引用格式：霍少伟，冯兴强，吴见，等，2025. 鄂东缘临兴地区深层煤层顶底板与含气性耦合关系研究[J]. 地质力学学报，31（2）：235−247. DOI：10.12090/j.issn.1006-6616.2024124

Citation: HUO S W，FENG X Q，WU J，et al.，2025. Study on the coupling between the hanging- and foot-wall beds and the gas content of deep coal seams in the Linxing area, eastern margin of the Ordos Basin[J]. Journal of Geomechanics，31（2）：235−247. DOI：10.12090/j.issn.1006-6616.2024124

鄂东缘临兴地区深层煤层顶底板与含气性耦合关系研究

霍少伟[1,2]，冯兴强[2]，吴　见[3,4]，张守仁[3,4]，周　磊[2]，钱竹良[5]，晁巍巍[3]

HUO Shaowei[1,2]，FENG Xingqiang[2]，WU Jian[3,4]，ZHANG Shouren[3,4]，ZHOU Lei[2]，QIAN Zhuliang[5]，CHAO Weiwei[3]

1. 长江大学资源与环境学院，湖北 武汉 430100；
2. 中国地质科学院地质力学研究所，北京 100081；
3. 中联煤层气有限责任公司，北京 100011；
4. 三气共采省技术创新中心，山西 太原 030000；
5. 中国石油化工股份有限公司江苏油田分公司物探研究院，江苏 南京 210046

1. *College of Resource and Environment*, *Yangtze University*, *Wuhan* 430100, *Hubei*, *China*;
2. *Institute of Geomechanics*, *Chinese Academy of Geological Sciences*, *Beijing* 100081, *China*;
3. *China United Coalbed Methane Corporation Ltd*, *Beijing* 100011, *China*;
4. *Provincial Center of Technology Innovation for Coal Measure Gas Co-production*, *Taiyuan* 030000, *Shanxi*, *China*;
5. *Geophysical Prospecting Research Institute of Jiangsu Oilfield Company*, *Sinopec*, *Nanjing* 210046, *Jiangsu*, *China*

Study on the coupling between the hanging- and foot-wall beds and the gas content of deep coal seams in the Linxing area, eastern margin of the Ordos Basin

Abstract: ［**Objective**］The deep coalbed methane in the Linxing area at the eastern margin of the Ordos Basin has great potential for exploration and development and has become a key exploration and development target. Research shows that the hanging- and foot-wall beds of the coal seams play an important role in the enrichment and preservation of coalbed methane. At present, there is lack of systematic research on the influence of the hanging- and foot-wall beds of deep coal seams on the gas content, and the coupling between them is not clear. This study aims to extend the theory of methane enrichment in deep coal beds.［**Method**］Through the comprehensive application of logging, drilling, and mud logging data and the use of the Analytic Hierarchy Process (AHP), the coupling between the characteristics of the hanging- and foot-wall beds of the No. 8+9 coal seam and its gas-bearing property were studied.［**Results**］The research results are as follows: (1) In the Linxing area, the Benxi Formation–Taiyuan Formation developed in a barrier-tidal flat-lagoon sedimentary system. The No. 8+9 coal seam mainly developed in the supratidal zone, peat flat, and peat swamp, and the sedimentary environments of the hanging- and foot-wall beds are sedimentary microfacies such as mud flat, lagoon, ash flat, and sand flat. (2) Influenced by the sedimentary environments, the hanging- and foot-wall beds are mainly composed of three lithologies, namely limestone, mudstone, and sandstone. The thicknesses of the hanging- and foot-wall beds of the coal seam vary greatly along the lateral extent. The thickness of the hanging-wall bed ranges from 1.90 to 19.00 m, and the thickness of the foot-wall bed ranges from 1.99 to 21.19 m. There are seven different lithological combinations of the hanging- and foot-wall beds, including top-limestone bottom-mud, top-mud bottom-limestone, top-mud bottom-mud, top-

基金项目：中国地质调查局地质调查项目（DD20242777）；国家自然科学基金项目（42172176）

This research is financially supported by the Geological Survey Projects of the Chinese Geological Survey (Grant No. DD20242777) and National Natural Science Foundation of China (Grant No. 42172176).

第一作者：霍少伟（2000—），男，在读硕士，研究方向为油气地质。Email：2825430669@qq.com

通信作者：冯兴强（1975—），男，教授级高级工程师，从事石油地质及油气地质力学研究。Email：286484521@qq.com

收稿日期：2024−11−07；**修回日期**：2025−02−13；**录用日期**：2025−02−14；**网络出版日期**：2025−02−17；**责任编辑**：范二平

mud bottom-sand, top-sand bottom-limestone, top-sand bottom-mud, and top-sand bottom-sand. (3) Further research on the relationship between the characteristics of the hanging- and foot-wall and the gas content of the coal seam shows that the coal seams in top-limestone bottom-mud, top-mud bottom-limestone, and top-mud bottom-mud associations exhibit the highest gas contents; the coal seams in top-mud bottom-sand and top-sand bottom-limestone associations exhibit relatively high gas contents; the coal seams in top-sand bottom-mud and top-sand bottom-sand associations exhibit low gas contents. Within the same lithology, the greater the thickness of the hanging- and foot-wall beds, the higher the gas content of the coal seam, and there is a positive correlation between the thicknesses of the hanging- and foot-wall beds and the gas content. [**Conclusion**] According to the research results, three types of coupling models between the hanging- and foot-wall of deep coal seams and their gas-bearing properties are distinguished: Type I (good coupling) with a gas content of more than 15 m^3/t, Type II (relatively good coupling) with a gas content of 12 to 15 m^3/t, and Type III (poor coupling) with a gas content of less than 12 m^3/t. [**Significance**] The research results have clarified the controlling effect of the hanging- and foot-wall beds of deep coal seams on the gas content, which has important significance for guiding the evaluation, optimization, and mining of areas favorable for deep coalbed methane, and further extends the theory of deep coalbed methane enrichment.

Keywords: deep coalbed methane; hanging- and foot-wall beds; gas content; coupling relationship; analytical hierarchy process; eastern margin of Ordos Basin

摘　要：鄂尔多斯盆地东缘临兴地区的深层煤层气有巨大的勘探开发潜力，已经成为重点勘探开发区。研究表明煤层顶底板对煤层气的富集保存有重要作用，但目前尚未开展深层煤层顶底板对含气性影响的系统研究，二者的耦合关系不清楚。为丰富深层煤层气富集理论，综合应用测井、钻井和录井等资料，针对临兴地区8+9号煤层顶底板特征与含气性的耦合关系展开了研究。研究结果发现，临兴地区本溪组—太原组发育障壁−潮坪−潟湖沉积体系，8+9号煤层主要发育于潮上带、泥炭坪和泥炭沼泽，顶底板沉积环境为泥坪、潟湖、灰坪和砂坪沉积微相。受沉积环境的影响顶底板主要由灰岩、泥岩和砂岩3种岩性构成；煤层顶板和底板厚度平面分布变化较大，顶板厚度介于1.90～19.00 m，底板厚度介于1.99～21.19 m；具有顶灰底泥型、顶泥底灰型、顶泥底泥型、顶泥底砂型、顶砂底灰型、顶砂底泥型、顶砂底砂型7种不同的顶底板岩性组合。进一步研究顶底板特征与煤层含气量的关系发现，顶灰底泥型、顶泥底灰型和顶泥底泥型煤层呈现出高含气量的特征；顶泥底砂型和顶砂底灰型煤层呈现较高含气量的特征；顶砂底泥型和顶砂底砂型煤层呈现低含气量的特征；同一岩性下，顶底板厚度越大，煤层含气量越高，顶底板厚度与含气量呈正相关。利用层次分析法可划分为3类深层煤层顶底板与含气性的耦合模式：Ⅰ类（耦合关系好）含气量大于15 m^3/t、Ⅱ类（耦合关系较好）含气量范围为12～15 m^3/t、Ⅲ类（耦合关系差）含气量小于12 m^3/t。该研究成果明确了深层煤层顶底板对含气量的控制作用，对深层煤层气的有利区评价、优选和开采具有重要的指导意义，并进一步丰富了深层煤层气富集理论。

关键词：深层煤层气；顶底板；含气性；耦合关系；层次分析法；鄂尔多斯盆地东缘

中图分类号：P618.13　　**文献标识码：**A　　**文章编号：**1006−6616(2025)02−0235−13

DOI：10.12090/j.issn.1006-6616.2024124

0　引言

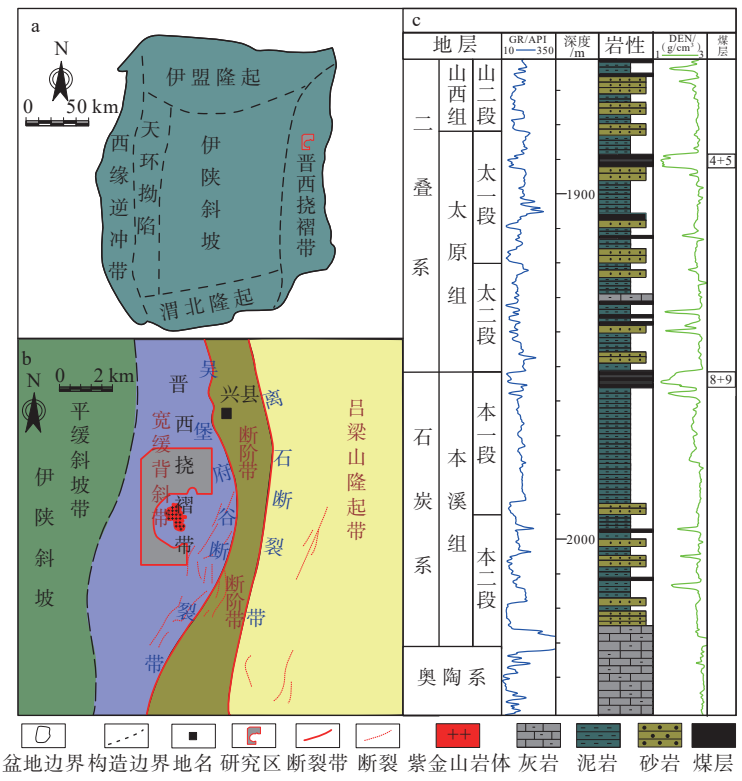
近些年来，随着中国能源需求的增长和能源结构的转型，非常规天然气资源勘探开发越来越受到关注。煤层气作为一种重要的非常规天然气，经历了由煤层向煤系、从高阶煤到低阶煤、由浅部向深部煤层气的发展历程。根据《煤层气资源评价规范》(DZ/T0378—2021)，埋深大于1500 m的煤层气被定义为深层煤层气。研究表明，中国埋深在1500～3000 m的煤层气地质资源量超30×10^{12} m^3，深层煤层气资源潜力巨大(郭绪杰等，2021；徐凤银等，2022，2023)。2021年位于鄂尔多斯盆地东缘(鄂东缘)的大宁−吉县区块深层煤层气探明地质储量为1121.62×10^8 m^3，2023年神府深层煤层气探明储量超1100×10^8 m^3，表明鄂东缘深层煤层气具有良好的勘探前景(黄中伟等，2022；秦勇等，2022；郭广山等，2024；朱光辉等，2024)。然而，鄂东缘深层煤层气勘探开发也面临着一些理论与技术挑战，处于不断探索和突破阶段。

相关学者针对深层煤层气的富集影响因素开展了不同方面的研究，并且认为深层煤层顶底板对含气性具有重要影响。高波等（2003）认为深层煤层气的富集保存受到构造活动、顶底板封盖能力和水文地质条件的三重影响；李曙光等（2022）在开展深层煤层气成藏特征研究发现，顶底板封盖能力是深层煤层气富集和保存的重要条件；张莉莉等（2012）主张将煤层及顶底板层作为一个不可分割开来的整体来进行研究；徐凤银等（2022）提出深层煤层顶底板封盖能力整体好，有利于深层煤层气富集成藏；李中博和刘子强（2021）提出顶底板岩性是影响深层煤层气封盖的重要条件，是封堵煤层气的第一道屏障，粒度越细，封闭性越好；王成旺等（2024）指出煤层直接顶底板岩性物性条件差、厚度较厚、无断裂隙影响时，能有效保存煤层气，且顶底板岩性组合也是影响煤层气保存重要因素。

上述研究只是定性地从煤层顶底板岩性来分析其保存条件，目前对于深层煤层顶底板如何影响含气性并未开展系统研究，二者的耦合关系尚不清楚。为此，文章选取鄂东缘临兴地区为研究对象，对 8+9 号煤层和煤层直接顶底板进行研究，综合运用测井、钻井、录井等相关资料，系统分析不同顶底板条件下煤层的厚度、有机质成熟度以及物性特征之间的差异，明确深层煤层顶底板岩性组合和厚度对含气量的影响；基于此研究结果，以顶底板对含气量的影响为目标，利用层析分析法将其分解成准则层和指标层，建立指标层和目标层之间关系，并对指标层量化赋值，再结合临兴地区煤层的含气量特征，进一步建立顶底板与含气性的耦合关系，从而服务于该地区深层煤层气的勘探与开发。

1　区域地质概况

根据基底性质、构造发展演化史及构造特征，鄂尔多斯盆地划分为西缘逆冲带、天环坳陷、伊陕斜坡、渭北挠褶带、晋西挠褶带和伊盟隆起 6 个一级构造单元（图 1a）。临兴地区位于鄂东缘晋西挠褶带北部地区，中东部为紫金山，东北部为兴县；地



a—鄂尔多斯盆地构造简图（临兴地区位于鄂东缘晋西挠褶带北部）；b—研究区构造位置图；c—地层柱状图

图 1　研究区构造位置图及地层柱状图

Fig. 1　Structural map and stratigraphic column of the study area

(a) Schematic diagram of the tectonics in the Ordos Basin (The Linxing area is located in the northern part of the Jinxi flexural folding belt at the eastern margin of the Ordos Basin); (b) Tectonic map of the study area; (c) Stratigraphic column

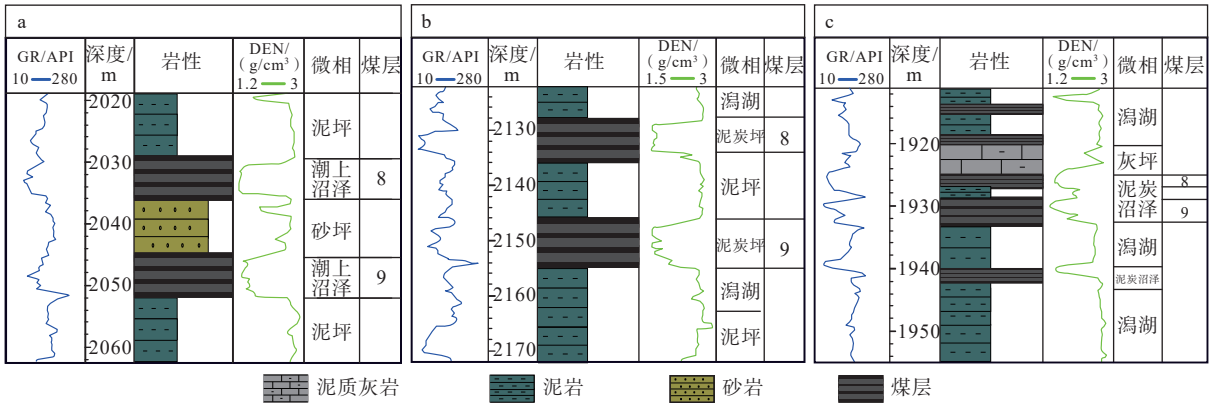
势上呈东高西低、北高南低；构造样式具有明显的分区分带性，可划分为吕梁山隆起带、断阶带、宽缓背斜带、平缓斜坡带（陶传奇，2019；杜佳等，2022；赵喆等，2024）。研究区位于宽缓背斜带上，整体呈现为向西倾斜的平缓单斜构造，主要发育宽缓的褶皱和少量小型断层，构造相对稳定（图 1b；徐长贵等，2024；范立勇等，2025；郭晓娇等，2025）。研究区石炭系本溪组、二叠系太原组和山西组都有煤层发育，其中本一段与太二段之间的 8+9 号煤，埋深在 1800 ～2000 m，是鄂东缘深部煤层气的主力开发煤层（图 1c）。

2 深层煤层及其顶底板特征

2.1 煤层与顶底板沉积特征

沉积体系、沉积相对岩性分布及特征等均有明显控制作用，并控制着地层厚度的发育情况（李俊良等，2011；张良，2019；杨晓利等，2025）。相关学者对鄂东缘煤系地层的沉积体系进行了研究，认为本溪组发育潮坪−潟湖沉积体系，太原组发育障壁海岸沉积体系（鲁静等，2012；王玫珠等，2017；刘新昕，2019；陶传奇，2019）。

在已有研究基础上，文章综合利用临兴地区钻井、录井、测井等资料，开展岩性组合和电性特征研究，认为临兴地区本溪组—太原组发育障壁−潮坪−潟湖沉积体系，进而划分出泥坪、潟湖、砂坪、泥炭沼泽和灰坪沉积微相。整体上看，8+9 号煤层主要沉积于潮上带、泥炭坪以及潟湖形成的泥炭沼泽。潮上带环境由于覆水较浅且潮汐水流较弱而形成煤层，其沉积的煤层厚且分叉夹泥，自然伽马（GR）曲线形态表现为齿状钟型，密度曲线形态呈箱型+钟型（图 2a）；泥炭坪环境为周期性潮汐双向水流，成煤植物潮汐适盐性植物群落具有消浪阻流作用，水动力条件微弱而形成煤层，其沉积的煤层厚且夹泥，GR 曲线形态呈箱型或齿状钟型，密度曲线形态呈箱型+钟型或指状（图 2b）；潟湖环境受到障壁岛的保护而形成泥炭沼泽、聚集成煤，煤层相对较薄且泥夹煤，GR 曲线形态表现为钟型或指状，密度曲线形态呈指状或钟型（图 2c）。



a—潮上带煤相；b—泥炭坪煤相；c—潟湖煤相

图 2 煤层及其顶底板岩电特征图

Fig. 2 Electrical characteristics of the hanging- and foot-wall rocks of coal seams

(a) Coal facies of the supratidal zone; (b) Coal facies of the peat flat; (c) Coal facies of the lagoon

研究区 8+9 号煤层顶底板主要沉积环境为泥坪、潟湖、灰坪和砂坪微相。泥坪岩性以灰色泥岩和深灰色炭质泥岩为主，测井响应呈现高 GR、低密度特征。潟湖环境紧邻滨岸潮坪，除发育少量煤层外，沉积物类型较为丰富，包括泥质灰岩、灰黑色泥岩；通常 GR 和密度值介于泥岩和砂岩之间，反映出潟湖环境岩性多样性的特点。灰坪的沉积物以泥质灰岩为主，测井响应表现为 GR 值略低于泥岩、密度值高于泥岩的特征。砂坪岩性以细砂岩为主，测井响应表现为低 GR、高密度特征（图 2）。

2.2 顶底板岩性组合

临兴地区多种沉积体系的发育为煤层的发育提供了基础，多种沉积相的发育形成了差异化的顶底板岩性及其组合样式（杨秀春等，2022）。为深入

研究煤层顶底板特征，8 号煤层和 9 号煤层不分叉时，统计煤层直接顶底板的岩性和厚度；8 号煤层和 9 号煤层出现分叉时，统计 8 号煤层直接顶板和 9 号煤层直接底板的岩性和厚度，来开展深层煤层顶底板岩性组合和厚度特征研究。

根据研究区 151 口录井资料，显示 8+9 号煤层顶板以泥岩为主，部分地区发育灰岩、砂岩；底板以泥岩为主，局部地区发育少量砂岩、灰岩。基于研究区顶底板岩性组合关系，划分出 7 种不同的顶底板岩性组合样式（图 3）。顶灰底泥型、顶泥底灰型、顶砂底灰型主要发育于潟湖环境的灰坪、潟湖以及砂坪微相中（图 3a—3c）；顶泥底泥型主要发育于泥炭坪环境和潮上带环境的泥坪微相中，少量发育于潟湖微相（图 3e）；顶泥底砂型、顶砂底泥型主要发育潮上带环境的泥坪和砂坪微相中，部分顶砂底泥型发育于潟湖微相（图 3d、3f）；顶砂底砂型潮上带环境主要发育环境为砂坪微相（图 3g）。

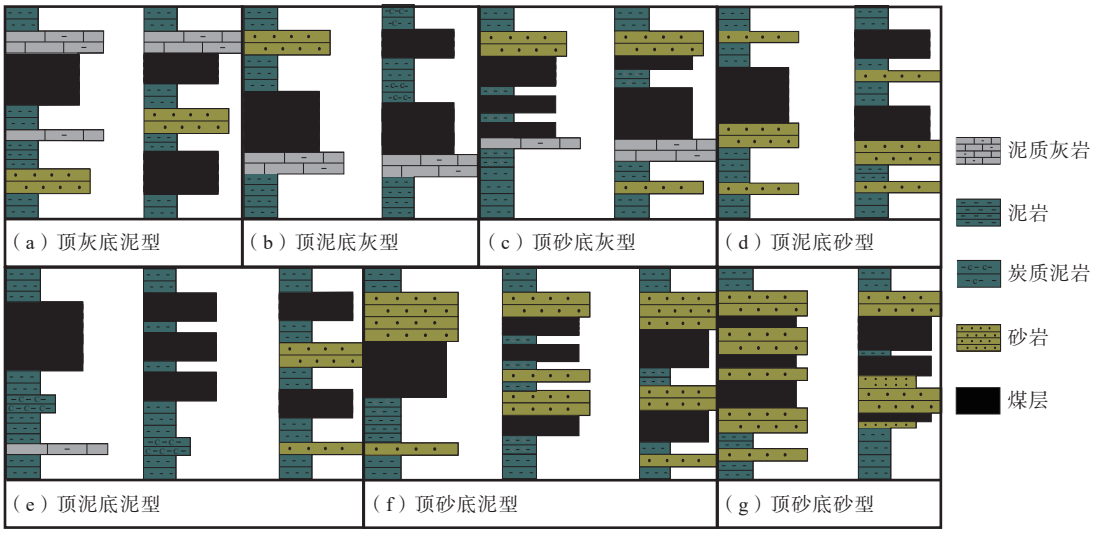


图 3　临兴地区深层煤层顶底板组合样式示意

Fig. 3　Schematic diagram of the combination styles of the hanging- and foot-wall lithologies of the deep coal seams in the Linxing area

(a) Top ash and bottom mud; (b) Top mud and bottom ash; (c) Top sand and bottom ash; (d) Top mud and bottom sand; (e) Top mud and bottom mud; (f) Top sand and bottom mud; (g) Top sand and bottom sand

2.3　顶底板厚度分布特征

依据临兴地区测井、录井等资料统计 8+9 号煤层直接顶底板厚度，并绘制了深层煤层顶底板厚度等值线图。结果表明，研究区深层煤层顶板厚度呈现两侧厚、中间薄的特征（图 4a），厚度范围在 1.90～19.00 m，平均厚度为 6.39 m。其中，泥岩分布范围较为广泛，平均厚度为 6.33 m；灰岩主要分布于研究区南部，平均厚度为 3.63 m；而砂岩大部分布在东北部，平均厚度为 7.21 m。

深层煤层底板厚度呈现西北部厚、中间薄的分布特征（图 4b），厚度范围在 1.99 ～21.19 m，平均厚度为 8.33 m；泥岩占据研究区的 90%，平均厚度为 8.72 m；灰岩少量分布于研究区北部和南部，平均厚度为 3.00 m；砂岩在南部和东北部呈点状区域分布，平均厚度为 5.30 m。

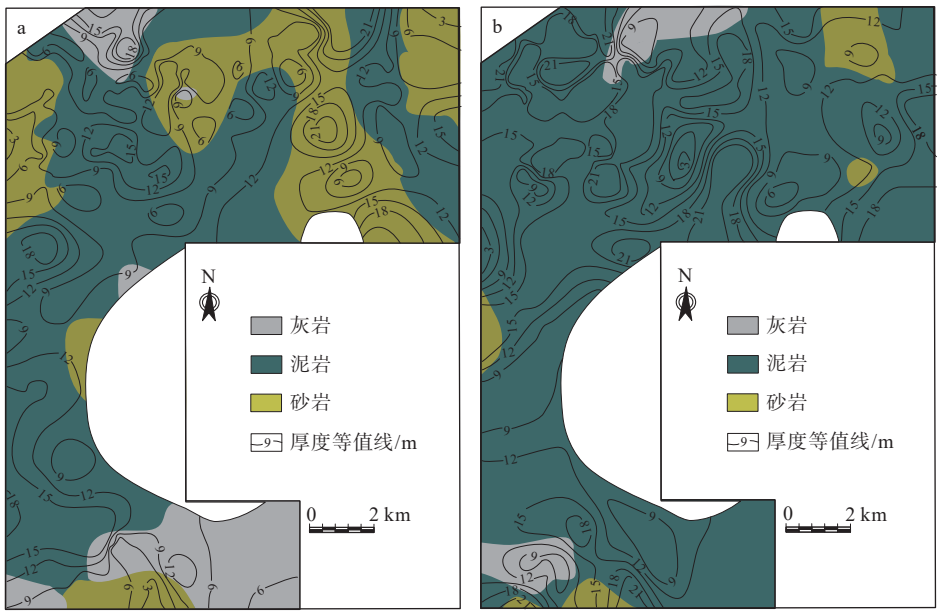
3　煤储层特征

3.1　煤层厚度特征

研究区煤层沉积环境主要以潮上带和泥炭坪环境为主，部分煤层发育在潟湖环境。针对研究区内 151 口井的深层煤层厚度进行统计分析发现（图 5），顶灰底泥型煤层平均厚度为 9.29 m，顶泥底灰型煤层平均厚度为 11.16 m，顶泥底泥型煤层平均厚度为 9.80 m，顶泥底砂型煤层平均厚度为 9.81 m，顶砂底灰型煤层平均厚度为 8.41 m，顶砂底泥型煤层平均厚度为 7.76 m，顶砂底砂型煤层平均厚度为 8.67 m。研究区不同顶底板岩性组合的煤层厚度变化较小，介于 7.70～11.20 m，整体煤层厚度特征差异不明显。

3.2　煤层成熟度特征

为厘定不同顶底板岩性组合的深层煤层的成



a—顶板；b—底板

图 4 临兴地区深层煤层顶底板厚度等值线图

Fig. 4 Contour map of the thickness of the hanging- and foot-wall of the deep coal seams in the Linxing area

(a) Roof; (b) Floor

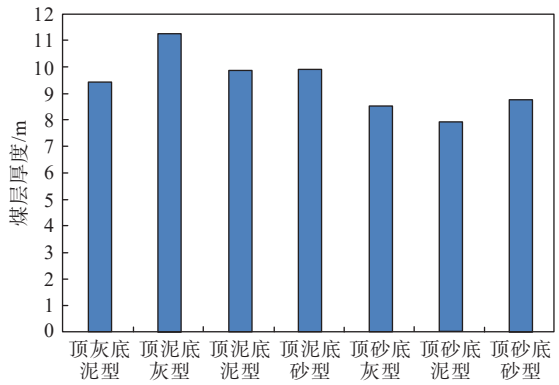


图 5 不同顶底板岩性组合的煤层厚度统计直方图

Fig. 5 Histogram of the thickness of coal seams for different combinations of hanging- and foot-wall lithologies

熟度特征，收集 151 口井的煤层镜质体反射率（R_O）开展分析。结果显示，顶灰底泥型煤层的 R_O 为 1.37%，顶泥底灰型煤层的 R_O 为 1.41%，顶泥底泥型煤层的 R_O 为 1.30%，顶泥底砂型煤层的 R_O 为 1.30%，顶砂底灰型煤层的 R_O 为 1.40%，顶砂底泥型煤层的 R_O 为 1.25%，顶砂底砂型煤层的 R_O 为 1.20%。

依据煤层的 R_O 变化，煤化过程可划分为：未成熟阶段，R_O 小于 0.5%；成熟阶段，R_O 介于 0.50%～1.60%，且 R_O 介于 1.20%～1.60% 时，煤已达到成熟阶段末期，生气率达到高峰；过成熟阶段，R_O 超过 1.60%（贾慧敏等，2025；孙立春等，2025）。研究区不同顶底板煤层的 R_O 范围在 1.20%～1.41% 之间，均处于成熟阶段末期，成熟度差异不明显（图 6）。

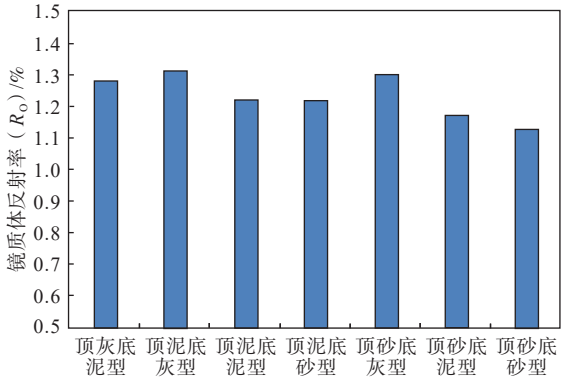


图 6 不同顶底板岩性组合的煤层镜质组反射率直方图

Fig. 6 Histogram of the vitrinite reflectance of coal seams for different combinations of hanging- and foot-wall lithologies

3.3 煤储层物性特征

为探究临兴地区不同顶底板深层煤层的物性特征，共收集 56 口典型井的煤储层孔渗测井数据，采样间隔为 0.15 m。不同顶底板岩性类型的煤层孔隙度和渗透率统计分析表明（图 7），顶灰底泥型煤储层平均孔隙度为 5.86%，平均渗透率为 0.00997 mD；顶泥底灰型煤储层平均孔隙度为 5.79%，平均渗透率为 0.00951 mD；顶泥底泥型煤储层平均孔隙

度为 5.90%，平均渗透率为 0.00990 mD；顶泥底砂型煤储层平均孔隙度为 5.87%，平均渗透率为 0.00971 mD；顶砂底灰型煤储层平均孔隙度为 6.16%，平均渗透率为 0.01010 mD；顶砂底泥型煤储层平均孔隙度为 6.11%，平均渗透率为 0.01000 mD；顶砂底砂型煤储层平均孔隙度为 5.94%，平均渗透率为 0.00963 mD。整体而言，研究区煤储层孔隙度介于 5.50%～6.20%，渗透率介于 0.00950 ～0.01050 mD，呈现特低孔—特低渗特征，不同顶底板类型的煤储层物性特征没有明显差异。

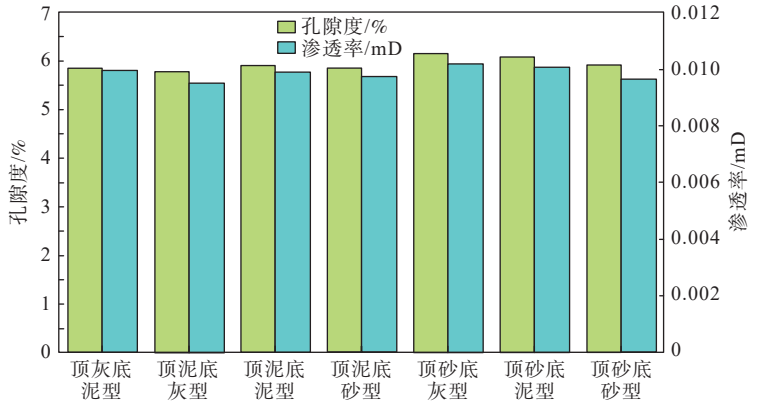


图 7　不同顶底板岩性组合的煤储层孔隙度–渗透率直方图

Fig. 7　Histogram of the porosity-permeability of coal reservoirs for different combinations of hanging- and foot-wall lithologies

3.4　煤层含气量分布特征

研究区煤层含气量整体介于 5.53 ～21.46 m³/t，分布具有明显差异，由西向东含气量呈高—低—高的变化趋势（图 8）。煤层含气量高值区主要分布在研究区西北部、西南部以及中部地区，含气量介于 15.00 ～21.46 m³/t；含气量低值区分布在中东部和东北部地区，含气量范围介于 5.53～15.00 m³/t。

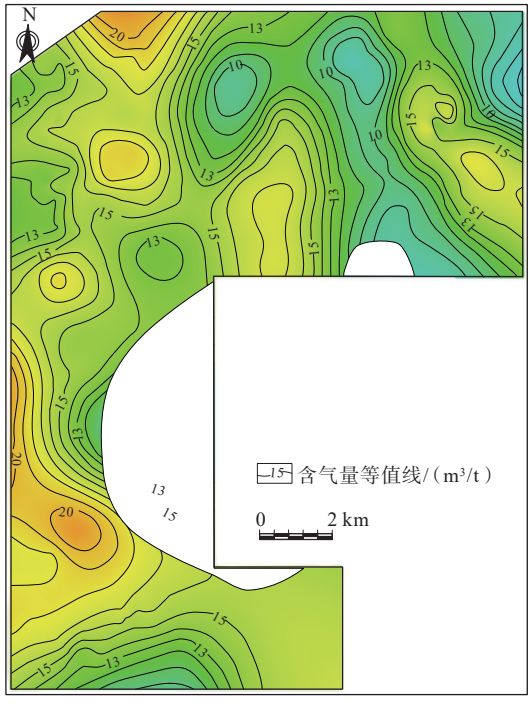


图 8　临兴地区煤层含气量等值线图

Fig. 8　Contour map of the gas content in the coal seams of the Linxing area

4　深层煤层顶底板与含气性的耦合模式

4.1　深层煤层顶底板与含气量的关系

研究区深层煤层顶底板的岩性组合种类多样、厚度变化幅度较大。依据研究区煤层含气量数据，分析不同岩性组合对煤层含气量的影响，建立了顶底板岩性组合与煤层平均含气量的关系图（图 9）。结果表明，煤层含气量因顶底板岩性组合的变化而不同，具体表现为顶灰底泥型、顶泥底灰型、顶泥底泥型、顶泥底砂型、顶砂底灰型、顶砂底泥型、顶

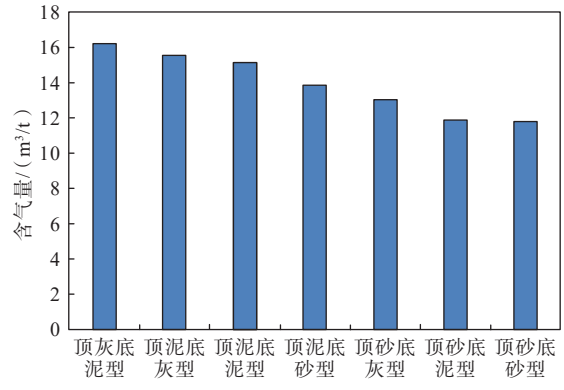


图 9　不同顶底板岩性组合的煤层平均含气量

Fig. 9　Average gas content of coal seams with different combinations of hanging- and foot-wall lithologies

砂底砂型煤层的含气量依次递减。进一步分析不同岩性组合中煤层含气量的分布特征发现，顶底板为顶灰底泥型、顶泥底灰型和顶泥底泥型的煤层含气量峰值均在 15～18 m³/t，相较于其他顶底板岩性组合，煤层含气量最高。顶泥底砂型、顶砂泥底灰型的煤层含气量峰值处于 12～15 m³/t，煤层含气量较高。顶砂底泥型、顶砂底砂型的煤层含气量峰值小于 12 m³/t，煤层含气量较低（图 10）。

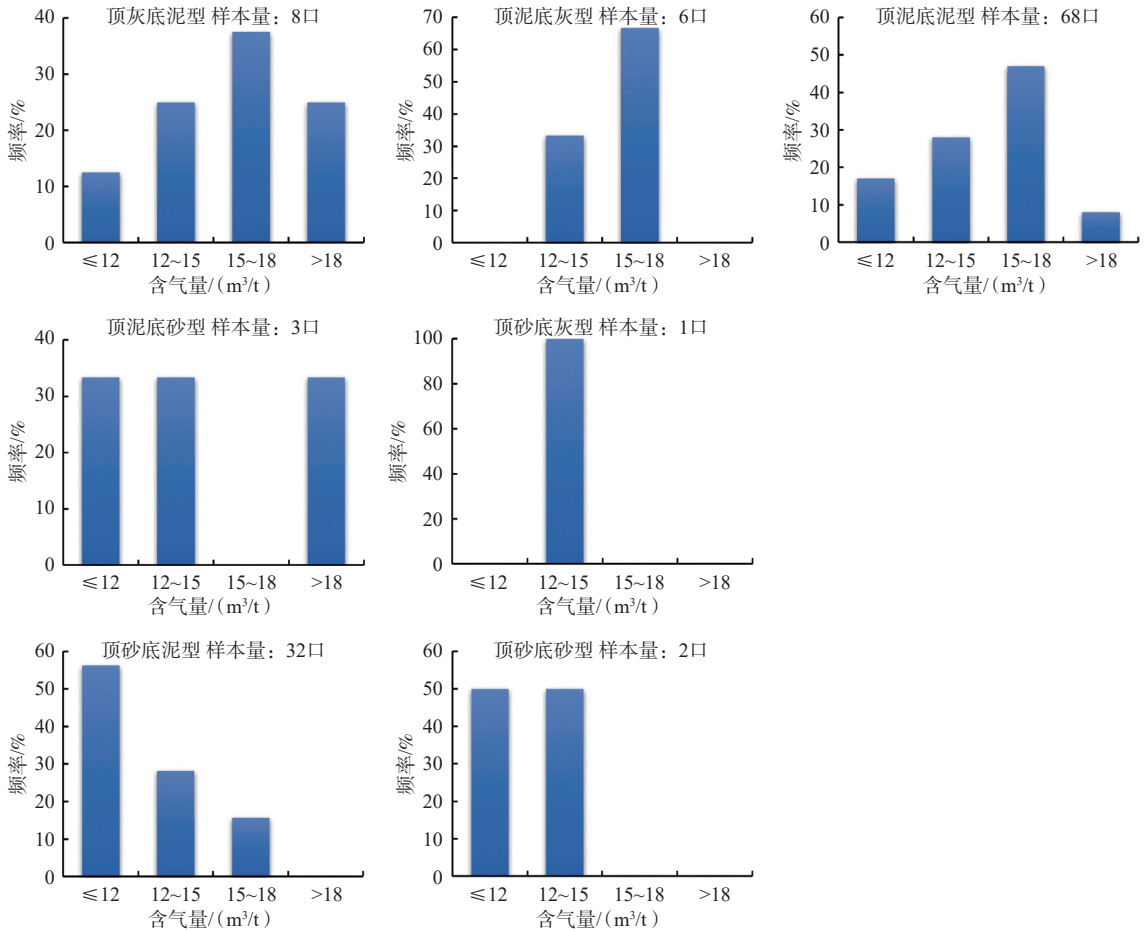


图 10 顶底板岩性组合与煤层含气量的关系

Fig. 10 Relationship between combinations of hanging- and foot-wall lithologies and gas content

深层煤层顶底板厚度范围介于 1.90～21.19 m，厚度变化较大。因此，有必要进一步分析其厚度对煤层含气量的影响。鉴于研究区钻遇顶底板为泥岩的钻井最多，通过分析顶底板泥岩厚度与煤层含气量的关系（图 11），表明深层煤层顶底板泥岩厚度与含气量呈正相关，顶底板厚度增大，煤层含气量呈增加趋势，有利于深层煤层气富集保存。

4.2 深层煤层顶底板与含气性的耦合关系

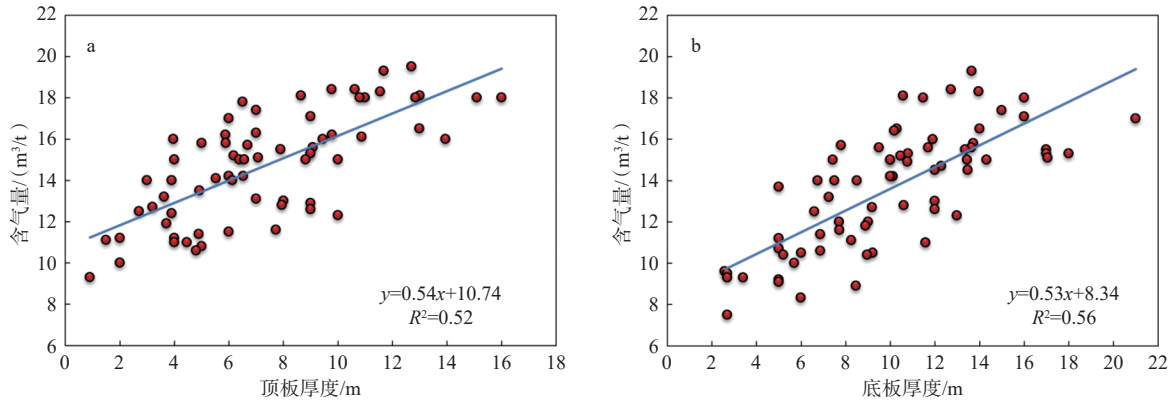
基于深层煤层顶底板不同的岩性组合与厚度对其含气量的影响，可利用层次分析法进一步分析两者的关系。层次分析法（Analysis of Hierarchy Process, AHP）是美国运筹学家托马斯·萨蒂为确定多目标决策中各目标权重所提出的新方法，通过层次分析法将问题分解成许多因素，根据因素之间的联系、影响和从属关系，在不同层次上进行聚集和组合，从而简化为指标层和目标层之间关系（Saaty, 1977; 谭跃进，2012; 魏千盛等，2021; 周俊和马世澎，2024）。

①构建层次结构模型，以煤层顶底板对其含气量的影响为目标层，构建准则层为顶底板岩性、顶底板厚度，依次构建指标层：顶板岩性、底板岩性、顶板厚度（D_1）以及底板厚度（D_2）（图 12）。②通过构建的判断矩阵计算各层的相对权重，再将指标层和准则层的权重进行综合，得到指标层相对于目标层的权重值（表 1）。③利用公式（1）和公式（2）检验权重值一致性是否合格：

$$CI = (\lambda - n)/(n-1) \tag{1}$$

$$CR = CI/RI \tag{2}$$

式中，CR—检验因子；λ—特征值；n—因素个



a—顶板泥岩；b—底板泥岩

图 11　顶底板泥岩厚度与煤层含气量的关系

Fig. 11　Relationship between hanging- and foot-wall mudstone thickness and coal seam gas content

(a) Hanging-wall mudstone; (b) Foot-wall mudstone

数；*CI*—一致性指标；*RI*—随机一致性指标。

通过计算，其最大特征值为 4.00，确定 *RI* 值为 0.89（表 2），进行一致性检验分析。当 *CR*<0.1 时，一致性检验合格；当 *CR*>0.1 时，调整赋值，重复以上步骤，直至一致性检验合格。文中计算出检验因子 *CR* 为 0，一致性检验合格。

依据煤层顶底板的岩性特征和厚度分布，进行指标量化赋分，获得指标的量化标准（表 3）。在经过指标数据量化赋分后，将指标数值与层次分析法得到的权重相乘后累加得到指标总分。依据已有研究成果（陶传奇，2019；郭广山等，2024），结合《煤层气资源/储量规范》（DZ/T 0216—2020），将研究区煤层含气量划分 3 个范围：高含气量（含气量>15 m^3/t）、较高含气量（12～15 m^3/t）、低含气量（含气量<12 m^3/t）。在此基础上，结合指标总分和煤层含气量范围对深层煤层的顶底板与含气性的耦合关系开展详细分析。

当顶灰底泥型煤层 10 m>D_1≥5 m 且 D_2≥10 m 或 D_1<5 m 且 D_2≥5 m、顶泥底灰型煤层 10 m>D_1≥5 m 且 D_2<5 m 、顶泥底泥型煤层 D_1≥10 m 或 10 m>D_1≥5 m 且 D_2≥5 m 时，其指标总分范围在 1.02～1.29，平均含气量均处于高含气量范围，表明深层煤层顶底板与含气性的耦合关系好（表 4）。而当顶泥底灰型煤层 D_1<5 m 且 D_2<5 m、顶泥底泥型煤层 10 m>D_1≥5 m 且 D_2<5 m 或 D_1<5 m 、顶泥底砂型煤层

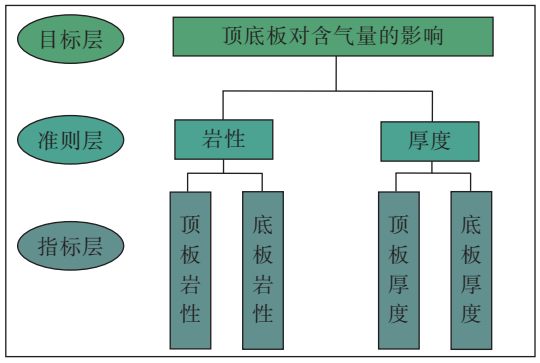


图 12　影响因素评价层次结构

Fig. 12　Hierarchical structure of the evaluation of influencing factors

表 1　各因素权重表

Table 1　Weight table of each factor

准测层	权重	指标层	权重	综合权重
岩性	0.56	顶板岩性	0.39	0.22
		底板岩性	0.24	0.13
厚度	0.44	顶板厚度(D_1)	0.26	0.11
		底板厚度(D_2)	0.11	0.05

10>D_1≥5 m 且 10>D_2≥5 m、顶砂底灰型煤层 10>D_1≥5 m 且 D_2<5 m、顶砂底泥型煤层 D_1<5 m 时，其指标总分范围在 0.86～0.99，平均含气量处于较高含气量范围，反映出深层煤层顶底板与含气性的耦合关系较好。当顶砂底泥型煤层 D_1≥10 m 且 10 m>D_2≥5

表 2　随机一致性指标表

Table 2　Stochastic consistency indicators

矩阵阶数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
RI	0	0	0.52	0.89	1.12	1.26	1.36	1.41	1.46	1.49

表 3 指标赋值转化参考标准表

Table 3 Index assignment conversion reference standard table

指标量化赋值	1	2	3
顶板岩性	砂岩	泥岩	灰岩
底板岩性	砂岩	泥岩	灰岩
顶板厚度(D_1; 灰岩、泥岩)	D_1<5	10>D_1≥5	D_1≥10
底板厚度(D_2; 灰岩、泥岩)	D_2<5	10>D_2≥5	D_2≥10
顶板厚度(D_1; 砂岩)	D_1≥10	10>D_1≥5	D_1<5
底板厚度(D_2; 砂岩)	D_2≥10	10>D_2≥5	D_2<5

m 或 10 m>D_1≥5 m 、顶砂底砂型煤层 D_1<5 m 且 D_2<5 m 时，其指标总分范围在 0.69 ～ 0.85，平均含气量处于低含气量范围，表明深层煤层顶底板与含气性的耦合关系较差。在顶砂底泥型组合中，顶板砂岩的厚度与含气量呈负相关关系，是由于顶板砂岩的上覆岩层为泥岩，其砂岩厚度越小，上覆泥岩越接近煤层，含气量越高。

4.3 深层煤层顶底板与含气性的耦合模式

基于深层煤层顶底板与含气性耦合关系的分析结果，在临兴地区建立了 3 类深层煤层顶底板与含气性耦合模式(图 13)：Ⅰ类(耦合关系好)、Ⅱ类(耦合关系较好))、Ⅲ类(耦合关系差)。

其中，Ⅰ类耦合模式的深层煤层气富集程度高，含气量与深层煤层顶底板耦合关系好，主要特征表现为：①顶底板岩性组合样式为顶灰底泥型(10 m>D_1≥5 m 且 D_2≥10 m、D_1<5 m 且 D_2≥5 m)、顶泥底灰型(10 m>D_1≥5 m 且 D_2<5 m)、顶泥底泥型(D_1≥10 m、10 m>D_1≥5 m 且 D_2≥5 m)；②顶底板指标总分大于 1.00；③深层煤层气含气量为 11.60 ～ 20.00 m³/t，平均含气量为 16.08 m³/t。

表 4 深层煤层顶底板综合特征与含气量耦合关系

Table 4 Relationship between characteristics of the hanging- and foot-wall beds and the gas content in a deep coal seam

岩性组合类型	顶板厚度(D_1)/m	底板厚度(D_2)/m	指标总分	平均含气量/(m³/t)	含气性耦合关系
顶灰底泥型	10>D_1≥5	D_2≥10	1.29	19.51	好
	D_1<5	D_2≥10	1.18	16.01	好
		10>D_2≥5	1.13	15.86	好
顶泥底灰型	10>D_1≥5	D_2<5	1.10	16.10	好
	D_1<5	D_2<5	0.99	14.60	较好
顶泥底泥型	D_1≥10	D_2≥10	1.18	17.11	好
		10>D_2≥5	1.13	17.05	好
		D_2<5	1.08	15.60	好
	10>D_1≥5	D_2≥10	1.07	15.33	好
		10>D_2≥5	1.02	15.02	好
		D_2<5	0.97	14.86	较好
	D_1<5	D_2≥10	0.96	14.48	较好
		10>D_2≥5	0.91	13.63	较好
		D_2<5	0.86	13.38	较好
顶泥底砂型	10>D_1≥5	10>D_2≥5	0.89	14.67	较好
顶砂底灰型	10>D_1≥5	D_2<5	0.88	13.60	较好
顶砂底泥型	D_1≥10	10>D_2≥5	0.69	10.52	差
	10>D_1≥5	D_2≥10	0.85	11.60	差
		10>D_2≥5	0.80	11.61	差
		D_2<5	0.75	11.88	差
	D_1<5	10>D_2≥5	0.91	13.40	较好
		D_2<5	0.86	13.46	较好
顶砂底砂型	D_1<5	D_2<5	0.72	11.30	差

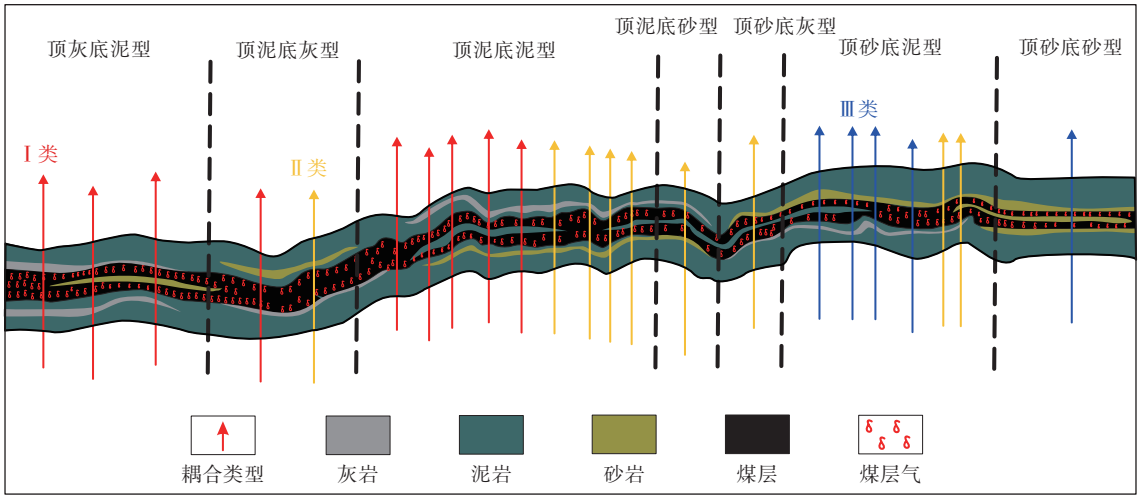


图 13 深层煤层气的富集耦合模式

Fig. 13 Coupling model of deep coalbed methane enrichment

Ⅱ类耦合模式的深层煤层气富集程度较高，含气量与深层煤层顶底板耦合关系较好，主要特征表现为：①顶底板岩性组合样式为顶泥底灰型（D_1 和 D_2 均<5 m）、顶泥底泥型（10 m>D_1≥5 m 且 D_2<5 m、D_1<5 m）、顶泥底砂型（10 m>D_1≥5 m 且 10 m>D_2≥5 m）、顶砂底灰型（10 m>D_1≥5 m 且 D_2<5 m）、顶砂底泥型（D_1<5 m）；②顶底板指标总分范围在 0.86～0.99；③深层煤层气含气量在 10.60～20.00 m³/t，平均含气量在 13.91 m³/t。

Ⅲ类耦合模式的深层煤层气富集程度低，含气量与深层煤层顶底板耦合关系差，主要特征表现为：①顶底板岩性组合样式为顶砂底泥型（D_1≥10 m 且 10 m>D_2≥5 m、10 m>D_1≥5 m）、顶砂底砂型（D_1 和 D_2 均<5 m）；②顶底板指标总分小于 0.85；③深层煤层气含气量在 8.33～13.20 m³/t，平均含气量在 10.77 m³/t。

5　结论

（1）临兴地区 8+9 号煤层主要形成于潮上带、泥炭坪以及泥炭沼泽，其顶底板主要沉积于泥坪、潟湖、灰坪、砂坪微相，受沉积环境控制，顶底板主要发育灰岩、泥岩、砂岩 3 种岩性；煤层顶板和底板厚度平面分布变化较大，顶板厚度介于 1.90～19.00 m，底板厚度介于 1.99～21.19 m。

（2）临兴地区 8+9 号煤层顶底板划分出顶灰底泥型、顶泥底灰型、顶泥底泥型、顶泥底砂型、顶砂底灰型、顶砂底泥型和顶砂底砂型 7 种组合样式。其中顶灰底泥型、顶泥底灰型和顶泥底泥型的煤层含气量高，顶泥底砂型、顶砂泥底灰型的煤层含气量较高，顶砂底泥型、顶砂底砂型的煤层含气量低。同一岩性下，煤层顶底板厚度越大，煤层含气量越高，顶底板厚度与含气量呈正相关关系。

（3）煤层顶底板与含气量关系的层次分析法研究表明，临兴地区 8+9 号深层煤层可划分为 3 类煤层顶底板与含气性的耦合关系：Ⅰ类两者耦合关系好，煤层含气量大于 15 m³/t；Ⅱ类两者耦合关系较好，煤层含气量范围在 12～15 m³/t、Ⅲ类两者耦合关系差，含气量小于 12 m³/t。

References

DU J, ZHU G H, LI Y, et al., 2022. Exploration and development challenges and technological countermeasures for tight sandstone gas reservoirs in Ordos Basin margin: a case study of Linxing–Shenfu Gas Field[J]. Natural Gas Industry, 42(1): 114-124. (in Chinese with English abstract)

FAN L Y, ZHOU G X, YANG Z B, et al., 2025. Geological control of differential enrichment of deep coalbed methane in the Ordos Basin[J]. Coal Science and Technology, 53(1): 203-215. (in Chinese with English abstract)

GAO B, MA Y Z, TAO M X, et al., 2003. Main controlling factors analysis of enrichment condition of coaibed methane[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 21(2): 345-349. (in Chinese with English abstract)

GUO G S, XU F Y, LI L F, et al., 2024. Enrichment and accumulation patterns and favorable area evaluation of deep coalbed methane in the Fugu area, Ordos Basin[J]. Coal Geology & Exploration, 52(2): 81-91. (in Chinese with English abstract)

GUO X J, ZHI D M, MAO X J, et al., 2021. Discovery and significance of coal measure gas in Junggar Basin[J]. China Petroleum Exploration, 26(6): 38-49. (in Chinese with English abstract)

GUO X J, WANG L, YAO X Z, et al., 2025. Geological characteristics of deep coal rock and main geological factors controlling coalbed methane enrichment: a case study of the M area in the eastern Ordos Basin[J]. Petroleum Geology & Experiment, 47(1): 17-26. (in Chinese with English abstract)

HUANG Z W, LI G F, YANG R Y, et al., 2022. Review and development trends of coalbed methane exploitation technology in China[J]. Journal of China Coal Society, 47(9): 3212-3238. (in Chinese with English abstract)

JIA H M, HU Q J, ZHANG C, et al. , 2025. Characteristics and development practice of deep coalbed methane reservoir in southern Ningwu Basin[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 54(1): 149-160, 185. (in Chinese with English abstract)

LI J L, ZUO Q M, XIE X N, et al., 2011. Neogene depositional features and favorable reservoir-cap combinations in the deepwater of Qiongdongnan Basin, northern South China Sea[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 31(6): 109-116. (in Chinese with English abstract)

LI S G, WANG C W, WANG H N, et al., 2022. Reservoir forming characteristics and favorable area evaluation of deep coalbed methane in Daning-Jixian block[J]. Coal Geology & Exploration, 50(9): 59-67. (in Chinese with English abstract)

LI Z B, LIU Z Q, 2021. Analysis of gas bearing property and physical properties of coalbed mehtane in Urumqi Hedong mining area[J]. China Coalbed Methane, 18(1): 21-24. (in Chinese with English abstract)

LIU X X, 2019. Study on the sedimentary environment of Upper Carboniferous Benxi Formation of eastern Ordos Basin, China[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology. (in Chinese with English abstract)

LU J, SHAO L Y, SUN B, et al., 2012. Sequence-paleogeography and coal accumulation of Carboniferous-Permian coal measures in the eastern Ordos Basin[J]. Journal of China Coal Society, 37(5): 747-754. (in Chinese with English abstract)

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

SAATY T L, 1977. A scaling method for priorities in hierarchical structures[J]. Journal of Mathematical Psychology, 15(3): 234-281.

SUN L C, LIU J, TIAN Y J, et al., 2025. Early practical experience and key research directions for deep coalbed methane development in the Shenfu block[J]. China Offshore Oil and Gas, 37(1): 116-128. (in Chinese with English abstract)

TAN Y J, 2012. Quantitative analysis method[M]. 3rd ed. Beijing: Renmin University of China Press. (in Chinese)

TAO C Q, 2019. Deep coalbed methane accumulation and reservoiring in Linxing Area, eastern Ordos Basin, China[D]. Beijing: China University of Mining & Technology (Beijing). (in Chinese with English abstract)

WANG C W, LIU X W, LI S G, et al., 2024. Analysis of main controlling factors of deep coalbed methane enrichment and evaluation of geological and engineering Sweet Areas in Daning-Jixian Block[J]. Journal of Xi'an Shiyou University (Natural Science Edition), 39(4): 1-9. (in Chinese with English abstract)

WANG M Z, WANG B, SUN F J, et al., 2017. Quantitative evaluation of CBM enrichment and high yield of Qinshui Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 28(7): 1108-1114. (in Chinese with English abstract)

WEI Q S, YANG S G, LI Z L, et al. , 2021. Evaluation on the influence factors of gas well productivity based on AHP and fuzzy mathematics[J]. Contemporary Chemical Industry, 50(7): 1640-1643, 1653. (in Chinese with English abstract)

XU C G, JI H Q, WANG C W, et al., 2024. Enrichment patterns and exploration countermeasures of deep coalbed methane in the Linxing-Shenfu block on the eastern margin of the Ordos Basin[J]. Coal Geology & Exploration, 52(8): 1-11. (in Chinese with English abstract)

XU F Y, WANG C W, XIONG X Y, et al., 2022. Deep (layer) coalbed methane reservoir forming modes and key technical countermeasures: taking the eastern margin of Ordos Basin as an example[J]. China Offshore Oil and Gas, 34(4): 30-42. (in Chinese with English abstract)

XU F Y, HOU W, XIONG X Y, et al., 2023. The status and development strategy of coalbed methane industry in China[J]. Petroleum Exploration and Development, 50(4): 669-682. (in Chinese with English abstract)

YANG X C, XU F Y, WANG H Y, et al., 2022. Exploration and development process of coalbed methane in eastern margin of Ordos Basin and its enlightenment[J]. Coal Geology & Exploration, 50(3): 30-41. (in Chinese with English abstract)

YANG X L, GAO J, HE F W, et al., 2025. Sedimentary evolution and reservoir-forming conditions of Taiyuan Formation in Jiaxian area, eastern margin of Ordos Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 36(1): 86-96. (in Chinese with English abstract)

ZHANG L, 2019. Study on sedimentary facies and sand body distribution of the Taiyuan Formation in Linxing area[D]. Qingdao: China University of Petroleum (East China). (in Chinese with English abstract)

ZHANG L L, CAI W Y, ZHANG Z L, et al., 2012. Technology for logging and evaluation roof and floor strata of coal seam[J]. China Coalbed Methane, 9(4): 21-24. (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[J]. Petroleum Exploration and Development, 51(2): 234-247, 259. (in Chinese with English abstract)

ZHOU J, MA S P, 2024. SPSSAU scientific research data analysis method and application[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry. (in Chinese)

ZHU G H, JI H Q, MI H G, et al., 2024. Discovery of a large gas field of deep coalbed methane in the Shenfu block and its implications[J]. Coal Geology & Exploration, 52(8): 12-21. (in Chinese with English abstract)

附中文参考文献

杜佳，朱光辉，李勇，等，2022. 鄂尔多斯盆缘致密砂岩气藏勘探开发挑战与技术对策：以临兴—神府气田为例[J]. 天然气工业，42(1)：114-124.

范立勇，周国晓，杨兆彪，等，2025. 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，53(1)：203-215.

高波，马玉贞，陶明信，等，2003. 煤层气富集高产的主控因素[J]. 沉积学报，21(2)：345-349.

郭广山，徐凤银，刘丽芳，等，2024. 鄂尔多斯盆地府谷地区深部煤层气富集成藏规律及有利区评价[J]. 煤田地质与勘探，52(2)：81-91.

郭晓娇，王雷，姚仙洲，等，2025. 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，47(1)：17-26.

郭绪杰，支东明，毛新军，等，2021. 准噶尔盆地煤岩气的勘探发现及意义[J]. 中国石油勘探，26(6)：38-49.

黄中伟，李国富，杨睿月，等，2022. 我国煤层气开发技术现状与发展趋势[J]. 煤炭学报，47(9)：3212-3238.

贾慧敏，胡秋嘉，张聪，等，2025. 宁武盆地南部深部煤层气储层特征及开发实践[J]. 中国矿业大学学报，54(1)：149-160, 185.

李俊良，左倩媚，解习农，等，2011. 琼东南盆地深水区新近系沉积特征与有利储盖组合[J]. 海洋地质与第四纪地质，31(6)：109-116.

李曙光，王成旺，王红娜，等，2022. 大宁–吉县区块深层煤层气成藏特征及有利区评价[J]. 煤田地质与勘探，50(9)：59-67.

李中博，刘子强，2021. 乌鲁木齐河东矿区煤层气含气性及物性特征分析[J]. 中国煤层气，18(1)：21-24.

刘新昕，2019. 鄂尔多斯盆地东部石炭系本溪组沉积环境研究[D]. 成都：成都理工大学.

鲁静，邵龙义，孙斌，等，2012. 鄂尔多斯盆地东缘石炭-二叠纪煤系层序-古地理与聚煤作用[J]. 煤炭学报，37(5)：747-754.

秦勇，申建，李小刚，2022. 中国煤层气资源控制程度及可靠性分析[J]. 天然气工业，42(6)：19-32.

孙立春，刘佳，田永净，等，2025. 神府区块深部煤层气开发早期实践认识与攻关方向[J]. 中国海上油气，37(1)：116-128.

谭跃进，2012. 定量分析方法[M]. 3版. 北京：中国人民大学出版社.

陶传奇，2019. 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).

王成旺，刘新伟，李曙光，等，2024. 大宁—吉县区块深部煤层气富集主控因素分析及地质工程甜点区评价[J]. 西安石油大学学报

（自然科学版），39(4)：1-9.

王玫珠，王勃，孙粉锦，等，2017. 沁水盆地煤层气富集高产区定量评价[J]. 天然气地球科学，28(7)：1108-1114.

魏千盛，阳生国，李桢禄，等，2021. 基于 AHP 和模糊数学方法的气井产能影响因素评价[J]. 当代化工，50(7)：1640-1643，1653.

徐长贵，季洪泉，王存武，等，2024. 鄂尔多斯盆地东缘临兴-神府区块深部煤层气富集规律与勘探对策[J]. 煤田地质与勘探，52(8)：1-11.

徐凤银，王成旺，熊先钺，等，2022. 深部(层)煤层气成藏模式与关键技术对策：以鄂尔多斯盆地东缘为例[J]. 中国海上油气，34(4)：30-42.

徐凤银，侯伟，熊先钺，等，2023. 中国煤层气产业现状与发展战略[J]. 石油勘探与开发，50(4)：669-682.

杨晓利，高娟，何福文，等，2025. 鄂尔多斯盆地东缘佳县地区太原组沉积演化及成藏条件[J]. 天然气地球科学，36(1)：86-96.

杨秀春，徐凤银，王虹雅，等，2022. 鄂尔多斯盆地东缘煤层气勘探开发历程与启示[J]. 煤田地质与勘探，50(3)：30-41.

张莉莉，蔡文渊，张兆陵，等，2012. 煤层顶底板层封盖性评价技术[J]. 中国煤层气，9(4)：21-24.

张良，2019. 临兴地区太原组沉积相及砂体展布规律研究[D]. 青岛：中国石油大学(华东).

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[J]. 石油勘探与开发，51(2)：234-247，259.

周俊，马世澎，2024. SPSSAU 科研数据分析方法与应用[M]. 北京：电子工业出版社.

朱光辉，季洪泉，米洪刚，等，2024. 神府深部煤层气大气田的发现与启示[J]. 煤田地质与勘探，52(8)：12-21.