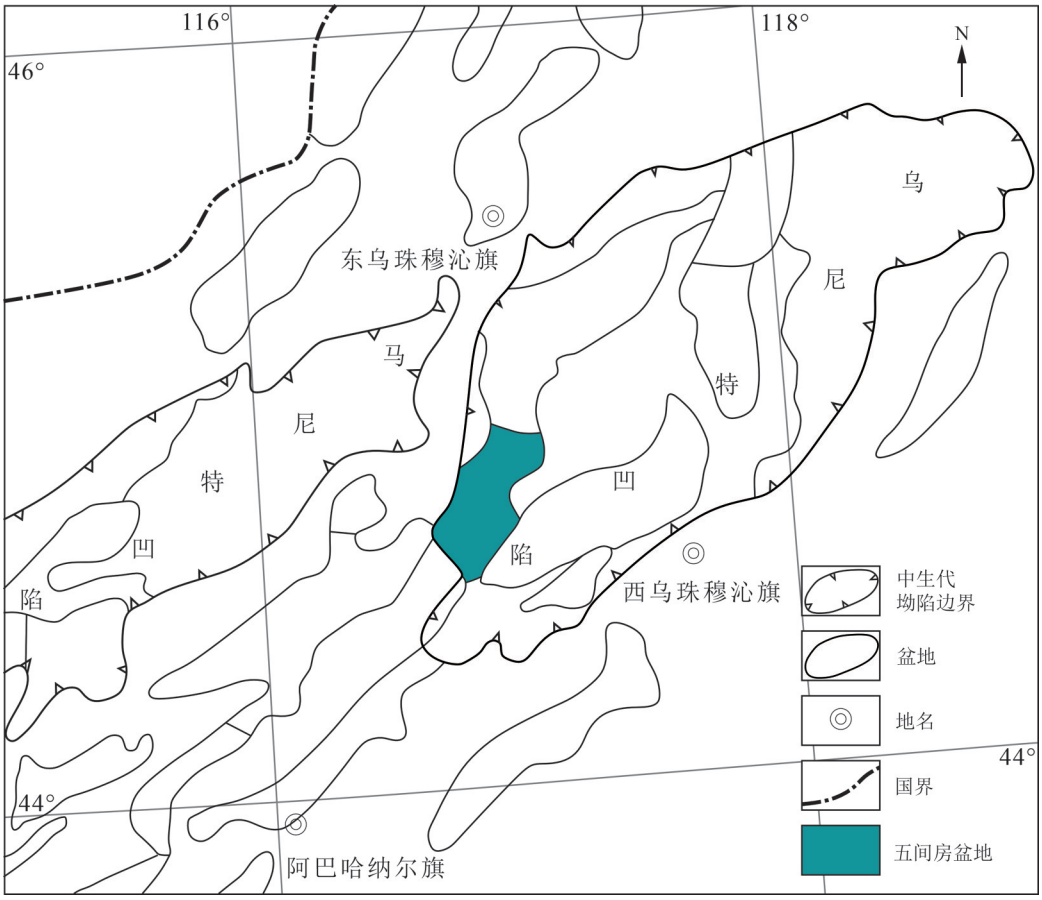


图 1　五间房盆地及周边盆地分布图

Fig. 1　Distribution of the Wujianfang Basin and surrounding basins

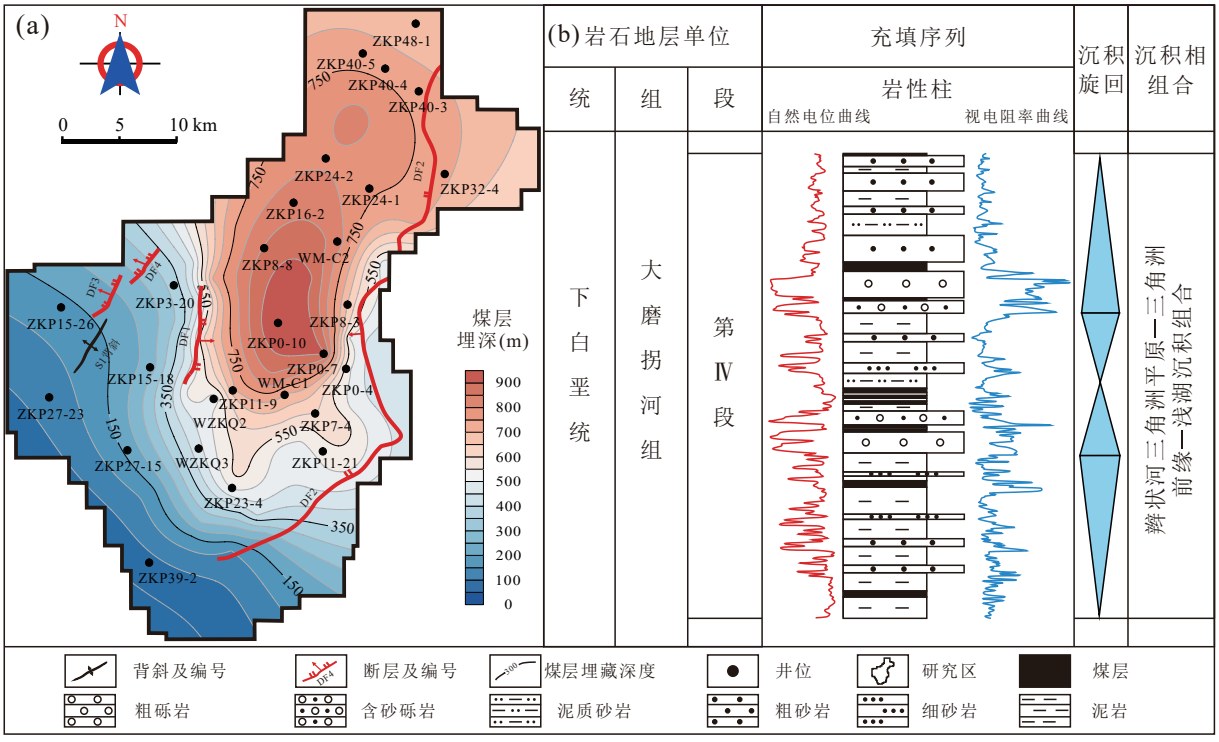


图 2　五间房盆地区域构造（a）和综合柱状图（b）

Fig. 2　Regional structure (a) and comprehensive stratigraphic column (b) in the Wujianfang Basin

五间房煤田为一全掩盖型煤田。钻孔揭示的地层自下而上依次为下侏罗统红旗组、上侏罗统白音高老组、下白垩统大磨拐河组、新近系上新统及第四系全新统。其中，下白垩统大磨拐河组与下侏罗统红旗组为区内主要含煤地层[10-12]。大磨拐河组第四段（K_1d^4）发育多套煤层，代表了区内重要的聚煤期。该时期盆地东西两侧边缘发育冲积扇体系，并分别向盆地方向进积演化为扇三角洲和辫状河三角洲沉积。同期，湖盆开始萎缩，水体迅速变浅；基底沉降速率转为缓慢而稳定，古气候亦由前期的干旱环境逐渐转变为温暖湿润条件。有利的沉积体系、稳定的构造沉降背景与适宜的古气候共同构成了大磨拐河组聚煤作用的关键地质条件。

2 煤层发育及含气性特征

2.1 煤层发育特征

下白垩统大磨拐河组含煤地层在五间房盆地内广泛分布，其中主要含煤层段为大磨拐河组第四岩段，平均厚度为257.72 m。该层段煤类以褐煤和长焰煤为主，共发育可采煤层6层，编号分别为2-1#、2-2#、2-3#、3-3#、4#、5#煤层，可采煤层总厚0.83～64.6 m，平均厚度为16.36 m，可采含煤系数为8.39%，表明该区含煤性良好（图3）。

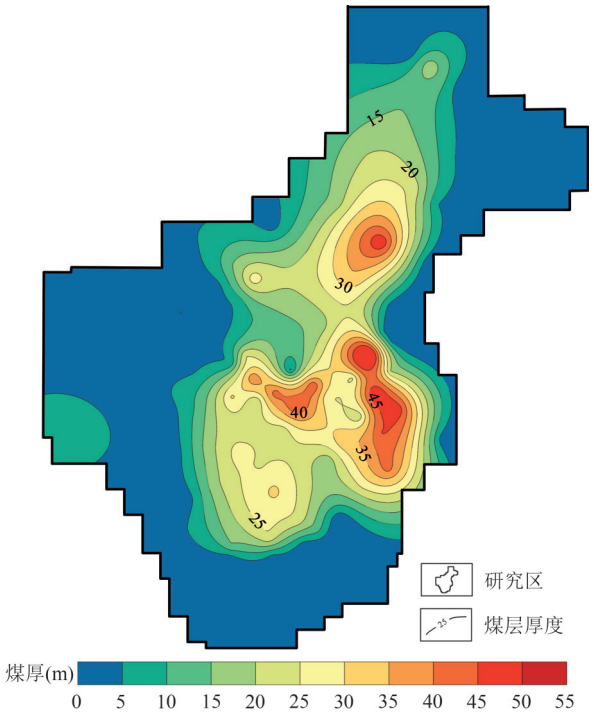


图3 大磨拐河组煤层总厚度等值线图

Fig. 3 Isopach map of total coal seam thickness in the Damoguaihe Formation

2.2 煤岩煤质特征

大磨拐河组煤层以暗煤为主，局部含少量丝炭，暗煤中偶见薄层亮煤条带。外生裂隙与内生裂隙均不发育。煤岩与煤质测试结果（表1）表明，煤的显微组分以镜质组为主，惰质组次之，未检测到壳质组。各主要煤层镜质组含量平均值为46.19%～71.29%；惰质组含量平均值为28.71%～53.81%。工业分析结果（表2）显示，各煤层水分含量平均值为8.96%～10.85%，煤层间差异较小，分布较为均匀。灰分产率平均值为18.77%～30.01%，其中盆地中心煤样灰分相对较低，而盆地边缘地带则更易形成高灰分煤。挥发分产率平均值为42.44%～44.12%，各煤层间波动较小，均属于高挥发分煤。

表1 五间房煤岩显微组分鉴定结果统计表

Table 1 Maceral identification results of coal in Wujianfang

煤层号	镜质组(%)	惰质组(%)	壳质组(%)
2-1	46.19	53.81	0
2-2	58.37	41.63	0
3-3	60.08	39.72	0
4	50.19	49.81	0
5	71.29	28.71	0

2.3 煤层含气性特征

煤层含气量是评价煤层气资源潜力与开发价值的关键参数之一[13-14]。研究区煤样测试结果显示，煤层平均含气量为1.71 m^3/t。测井曲线及其他地质参数对含气量的响应差异可有效反映煤储层特征的空间变化。因此，通过建立含气量与相关地质参数之间的定量关系，有助于识别不同含气水平煤储层的参数响应特征[15]。基于117个煤样数据，本研究计算了含气量与各项地质参数之间的皮尔逊相关系数，以分析其线性相关性（图4）[16]。地层深度（$r=0.50$）、自然伽马（$r=-0.35$）、电阻率（$r=0.64$）、煤层厚度（$r=0.66$）及顶板泥岩厚度（$r=0.71$）与含气量具有较显著的相关性，具体表现为：（1）深度：随埋深增加，地层压力升高、热演化程度增强，同时覆盖层封闭性改善，共同促进气体吸附与保存，使含气量呈上升趋势；（2）自然伽马：主要反映煤中黏土矿物含量，其值升高通常指示煤质变差、有机质纯度降低，导致吸附能力减弱，因而与含气量呈负相关；（3）电阻率：由于煤层气为非导电介质，含气量增加会降低煤层导电

表 2　五间房煤岩工业分析鉴定结果统计表

Table 2　Proximate analysis results of coal in Wujianfang

煤层编号	水分 M_{ad}(%) 最小值-最大值 平均数(点数)	灰分 A_d(%) 最小值-最大值 平均数(点数)	挥发分 V_{daf}(%) 最小值-最大值 平均数(点数)	固定碳 F_{cad}(%) 最小值-最大值 平均数(点数)
2-1	4.12 ~ 16.01 9.38(29)	9.28 ~ 48.30 30.01(29)	38.00 ~ 48.86 44.12(29)	24.99 ~ 50.83 35.55(29)
2-2	2.03 ~ 14.52 9.32(42)	10.18 ~ 44.01 25.76(42)	38.76 ~ 47.88 43.17(42)	27.23 ~ 48.74 38.40(42)
2-3	5.41 ~ 17.41 10.47(39)	8.66 ~ 37.81 21.29(39)	37.10 ~ 46.92 42.59(39)	29.70 ~ 48.11 40.54(39)
3-1	5.88 ~ 16.29 10.46(16)	7.14 ~ 46.76 19.73(16)	38.74 ~ 46.88 42.77(16)	26.62 ~ 51.41 41.23(16)
3-2	5.50 ~ 15.48 8.96(23)	9.76 ~ 39.24 22.11(23)	34.84 ~ 49.68 42.94(23)	28.12 ~ 52.24 40.68(23)
3-3	2.13 ~ 20.25 9.93(79)	8.79 ~ 44.61 21.86(79)	34.04 ~ 51.24 43.14(79)	25.32 ~ 50.71 40.15(78)
4	2.29 ~ 20.37 9.59(60)	8.18 ~ 39.80 18.77(60)	31.85 ~ 48.34 42.44(60)	29.32 ~ 53.42 42.39(60)
5	4.35 ~ 25.98 10.85(60)	7.32 ~ 39.17 19.14(60)	34.89 ~ 48.88 43.15(60)	29.32 ~ 50.81 41.04(60)

性，致使电阻率升高，二者呈正相关；（4）煤层厚度：较厚的煤层意味着更高的有机质丰度和更大的储气空间，且通常形成于更稳定的沉积环境，有利于生气与保气；（5）顶板泥岩厚度：泥岩作为良好盖层，其厚度增加可显著增强封闭能力，有效抑制煤层气逸散，促进含气富集。

鉴于地质参数与含气量之间可能存在复杂的映射关系，本研究首先构建了传统的多元线性回归（Multiple Linear Regression，MLR）模型进行试算。结果显示，MLR 模型的拟合决定系数（R^2）仅为 0.72，表明简单的线性模型难以充分刻画多源地质参数对含气量的综合控制作用。针对研究区煤层气地质数据呈现出的非线性、小样本及高维度特征，为进一步提升预测精度与泛化能力，本研究引入随机森林（Random Forest）、XGBoost 和 LightGBM 三种主流集成学习算法。相较于单一线性模型，集成学习通过构建多个弱学习器并聚合其结果，能够更准确地捕捉参数间复杂的非线性特征与地质规律[17]。

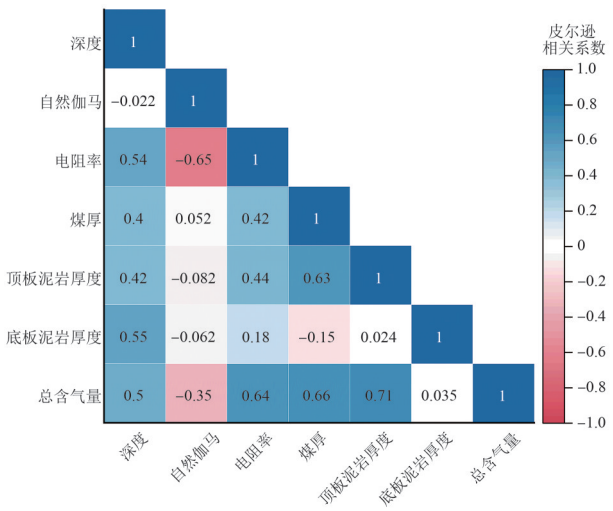


图 4　五间房盆地含气量与地质参数皮尔逊相关性热力图

Fig. 4　Pearson correlation heatmap between coalbed methane content and geological parameters in the Wujianfang Basin

在模型构建前，将 117 个样本按 7∶3 比例随机划分为训练集与测试集：前者用于模型训练与超参数优化，后者用于评估模型的泛化性能。

（1）随机森林（Random Forest）基于 Bagging 策略，通过自助法（Bootstrap）重采样技术构建多棵决策树。其核心在于引入随机性以降低模型方差。对于回归问题，最终预测结果为所有决策树输出的均值[18-20]：

$$\hat{y} = \frac{1}{N}\sum_{n=1}^{N} h_n(x) \tag{1}$$

式中：N 为决策树的数量，h_n 为第 n 棵树的预测值。该模型对异常值和噪声具有较强的鲁棒性，在训练集上的决定系数（R^2）达 0.92，均方根误差（RMSE）为 0.156。

（2）XGBoost（Extreme Gradient Boosting）是

一种高效的梯度提升决策树（GBDT）算法。与传统GBDT相比，XGBoost在目标函数中引入了正则化项以防止过拟合，并利用二阶泰勒展开优化损失函数。其目标函数定义为[21-22]：

$$Obj^{(t)} = \sum_{i=1}^{n} l(y_i, \hat{y}_i^{(t-1)} + f_i(x_i)) + \Omega(f_i) \quad (2)$$

$$\Omega(f) = \gamma T + \frac{1}{2}\lambda \| w \|^2 \quad (3)$$

式中：l为损失函数，f_i为第t轮训练的树模型，$\Omega(f_i)$为正则化项，T为叶子节点数，w为叶子节点权重，γ和λ为惩罚系数。XGBoost凭借其并行计算能力和处理稀疏数据的优势，在小样本高维地质数据预测中表现优异。其训练集的决定系数（R^2）为0.91，均方根误差（RMSE）为0.166。

（3） LightGBM （Light Gradient Boosting Machine）旨在解决海量数据下的训练效率问题。它采用基于梯度的单边采样（GOSS）算法减少样本数量，利用互斥特征捆绑（EFB）算法降低特征维度，并使用直方图算法加速分裂点的寻找[23-24]。其训练集的决定系数（R^2）为0.907，均方根误差（RMSE）为0.168。

为进一步全面评估模型的预测性能，将训练完成的模型应用于全部117个样本，对比拟合含气量与实测含气量的吻合程度[25]。结果（图5）表明，XGBoost模型在整体数据集上表现最优，其决定系数最高（0.972），均方根误差最低（0.09），显著优于其他两种模型。这表明XGBoost能够更准确地刻画地质参数与含气量之间的复杂关系，在煤层气资源评价中具有较高的预测精度与应用潜力。

基于训练完成的XGBoost模型，对研究区全域开展了煤层含气量反演，并绘制了预测含气量空间分布图（图6）。结果表明，含气量在平面上呈现显著的区域分异性，且与煤层发育中心的迁移趋势存在一定程度的耦合关系。早期聚煤阶段，含气量分布总体表现为“中部高、边缘低”的格局。随着沉积中心逐渐由盆地中部向东北部迁移，高含气量区亦随之向东北方向转移，形成“东北部显著富集、西北部普遍偏低甚至不发育”的分布特征。其中，3-3#煤层在研究区内展布广泛，空间上发育多个高含气量中心，尤以中部区域最为突出，整体平均含气量达1.71 m³/t，表明其赋存条件优越，具有良好的煤层气开发前景。2-1#与2-2#煤层的平均含气量虽与3-3#煤层相近，但其高含气量区主要集中于研

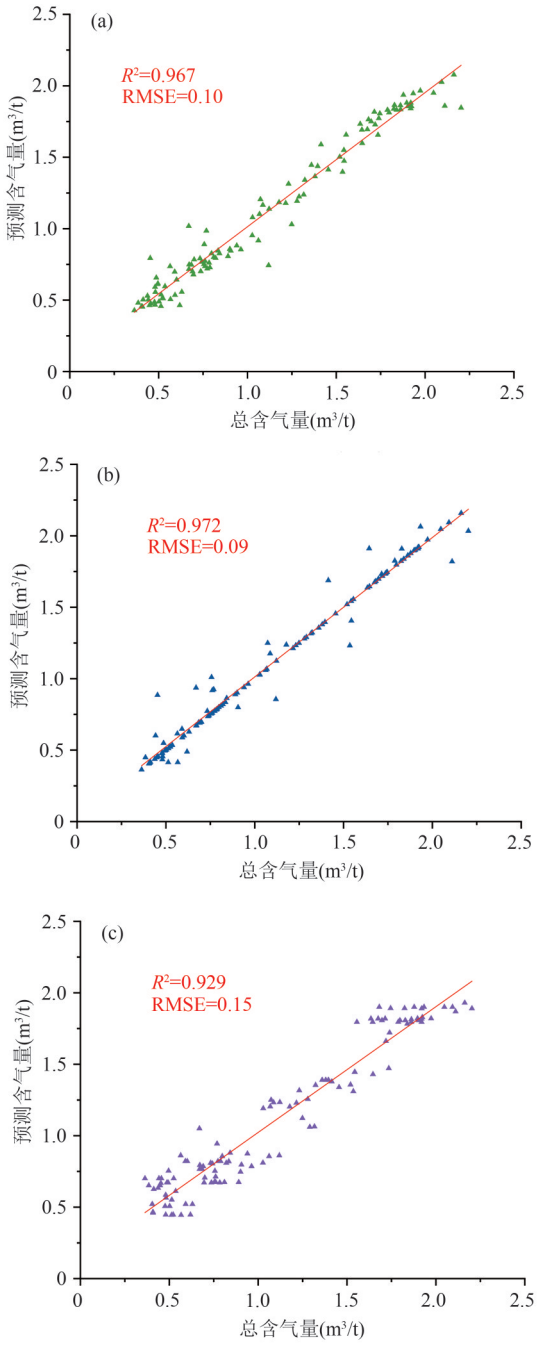


图5 机器学习预测含气量拟合结果图（a. 随机森林；b. XGBoost；c. LightGBM）

Fig. 5 Machine learning predicted gas content fitting results (a. Random Forest; b. XGBoost; c. LightGBM)

究区东北部及局部中部地带，煤层实际展布范围相对有限。此外，含气量等值线较为密集，空间变化梯度较大，反映出储层非均质性较强，指示在后续开发中可能需要针对局部富集带实施更精细的井位部署策略。相比之下，4#与5#煤层虽在局部存在含气量高值区，但整体平均含气量偏低，高值区域规模较小、连续性较差，综合评价其煤

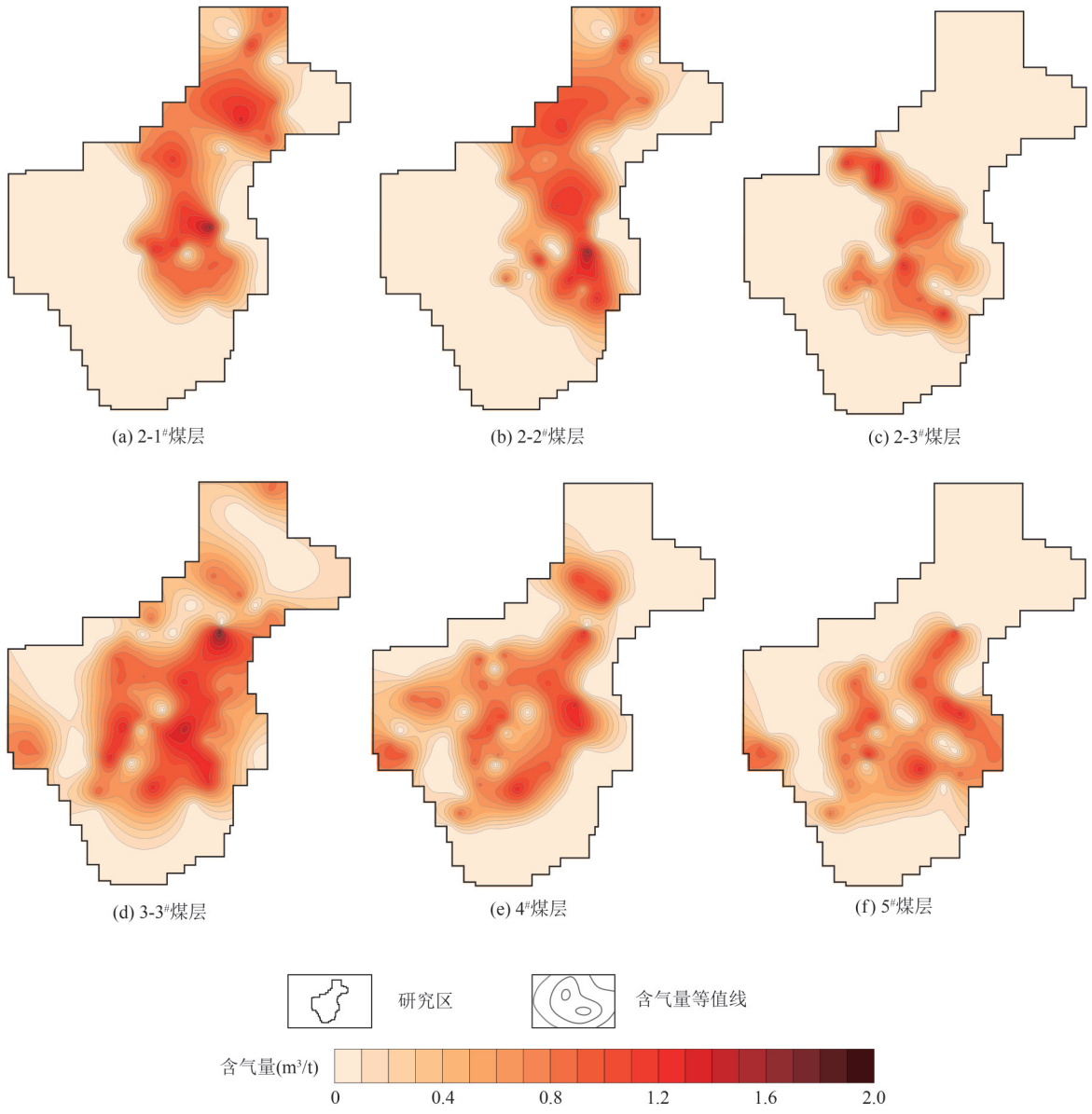


图6　大磨拐河组煤层含气量预测等值线图

Fig. 6　Gas content prediction isoline of Damoguaihe Formation coal seam

a. 2−1#煤层；b. 2−2#煤层；c. 2−3#煤层；d. 3−3#煤层；e. 4#煤层；f. 5#煤层

层气资源潜力和开发经济性可能弱于前三个主力煤层。

3　煤层气成藏条件

煤层气的成藏条件受沉积环境、煤层厚度及构造演化等多因素的综合控制[26]。其中，沉积环境决定了煤岩的物质组成、厚度及其空间展布特征，进而直接制约煤层的生气潜力与储集性能；水文地质条件通过调控地下水的径流方向、水动力强度及封闭性，对煤层气的保存与逸散过程起关键作用；构造演化则不仅影响煤层的埋深与现今地应力状态，还可能通过形成断裂、褶皱等构造形迹，改造煤层的连续性与渗透性，并进一步影响气藏的封闭条件与保存有效性。

3.1　沉积环境

根据五间房盆地的构造格局与沉积演化特征，研究区发育典型的浅水半地堑型聚煤模式。在该模式下，陡坡带一侧的扇三角洲平原或滨湖相带通常较狭窄，而缓坡带则广泛发育辫状河三角洲与滨—浅湖相沉积体系，富煤中心主要集中于缓坡带，常形成分布广、厚度大、连续性好的巨厚煤层。受断陷作用控制，凹陷边缘多沉积粗粒、

分选较差的砾石与角砾岩；而盆地主体部位则以湖沼相沉积为主，岩性以煤层及深色泥页岩为特征[27]。煤层的厚度与空间展布明显受沉积环境与基底沉降速率的耦合控制：在滨浅湖—湖沼相稳定发育期，泥炭沼泽持续扩展，有利于形成厚层、连续性良好的煤层；而在冲积扇主导的沉积环境下，沉积体系不稳定，煤层普遍较薄且易发生分叉或尖灭。以全区广泛发育的3-3#煤层为例（图7），较厚煤层主要赋存于湖泊相环境中，而三角洲相中煤层则相对较薄、分布局限。基底沉降速率是控制煤层发育的关键因素之一。基底沉降速率是控制煤层发育的关键因素之一。在背斜构造部位，基底沉降速率小，地势相对较高，可容纳空间有限且物源供给不足，不利于泥炭沼泽的长期发育与煤层保存；而在向斜部位，基底沉降速率较大，地势低洼，物源供给充足，沉积体系常处于补偿至过补偿状态，更有利于煤层的形成与保存[28]。尤其在初始湖泛面与最大湖泛面附近，可容纳空间的增长速率与泥炭堆积速率趋于动态平衡，为中厚煤层的形成创造了有利条件。因此，研究区中北部向斜带发育了稳定性好、厚度适中的煤层，为煤层气的生成与富集提供了良好的物质基础。

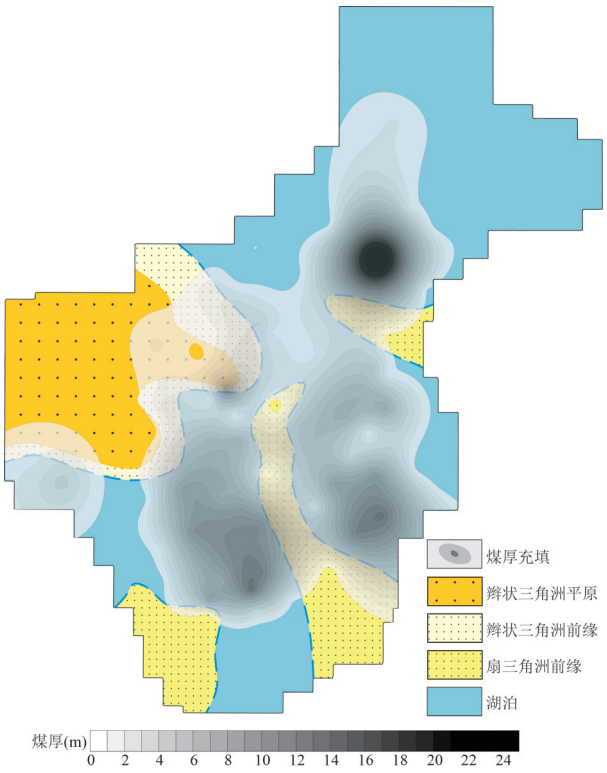


图7 五间房盆地3-3#煤层沉积相与煤厚关系

Fig. 7 Relationship between sedimentary facies and coal seam thickness of the 3-3# coal seam in the Wujianfang Basin

3.2 煤层厚度

厚煤层不仅提供了更丰富的生烃物质基础，还具备更强的生气潜力与更大的气体赋存空间，是煤层气成藏过程中最关键且最直接的控制因素之一。研究区内主力煤层发育良好（图8），具体特征如下：2-1#煤层厚度为0.22～27.41 m，平均厚度为4.50 m；2-2#煤层厚度为0.85～22.41 m，平均厚度为6.31 m；3-3#煤层厚度为0.83～29.32 m，平均厚度为6.10 m。上述三层煤层在研究区内分布广泛、厚度较大、结构简单，构成区域主要的可采煤层，为煤层气的富集与高效开发提供了优越的物质基础与储集条件。2-3#煤层厚度为1.06～25.25 m，平均厚度为7.71 m，虽具备可观的单层厚度，但其展布范围相对局限，连续性较差，资源规模受限。相比之下，4#煤层（厚度0.86～9.52 m，平均3.88 m）与5#煤层（厚度0.95～9.24 m，平均4.14 m）虽在全区分布较广，但普遍埋藏较深、单层厚度偏薄，储层条件相对较差，对煤层气的经济开发构成一定制约。

3.3 构造特征

五间房含煤盆地为一北东向展布的半地堑型向斜盆地（图2），其长轴形态及不对称结构明显受控于南东侧同沉积盆缘断裂与北西侧隆起带的差异活动。该构造格局导致沉降中心略向南偏移，两翼地层呈现“北陡南缓”的产状，向南超覆；轴部地层平缓，倾角一般不超过5°，翼部最大倾角可达12°[29]。这种相对稳定的构造背景为泥炭沼泽的长期发育提供了有利条件，使主力煤层的聚煤中心集中分布于构造活动较弱的盆地轴部。该区域基本未受边缘发育的四条正断层（DF1—DF4）扰动，煤层连续性好、结构完整。同时，平缓的轴部构造及未被断层切割的煤层为煤层气等非常规天然气的保存与富集创造了良好条件，充分体现了构造演化对烃源岩沉积、空间展布及后期成藏全过程的系统性控制作用。

3.4 储层物性特征

显微裂隙观测表明，研究区煤层中主要发育割理、剪性外生裂隙及张性外生裂隙等类型。为实现多尺度孔隙结构的系统表征：对孔径小于100 nm的孔隙采用低温液氮吸附法进行测试；对孔径大于100 nm的孔隙则采用压汞法进行分析，二者联合构建了覆盖微孔至大孔的全尺度孔隙结构模型[30-32]。测试结果（图8）显示，研究区煤储层

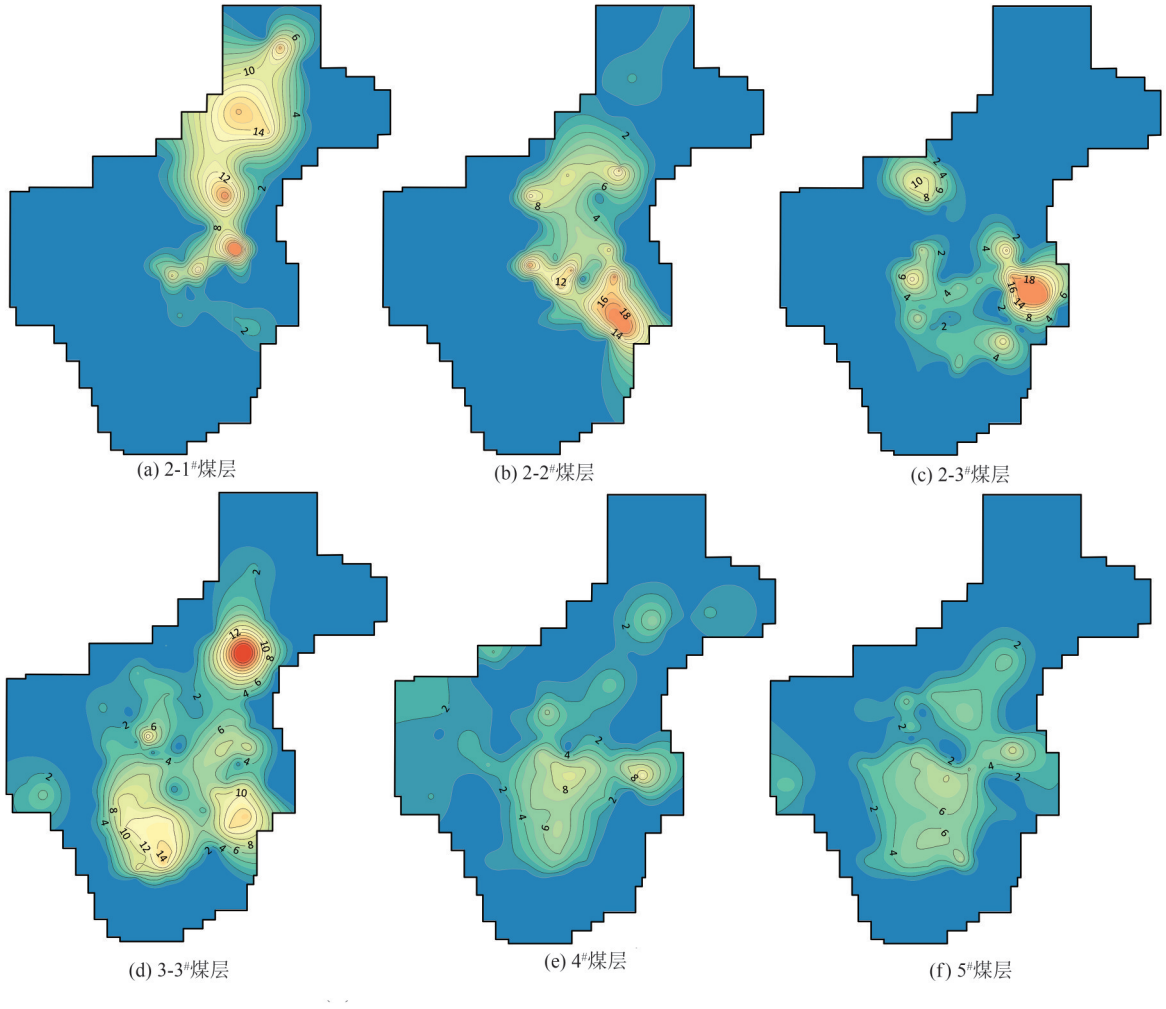


图 8　五间房盆地煤厚等值线图

Fig. 8　Coal thickness isoline of the Wujianfang Basin

a. 2−1#煤层；b. 2−2#煤层；c. 2−3#煤层；d. 3−3#煤层；e. 4#煤层；f. 5#煤层

孔隙以中孔和大孔为主，合计贡献度超过85%；小孔次之，占比约10%；微孔发育最弱。其中，2#煤层孔径分布范围相对较宽，可能具有更优的孔隙连通性；3#、4#及5#煤层的孔容亦以中孔和大孔为主，储集空间略占优势。总体而言，五套主力煤层均表现为“中孔主导、储集能力相近”的储层特征。测试结果表明，全区煤层平均渗透率为0.0596 mD，层间及层内非均质性较强，对煤层气排采制度的优化提出了更高要求。

3.5　顶底板组合因素

煤层顶底板的岩性与厚度对储层封闭性具有显著控制作用，进而深刻影响煤层气的保存与成藏效率。研究区煤层顶底板主要由泥岩和砂岩组成，共识别出四种典型的顶底板岩性组合类型：（1）顶泥－底泥；（2）顶砂－底泥；（3）顶泥－底砂；（4）顶砂－底砂。其中，“顶泥－底泥”组合最为发育，占全区统计样本的55%，且该组合更有利于厚煤层的形成与稳定保存。鉴于煤层厚度与含气量的乘积可作为煤层气资源丰度的粗略表征指标，本文基于主力煤层顶底板组合类型开展了系统性对比分析。结果表明（表3）：在各类组合中，“顶泥－底泥”型井数量最多，其对应的煤层厚度与含气量乘积的平均值亦最高，显示出最优的资源富集潜力；“顶砂－底泥”与“顶泥－底砂”组合

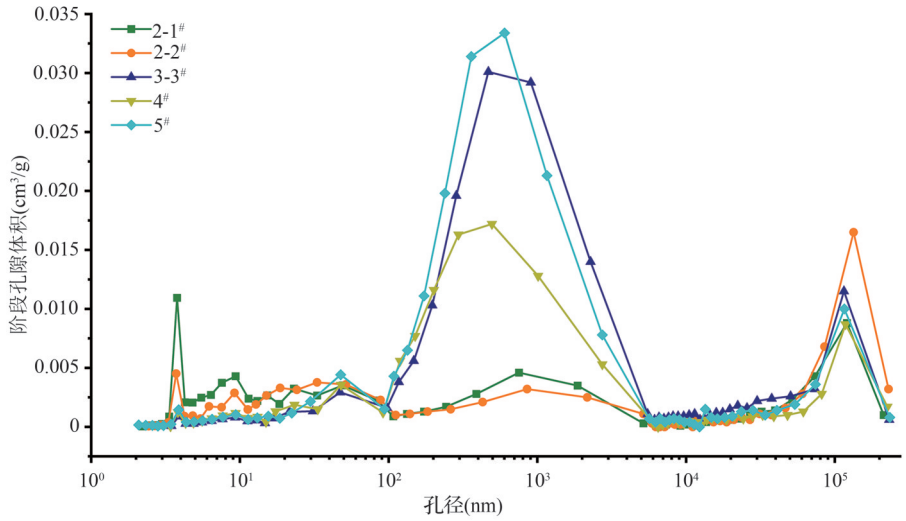


图9 五间房盆地煤样孔径分布图

Fig. 9 Pore size distribution of coal samples from the Wujianfang Basin

次之；而“顶砂－底砂”组合因顶底板均为渗透性较强的砂岩，封闭能力最弱，对煤层气保存最为不利。泥岩作为低渗透性盖层与底板，不仅能有效抑制煤层气向上逸散或侧向运移，还可为泥炭沼泽的稳定沉积提供有利环境。研究区内“顶泥-底泥”组合不仅分布最广，且与厚煤层发育具有良好的空间耦合关系，进一步印证了其在煤层气成藏过程中对源－储－封系统的协同控制作用。

表3 研究区主力煤层（2-1#至5#）顶底板组合统计及评价参数表

Table 3 Statistics and evaluation parameters of roof and floor combinations for main coal seams (2-1# to 5#) in the study area

顶板岩性	底板岩性	煤层平均厚度(m)	发育占比(%)	煤厚与含气量之积(t/m²)
泥岩	泥岩	5.84	55	5.61
泥岩	砂岩	4.96	18	4.36
砂岩	泥岩	5.50	18	4.38
砂岩	砂岩	5.38	9	4.03

3.6 水文地质条件

研究区水文地质条件对煤层气成藏具有显著控制作用[33]。盆地地下水系统由三层结构组成：上部为第四系松散岩类孔隙潜水，中部为全区广泛发育的新近系上新统泥岩隔水层，下部为白垩系碎屑岩类裂隙—孔隙承压水系统。其中，新近系泥岩隔水层分布稳定、渗透性极低，有效阻隔了浅层潜水与深层承压水之间的水力联系，使赋存于白垩系中的煤层处于相对封闭的水文地质环境中。白垩系承压水矿化度较低（0.80 ~ 1.70 g/L）、水动力条件微弱，地下水径流缓慢，整体呈现弱径流-半封闭特征，符合生物成因煤层气生成所需的低矿化度（< 15 g/L）、弱水动力、中低温及非硫酸盐环境等关键条件。此外，研究区煤层普遍埋藏于区域侵蚀基准面以下，加之隔水层封闭性良好、水头差小、水动力势弱，水质类型以HCO_3·Cl-Na型为主，pH值适中，进一步营造了有利于生物气生成、吸附与长期保存的水文地球化学背景。上述特征共同为水力封堵型煤层气藏的形成提供了优越的水文地质条件[34]。

3.7 低煤阶煤层气成藏模式

综合上述地质与水文特征，五间房盆地低煤阶煤层气呈现典型的“生物成因气主导、水力-岩性耦合封堵”成藏模式。碳氢同位素测试结果显示，$\delta^{13}C$（CH_4）普遍小于-60‰，δD（CH_4）小于-260‰，指示其属于典型的陆相生物成因气。成因机制以乙酸发酵为主，并伴有二氧化碳还原作用，这与低煤阶煤处于未成熟—低成熟阶段的演化特征相符。其次，优越的水文地质与岩性条件保障了生物气的生成与保存。盆地深部弱径流、低矿化度（< 1.70 g/L）的水文环境为产甲烷菌提供了适宜的生存空间，确保了乙酸发酵与二氧化碳还原作用的持续进行。在保存方面，盆地内广泛发育的“顶泥-底泥”型岩性组合构成了第一道物理屏障，有效抑制了气体的垂向逸散；同时，弱水动力条件下形成的静水压力封闭（水力封堵）构成了第二道侧向屏障。这种“双重封堵机制”克服了低煤阶煤层吸附能力弱、埋藏浅易散失的

先天劣势，使得生物成因煤层气得以在盆地中北部的向斜轴部富集保存。

4　有利区预测

煤储层综合评价的最终目标在于有效表征煤层气的可采性与资源潜力[38]。本文采用层次分析法（AHP）与模糊数学方法相结合的综合评价模型，对研究区低阶煤层气有利区进行系统性定量化划分[35]。构建科学合理的评价指标体系并合理分配各参数权重，是实现煤储层综合评价的核心环节。依据能源行业标准《煤层气地质选区评价方法》（NB/T 10013—2014），并结合低煤阶煤层气区块的地质特征与评价参数分级标准，本文基于研究区实测的含气量、煤层厚度、镜质体反射率、埋深等基础数据，构建了包含资源条件与保存条件两个一级指标的二级评价体系。其中，资源条件与保存条件的权重比设定为5∶2，体现了低阶煤层气以资源丰度为主导的评价导向[36-37]。采用标度法对各评价指标的相对重要性进行两两比较，构建判断矩阵；通过求解判断矩阵的最大特征值及其对应的特征向量，并对特征向量进行归一化处理，最终确定各评价参数的权重值。在此基础上，应用模糊数学方法对原始数据进行无量纲化处理，并结合权重计算各单元的综合评价系数。

根据评价系数大小，将煤储层划分为三类（图 10）：Ⅰ类储层（评价系数 ≥ 0.8）、Ⅱ类储层

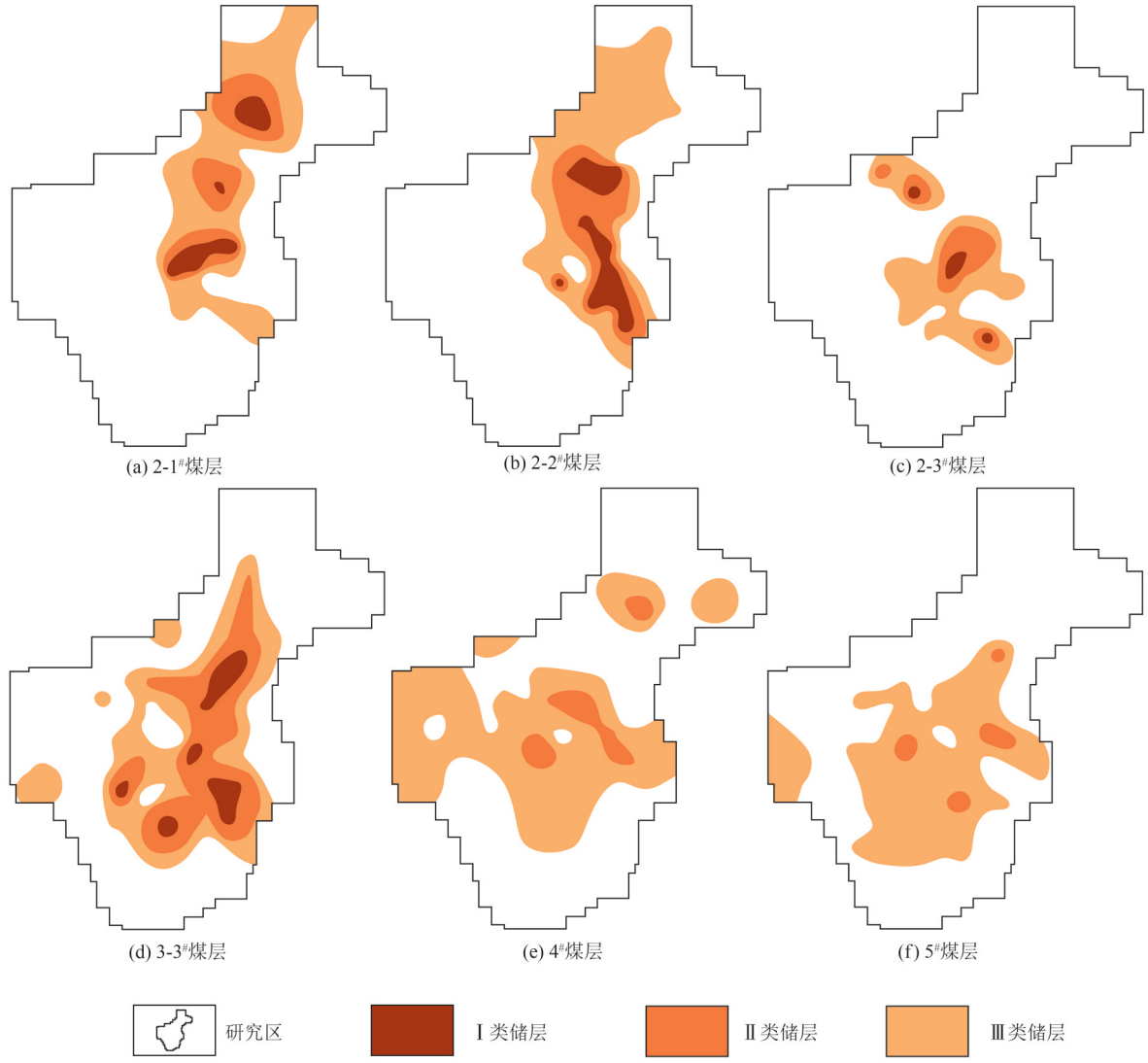


图 10　五间房盆地煤层气有利勘探区

Fig. 10　Favorable coalbed methane exploration area in the Wujianfang Basin

a. 2-1#煤层；b. 2-2#煤层；c. 2-3#煤层；d. 3-3#煤层；e. 4#煤层；f. 5#煤层

（0.6≤评价系数<0.8）和Ⅲ类储层（评价系数<0.6）。Ⅰ类储层代表煤层气最优富集区，资源与保存条件均优越，具备高开发潜力。2-1#、2-2#与3-3#煤层的Ⅰ类储层面积相近，主要集中于盆地聚煤中心附近，略偏中部，反映出良好的资源富集条件；2-3#煤层仅零星分布Ⅰ类储层，连续性差；而4#和5#煤层未见Ⅰ类储层发育。Ⅱ类储层表明具备一定资源基础，可作为后备开发目标。3-3#煤层的Ⅱ类储层分布面积最广、连续性最好，集中于盆地中央；2-1#与2-2#煤层的Ⅱ类储层面积相近，但均小于3-3#煤层，其中2-1#煤层呈团块状分布于盆地中部及北部，连续性相对较差；2-3#、4#及5#煤层的Ⅱ类储层则面积狭小、展布零散。Ⅲ类储层反映煤层气资源潜力较低，开发经济性较差。尽管4#与5#煤层在全区分布较广，但由于煤层普遍较薄、结构复杂（常见分叉与尖灭），且含气量整体偏低，导致其综合评价系数较低，表现为大面积的Ⅲ类储层，开发前景有限。

为验证上述有利区预测结果的可靠性，本研究选取了研究区内已实施的WM-C2、WZKQ2等典型煤层气参数井进行分析。结果显示，位于3-3#煤层Ⅰ类有利区内的典型探井（如WM-C2），其实测含气量高达2.26 m^3/t，显示出良好的含气性；而位于非有利区（Ⅲ类区）的探井（如WZKQ2），实测含气量仅为0.15 m^3/t。实测点数据与预测有利区的高度吻合，证实了本研究构建的评价体系在五间房盆地具有较高的可靠性与适用性。此外，相较于传统的“多图层简单叠合”或“单因素门限截断”评价方法，本研究构建的“机器学习+AHP-模糊数学”耦合评价体系具有显著优势：（1）数据精度更高：传统方法多基于稀疏井点的插值，而本研究采用XGBoost算法反演生成的含气量数据体（R^2=0.972），能够捕捉井间非均质性变化；（2）权重客观化：引入AHP层次分析法厘定权重，避免了人为经验赋值的主观性；（3）边界识别更科学：模糊数学方法有效解决了地质参数在不同级别间过渡的“模糊性”问题，使得有利区边界的划分更加符合地质规律。

5 结 论

（1）五间房盆地主要含煤地层为下白垩统大磨拐河组，共发育2-1#、2-2#、2-3#、3-3#、4#和5#六层可采煤层。煤类以褐煤和长焰煤为主，属典型低煤阶煤。显微组分以镜质组（46.19%～71.29%）和惰质组（28.71%～53.81%）为主，未见壳质组；工业分析显示煤层具有高挥发分（42.44%～44.12%）、中灰分（18.77%～30.01%）和低水分（8.96%～10.85%）的特征。

（2）煤层含气量与埋深、自然伽马测井值、电阻率、煤层厚度及顶板泥岩厚度呈显著相关性。基于XGBoost模型的全区含气量反演结果表明，高含气区随聚煤中心由盆地中部向东北部迁移。其中，3-3#煤层含气性最优（平均1.71 m^3/t），展布广泛且发育多个高含气中心；2-1#与2-2#煤层平均含气量相近，但高值区分布局限；4#与5#煤层平均含气量及高值区规模均较小，资源潜力相对较低。

（3）沉积体系以辫状河三角洲、扇三角洲及湖泊相为主，其中湖泊相沉积环境稳定，有利于厚煤层形成。2-1#、2-2#和3-3#煤层分布广、厚度大，为煤层气成藏提供了充足的物质基础。储层孔隙以中孔和大孔为主（合计贡献度>85%）；顶底板组合中，“顶泥-底泥”型占比达55%，封闭性能最优，最有利于煤层气保存。新近系泥岩隔水层有效阻隔浅层与深层水力联系，白垩系承压水呈弱径流-半封闭状态，矿化度低（0.80～1.70 g/L），符合生物成因煤层气生成与保存所需的水文地质条件。

（4）基于层次分析法（AHP）与模糊数学构建的多参数综合评价体系，将煤储层划分为Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ三类。3-3#煤层Ⅰ类储层集中分布于盆地聚煤中心，Ⅱ类储层面积最大、连续性最好，综合条件最优，为全区首选勘探开发目标；2-1#与2-2#煤层Ⅰ类储层面积与3-3#煤层相当，但Ⅱ类储层分布范围较小，且2-1#煤层连续性较差；2-3#煤层仅零星发育Ⅰ类储层，而4#与5#煤层未见Ⅰ类储层，以Ⅲ类储层为主，开发潜力有限。

参考文献：

[1] 张道勇，朱杰，赵先良，等. 全国煤层气资源动态评价与可利用性分析[J]. 煤炭学报，2018，43(6)：1598-1604.

[2] 袁远，邵长东，唐跃，等. 低煤阶煤层气有利区多参数评价研究——以准南西山窑组煤层气为例[J]. 中国煤炭，2025，51(1)：73-81.

[3] 林海涛，李玲，唐淑玲，等. 二连盆地富气凹陷低阶煤煤层气成因及成藏机制[J]. 煤田地质与勘探，2024，52(2)：60-69.

[4] 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.

[5] 付黎明，庄新国，李建伏，等. 内蒙古早白垩世五间房含煤盆地煤层煤相分析[J]. 煤田地质与勘探，2011，39(3)：1-6，13.

[6] 赵九峰. 内蒙古西乌珠穆沁旗五间房煤田测井的解释与应用[J]. 西部资源，2015(2)：161-162.

[7] 赵永生，曹建英. 二连盆地区域地球物理场资料在铀矿找矿中的应用[J]. 西部资源，2014(3)：147-149.

[8] 梁官考，李洋，周荣. 三维地震在五间房煤田东一井田中的应用[J]. 内蒙古煤炭经济，2013(5)：69-71.

[9] 万欣. 内蒙古五间房东区含煤盆地构造特征[J]. 江西煤炭科技，2010(3)：62-64.

[10] 李建安，邵龙义，孙斌，等. 海拉尔盆地牙克石煤田五九矿区大磨拐河组层序-古地理及聚煤作用[J]. 煤炭学报，2019，44(S2)：610-619.

[11] 徐凯. 海拉尔盆地莫拐地区大磨拐河组聚煤规律[D]. 徐州：中国矿业大学，2021.

[12] 康磊. 贝尔凹陷大磨拐河组沉积相作用及其对油气的控制作用研究[D]. 大庆：东北石油大学，2017.

[13] 余杰，秦瑞宝，黄涛，等. 基于核磁共振技术的煤层含气量评价方法[J]. 煤炭科学技术，2023，51(11)：158-165.

[14] 刘洋，张宫，覃莹瑶，等. 磁场强度及磁场梯度对岩心核磁共振T2谱测量结果的影响[J]. 石油实验地质，2023，45(2)：378-384.

[15] YANG C，QIU F，XIAO F，et al. CBM gas content prediction model based on the ensemble tree algorithm with Bayesian Hyper-Parameter Optimization Method：A case study of Zhengzhuang Block，Southern Qinshui Basin，North China[J]. Processes，2023，11(2)：527.

[16] 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.

[17] 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，2024，39(6)：1611-1621.

[18] 聂云丽，高国忠. 基于随机森林的页岩气“甜点”分类方法[J]. 油气藏评价与开发，2023，13(3)：358-367.

[19] WANG Z H，CAI Y D，LIU D M，et al. Intelligent classification of coal structure using multinomial logistic regression，random forest and fully connected neural network with multisource geophysical logging data[J]. International Journal of Coal Geology，2023，268：104208.

[20] 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(5)：1427-1436.

[21] 李安，蔡益栋，王子豪，等. 基于机器学习测井反演的煤体结构评价：以鄂尔多斯盆地榆林地区本溪组8号煤为例[J]. 地质科技通报，2025，44(4)：2-15.

[22] MADAAN A，PANDEY J. Development of machine learning based model for low-temperature PEM fuel cells[J]. Computers & Chemical Engineering，2024，188：108754.

[23] 肖晓，闫建平，郭伟，等. 基于LightGBM算法的页岩气储层甜点参数预测方法[J]. 中国煤炭地质，2023，35(10)：28-37.

[24] YAO J T，SHUI H F，LI Z K，et al. Machine learning prediction of pyrolytic sulfur migration based on coal compositions[J]. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis，2024，177：106316.

[25] 敖旋峰，刘迪仁，徐观佑，等. 煤微相的控气作用分析与测井评价[J]. 油气地质与采收率，2018，25(3)：55-60.

[26] LI L，TANG D Z，XU H，et al. Coalbed methane geology and exploration potential in large，thick，low-rank seams in the Bayanhua Sag of the Erlian Basin，northern China[J]. Energy Exploration & Exploitation，2022，40(3)：995-1022.

[27] 李叶朋. 二连盆地霍林河煤田低阶煤孔隙结构模式及气液流动规律[D]. 北京：中国矿业大学，2018.

[28] 李彬，邱峰，张晓洲，等. 二连盆地巴彦宝力格煤田伊敏组低煤阶煤层气成藏条件及有利区预测[J]. 大庆石油地质与开发，2023，42(4)：20-29.

[29] 梁义军，周常顺，林彬. 五间房煤田普查现状及分析研究[J]. 内蒙古科技与经济，2009(7)：21-24，26.

[30] LI H，CAI Y D，LIU D M，et al. Full-scale pore structure and its impact on methane adsorption in deep coal reservoirs of the Zijinshan area，Eastern Ordos Basin[J]. Physics of Fluids，2025，37(8)：086618.

[31] LI M Y，CAI Y D，LIU D M，et al. Pore structure variation of the coalbed methane reservoir caused by igneous intrusion in the Zijinshan Block of the Eastern Ordos Basin，North China[J]. ACS Omega，2025，10(41)：48723-48739.

[32] HU Y C，HE S，QIU F，et al. Full-scale pore structure and gas adsorption characteristics of the medium-rank coals from Qinshui Basin，North China[J]. Processes，2025，13(6)：1862.

[33] 王少锋，蔺亚兵. 永陇矿区麟北区水文地质特征及其对煤层气的控制作用[J]. 中国煤层气，2017，14(6)：24-27.

[34] LI L，TANG D Z，XU H，et al. Genesis and accumulation mechanism of low-rank CBM：A case study in the Jiergalangtu Block of Erlian Basin，Northern China[J]. ACS Omega，2024，9(1)：1827-1837.

[35] 王克营，杜江. 基于多层次模糊分析法的湖南省煤系气有利区优选[J]. 中国煤炭地质，2020，32(11)：10-13.

[36] 赵文峰. 川南大村区块煤层气赋存规律及有利区预测研究[D]. 成都：成都理工大学，2017.

[37] ZHOU K Y，SUN F R，YANG C，et al. Evaluation of deep coalbed methane potential and prediction of favorable areas within the Yulin Area，Ordos Basin，based on a multi-level fuzzy comprehensive evaluation method[J]. Processes，2024，12(4)：820.

[38] 张兵，杜丰丰，张海锋，等. 基于经济效益评价的煤层气开发有利区优选——以鄂尔多斯盆地东缘杨家坡区块为例[J]. 油气藏评价与开发，2024，14(6)：933-941.