https://doi.org/10.3799/dqkx.2026.162

鄂尔多斯盆地东南缘宜川地区本溪组8#煤岩储层特征与聚煤环境

崔广智[1],迟润龙[1],张华莲[2*],刘媛媛[1],王晓辉[1],王孝成[1],刘 硕[1]

1. 辽河油田分公司勘探开发研究院,辽宁盘锦 124010
2. 页岩气勘探开发国家地方联合工程研究中心(重庆地质矿产研究院),自然资源部重庆典型矿区生态修复野外科学观测研究站(重庆地质矿产研究院),重庆 401100

摘 要: 鄂尔多斯盆地东南缘的宜川地区本溪组8#煤岩广覆式发育,是深层煤层(岩)气勘探开发的主要目的层.为落实8#煤层煤岩储层特征和聚煤环境,基于6口井的岩心资料,对煤岩成分、孔隙结构特征和元素地球化学特征开展试验分析.8#煤岩显微组分以镜质组为主,占比为80.5%,工业分析为低含水(0.94%)、中-低灰分(13.29%)、低挥发分,镜质体反射率平均2.99%,为高阶无烟煤.煤岩孔隙类型以次生的有机质气孔占比最高,其次为屑间孔和胞腔孔,微裂隙发育大幅提升了煤岩基质的渗透性.孔隙结构分析表明,8#煤岩微孔发育,孔体积占比为64.53%,提供了几乎全部吸附气的赋存空间;介孔不发育,宏孔和微裂隙较发育,为游离气提供了赋存空间.8#煤岩主要聚煤沼泽类型为覆水森林沼泽和深水芦苇沼泽,温热潮湿的古气候有利于成煤植物的生长和繁育,封闭、还原的水体环境促进了凝胶化作用的进行,为优质煤岩的形成提供了良好的环境.

关键词: 宜川地区;本溪组8#煤;孔隙结构;聚煤环境;石油地质学.

中图分类号: P618.13 **文章编号:** 1000-2383(2026)07-2791-16 **收稿日期:** 2025-12-29

Reservoir Characteristics and Peat-Forming Environment of No. 8 Coal Seam in Benxi Formation, Yichuan Area, Southeastern Ordos Basin

Cui Guangzhi[1], Chi Runlong[1], Zhang Hualian[2*], Liu Yuanyuan[1], Wang Xiaohui[1], Wang Xiaocheng[1], Liu Shuo[1]

1. *Liaohe Oilfield Exploration and Development Research Institute, Panjin* 124010, *China*
2. *National Local Joint Engineering Research Center for Shale Gas Exploration and Development (Chongqing Institute of Geology and Mineral Resources), Chongqing* 401100, *China*

Abstract: The No. 8 coal seam in the Benxi Formation of the Yichuan Area on the southeastern margin of the Ordos Basin is extensively developed, serving as the primary target layer for coalbed methane exploration and development. To clarify the reservoir characteristics and peat-forming environment of this coal seam, experimental analyses were conducted based on core data from five wells, focusing on coal composition, pore structure characteristics, and elemental geochemistry. The macerals of the No. 8 coal are predominantly vitrinite, accounting for 80.5%. Proximate analysis indicates low moisture (0.94%), medium-low ash (13.29%), and low volatile matter content. The average random vitrinite reflectance is 2.99%, classifying it as high-rank

基金项目: 油气重大专项(No. 2024ZD1400100);中国石油天然气股份有限公司科技项目(No. 2023ZZ18YJ02).

作者简介: 崔广智(1987-),男,高级工程师,主要从事非常规油气田勘探开发方面的研究. ORCID:009-0005-2485-8356. E-mail: cuiguangzhi1@petrochina.com.cn

* **通讯作者:** 张华莲,ORCID:0009-0006-8366-8234. E-mail:kxhualian@163.com

引用格式: 崔广智,迟润龙,张华莲,刘媛媛,王晓辉,王孝成,刘硕,2026.鄂尔多斯盆地东南缘宜川地区本溪组8#煤岩储层特征与聚煤环境.地球科学,51(7):2791-2806.

Citation: Cui Guangzhi, Chi Runlong, Zhang Hualian, Liu Yuanyuan, Wang Xiaohui, Wang Xiaocheng, Liu Shuo, 2026. Reservoir Characteristics and Peat-Forming Environment of No. 8 Coal Seam in Benxi Formation, Yichuan Area, Southeastern Ordos Basin. *Earth Science*, 51(7): 2791-2806.

anthracite. Among pore types, secondary organic gas pores are the most abundant, followed by intergranular pores and cellular pores. Well-developed micro-fractures significantly enhance the permeability of the coal matrix. Pore structure analysis reveals that the No. 8 coal is rich in micropores, which contribute 64.53% of the total pore volume, providing nearly all the storage space for adsorbed gas. Mesopores are underdeveloped, while macropores and micro-fractures are relatively well-developed, offering storage space for free gas. The main types of peat-forming swamps for the No. 8 coal were flooded forest swamps and deep-water reed swamps. The warm, humid paleoclimate favored the growth and proliferation of peat-forming plants, and the closed, reducing water environment promoted gelification, providing favorable conditions for the formation of high-quality coal.

Key words: Yichuan Area; No. 8 coal seam of Benxi Formation; pore structure; peat-forming environment; petroleum geology.

0 引言

煤层气是一种重要的非常规天然气,凭借其丰富储量和环保优势,在全球尤其在中国,正逐步成为能源结构中重要的补充,其中绝大部分储量和产量集中在1 500 m以浅的煤层中.美国于20世纪70年代开始对深层煤岩的含气性展开探索但效果不佳,认为1 500 m以深的煤层气不具备商业开发价值(Johnson *et al.*,1998).“十四五”全国油气资源评价工作成果表明,我国1 500 m以下的深层煤层(岩)气资源十分丰富,总资源量近$30\times10^{12}m^3/d$,主要分布在鄂尔多斯、四川、准噶尔等含油气盆地中(罗平亚等,2023;徐凤银等,2023;刘翰林等,2024;赵喆等,2024).2021年底中国石油在鄂尔多斯盆地东缘的大宁-吉县地区成功实施了JS6-7H01井,试气最高日产气超$10\times10^4m^3/d$,首次实现了深层煤层(岩)气商业化开发(徐凤银等,2022).截至2024中石油长庆油田、煤层气公司、辽河油田、冀东油田及中石化、中海油各油气田企业累计在鄂尔多斯盆地提交深层煤层(岩)气探明地质储量超$6\ 000\times10^8m^3$,累计实施各类钻井530余口,深层煤层(岩)气累计产量$37.2\times10^8m^3$,预计2025年累计储量规模将超过$10\ 000\times10^8m^3$、年产量将超$40\times10^8m^3$,中国深层煤层(岩)气产业正在加速进入快速发展的新阶段(焦方正等,2025).

鄂尔多斯盆地的深层煤层(岩)气作为一种全新的天然气藏类型,与传统浅煤层气相比虽然均为以煤岩为主体的源储一体气藏,但气藏的地质特征与生产特征却存在较大差异(秦勇等,2012;谢英刚等,2015;张君峰等,2020;秦勇,2023;许浩等,2024).目前的勘探开发实践表明,深层煤层(岩)气藏具有“高含气量、高游离气含量、高地层压力”的地质特征和“开井即见气、无需长时间排水降压”的生产特征(陈世达等,2023;邓泽等,2024;石军太等,2024).在鄂尔多斯盆地,深层煤层(岩)长期作为优质烃源岩被针对性地开展生排烃方向的研究(范立勇等,2024;牛小兵等,2024),其储层特征被长期忽略,进而制约了其成藏特征和机理的研究.近年来伴随着深层煤层(岩)气勘探开发取得重大突破,煤岩聚煤环境、储层特征等再次成为国内相关领域学者研究的重点.针对煤岩储层特征,研究手段已从传统的孔裂隙分析发展到多方法联合精细定量表征,初步揭示了鄂尔多斯盆地中部米脂-纳林河8#煤岩复杂储层的纳米级孔隙结构和空间非均质性(黄道军等,2025;张景缘等,2025;刘翰林等,2026);针对聚煤环境,通过应用层系地层学、元素地球化学、天文旋回等方法,揭示了鄂尔多斯盆地8#煤成煤模式、聚煤沼泽类型、特征和演化历程.本次研究通过岩心观描与室内分析测试相结合的方式,对鄂尔多斯盆地东南缘宜川地区本溪组8#煤岩开展系统研究,揭示其储层特征,并结合聚煤环境的分析,探讨优质储层的成因机制,为深层煤层(岩)气成藏条件分析和富集高产控制因素的研究奠定基础.

1 研究区概况

研究区位于鄂尔多斯盆地东南缘(图1),构造位置处于伊陕斜坡之上,东南部靠近渭北隆起,发育东西向、北东南西向逆断层,北部地区断裂不发育,整体为产状稳定平缓的单斜构造背景(任战利等,2021;单俊峰等,2022).宜川地区晚石炭世-二叠纪华北板块位于盘古超大陆东缘的赤道低纬度区,历经加里东运动长达1.5亿年风化剥蚀,基底古坡度极缓(本2段0.64°、本1段0.21°),发育着广阔的浅海、潟湖、滨海平原和内陆沼泽,平坦的地形为后来大规模森林和沼泽的发育提供了理想条件(彭子霄等,2023).区内钻井揭示自下而上共发育10套煤层,累计厚度最大达20 m.其中石炭系本溪组顶部8#煤层和二叠系山$^2_3$亚段顶部5#煤层单层厚度较大、稳定性好,均已达到过成熟演化阶段,随钻气测显示特别活跃,具备开展深层煤层(岩)气勘探开发的

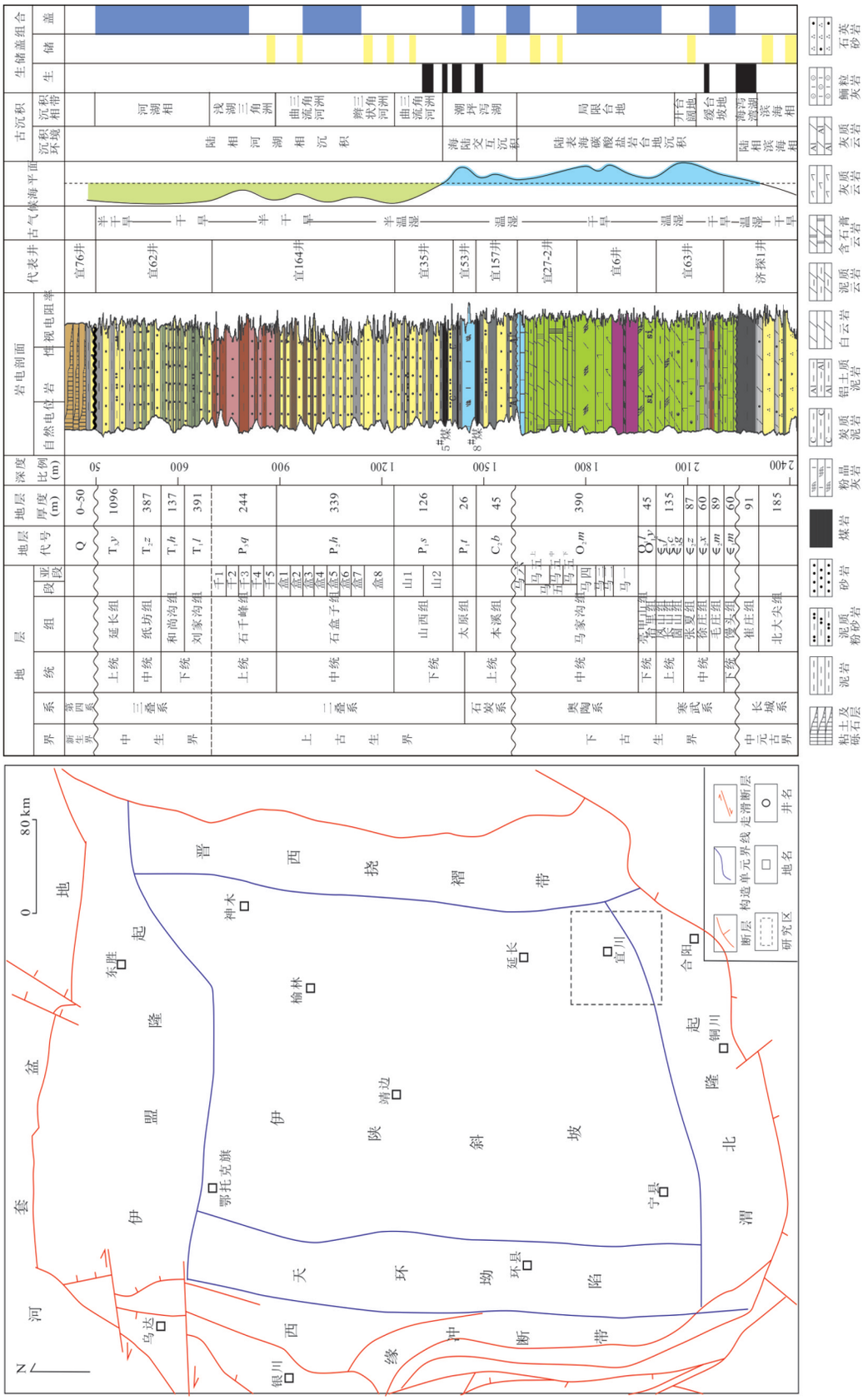

图1　鄂尔多斯盆地构造分区与宜川地区地层综合柱状图

Fig.1 Structural subdivisions of the Ordos Basin and stratigraphic column in Yichuan Area

有利条件.本次研究聚焦厚度大、分布最稳定、含气量最好的8#煤层.

2　样品选区与分析测试

研究区目的层取心资料较为丰富,为保证试验数据可靠性与代表性,共选取Y14-18X1、Y156-2、Y39-1、Y23-1、Y76-2和Y56-3等6口井34块样品(图21),系统开展宏观描述、工业分析、显微组分分析、扫描电镜、微米-纳米CT扫描、低温CO_2吸附、低温N_2吸附、高压压汞测试等9项分析测试,各项测试均严格依据国家或行业(企业)标准.

3　煤岩孔隙结构特征

3.1　宏观煤岩类型

1919年,M.C.斯托普丝在《条带状烟煤中的四种可见组分》一文中,首次提出烟煤中镜煤、亮煤、暗煤和丝煤4种煤岩组分,并根据上述成分的组合比例,将煤岩划分为4种宏观类型,即光亮煤、半亮煤、半暗煤和暗煤(表1).

研究区8#煤岩心质轻,具有玻璃光泽或似金属光泽,肉眼统计亮煤、镜煤含量在80%~95%,宏观煤岩类型以光亮煤、半亮煤为主(图2),集中发育在煤层中上部,厚度占煤层总厚度的60%以上,在煤岩中下部及煤岩与围岩接触部分发育半暗煤、暗煤.煤心产状以柱状、块状为主,结构完整度很高.煤岩内生及外生裂隙均较为发育,两组内生割理垂直或斜交发育,面割理密度9~15条/5 cm、端割理密度4~13条/5 cm;外生裂隙以高角度原生裂缝和诱导缝为主,原生裂缝中常见方解石或泥质充填.8#煤层纵向结构较为简单,不发育或仅发育一套夹矸,岩性以炭质泥岩为主,平均厚度0.52 m,主要发育在煤层中下部.

表1　煤岩的宏观类型划分

Table 1　Macroscopic type classification for coal rocks

宏观煤岩类型	代码	分类指标	
		总体相对光泽强度	光亮成分含量(%)
光亮煤	BC	强	>80
半亮煤	SBC	较强	>50~80
半暗煤	SDC	较弱	>20~50
暗淡煤	DC	弱	≤20

3.2　煤岩组分

3.2.1　显微组分　依据《煤的显微组分和矿物测定方法》GB/T 8899-2013开展样品的显微组分测定.8#煤显微组分包括镜质组、惰质组和无机矿物,未见壳质组(图3).镜质组占比61.2%~87.6%、平均80.5%,惰质组占比5.8%~28.0%、平均11.5%,镜惰比平均为8.0;无机矿物占比为4.8%~13.6%、平均为7.9%,主要为黏土类、硫化物和碳酸盐矿物(表2).

3.2.2　工业组分　依据《煤的工业分析方法》GB/T 212-2008在温度25 ℃、湿度45%RH条件下开展样品的工业分析测试.8#煤呈现低水分、中-低灰分特征,平均灰分产率为13.29%,水分含量为0.94%,挥发分产率为7.75%,固定碳含量为78.02%.煤岩品质较好(表3).8#煤灰分产率自下而上逐步降低(图4),高品质煤岩集中发育在煤层中上部,接近夹矸和围岩的部位灰分明显升高.

依据《煤的镜质体随机反射率自动测定图像分析方法》GB/T 40485-2021开展煤岩镜质体反射率测定,8#煤镜质体反射率R_o介于2.79%~3.21%之间,平均2.99%(表3),纵向随深度增加,镜质体反射率有升高趋势.平面上镜质体反射率高于研究区周边其他地区8#煤岩(图5).

图2　研究区8#煤宏观煤岩类型照片(Y76-2井)

Fig.2　Photos of the macroscopic coal and rock types of No. 8 coal in the study area (Well Y76-2)

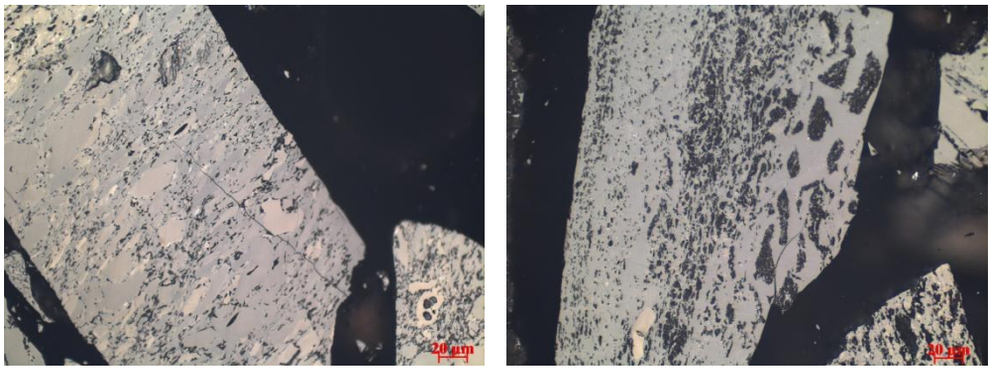

图 3　研究区 8#煤亚显微组分照片

Fig.3　The submicroscopic component of No.8 coal in the study area

表 2　研究区本溪组 8#煤岩显微组分统计

Table 2　Statistics of macroscopic components for the No. 8 coal seam in the Benxi Formation of the study area

样品编号	镜质组含量（%）	惰质组含量（%）	黏土矿物含量（%）	硫化物类含量（%）	碳酸盐类含量（%）	镜惰比
Y156-2(1)	84.0	10.0	4.5	0.6	0.9	6.0
Y156-2(2)	85.2	10.0	3.8	0.4	0.6	4.8
Y156-2(3)	83.6	8.6	6.3	0.7	0.8	7.8
Y156-2(4)	85.6	7.6	5.4	0.6	0.8	6.8
Y156-2(5)	81.0	11.2	6.4	0.5	0.9	7.8
Y156-2(6)	87.6	6.0	5.0	0.6	0.8	6.4
Y156-2(7)	81.2	6.4	8.6	2.5	1.3	12.4
Y39-1(1)	85.2	9.0	4.6	0.5	0.7	5.8
Y39-1(2)	82.0	8.6	7.9	0.6	0.9	9.4
Y39-1(3)	81.6	10.6	6.3	0.6	0.9	7.8
Y39-1(4)	82.2	6.4	9.9	0.6	0.9	11.4
Y39-1(5)	81.0	11.0	6.3	0.8	0.9	8.0
Y39-1(6)	81.6	11.6	5.5	0.5	0.8	6.8
Y23-1(1)	81.0	12.0	5.2	1.0	0.8	7.0
Y23-1(2)	61.2	28.0	8.7	1.0	1.1	10.8
Y23-1(3)	87.2	5.8	4.3	2.2	0.5	7.0
Y23-1(4)	80.6	11.2	5.4	1.9	0.9	8.2
Y23-1(5)	81.0	11.6	5.8	0.6	1.0	7.4
Y23-1(6)	76.4	16.0	5.8	1.0	0.8	7.6
Y76-2(1)	78.0	14.4	5.8	0.8	1.0	7.6
Y76-2(2)	77.2	14.8	6.6	0.6	0.8	8.0
Y76-2(3)	86.4	7.6	4.6	0.6	0.8	6.0
Y76-2(4)	71.2	18.4	8.2	1.0	1.2	10.4
Y76-2(5)	76.4	17.6	4.2	0.8	1.0	6.0
Y56-3(1)	79.6	12.4	6.6	0.6	0.8	8.0
Y56-3(2)	83.6	10.0	4.8	0.8	0.8	6.4
Y56-3(3)	78.0	13.2	6.6	1.0	1.2	8.8
Y56-3(4)	74.0	18.0	6.2	0.8	1.0	8.0
Y56-3(5)	85.2	8.0	5.2	0.8	0.8	6.8
Y56-3(6)	76.0	10.4	10.4	1.4	1.8	13.6
平均值	80.5	11.5	6.2	0.9	0.9	8.0

表 3　研究区本溪组 8#煤岩工业分析数据

Table 3　Proximate analysis data for the No. 8 coal seam in the Benxi Formation of the study area

样品编号	深度(m)	水分(%)	灰分(%)	挥发分(%)	固定碳(%)	R_o(%)
		空气干燥基	空气干燥基	空气干燥基	空气干燥基	
Y156-2(1)	2 239.31	0.88	3.94	7.04	88.14	2.92
Y156-2(2)	2 239.88	0.93	4.83	6.51	87.73	2.94
Y156-2(3)	2 241.32	0.83	11.39	10.02	77.76	2.92
Y156-2(4)	2 241.67	0.91	4.27	7.18	87.64	2.99
Y156-2(5)	2 242.62	0.92	11.27	7.60	80.21	2.97
Y156-2(6)	2 243.42	0.86	4.32	7.07	87.75	3.03
Y156-2(7)	2 244.17	0.86	17.45	8.70	72.99	3.07
Y39-1(1)	2 342.07	1.47	10.48	7.32	80.73	3.03
Y39-1(2)	2 343.28	0.89	12.98	7.86	78.27	3.10
Y39-1(3)	2 344.64	1.16	10.13	7.22	81.49	3.10
Y39-1(4)	2 345.58	1.36	10.93	8.00	79.71	3.13
Y39-1(5)	2 346.88	1.34	10.92	6.90	80.84	3.13
Y39-1(6)	2 347.23	1.77	6.94	6.12	85.17	3.16
Y23-1(1)	2 099.60	0.91	23.48	8.57	67.04	2.94
Y23-1(2)	2 101.71	0.23	21.35	8.75	69.67	3.02
Y23-1(3)	2 102.12	1.43	12.43	6.99	79.15	2.96
Y23-1(4)	2 102.67	1.67	19.71	7.67	70.95	3.04
Y23-1(5)	2 104.87	0.99	32.75	9.13	57.13	3.04
Y23-1(6)	2 106.17	0.92	35.86	8.99	54.23	3.21
Y76-2(1)	2 097.27	0.55	2.43	6.82	90.20	2.80
Y76-2(2)	2 097.61	0.49	5.47	6.51	87.53	2.82
Y76-2(3)	2 098.69	0.83	7.09	7.88	84.20	2.81
Y76-2(4)	2 099.74	0.87	11.84	8.78	78.51	2.85
Y76-2(5)	2 100.35	0.59	20.19	9.17	70.05	2.90
Y56-3(1)	2 334.99	0.68	12.26	8.42	78.64	2.95
Y56-3(2)	2 336.92	0.94	17.27	7.96	73.83	2.86
Y56-3(3)	2 337.85	0.55	18.94	7.45	73.06	2.99
Y56-3(4)	2 338.75	0.77	10.17	7.24	81.82	3.01
Y56-3(5)	2 339.00	0.84	10.94	7.08	81.14	3.02
Y56-3(6)	2 340.67	0.83	16.76	7.43	74.98	2.90
平均值		0.94	13.29	7.75	78.02	2.99

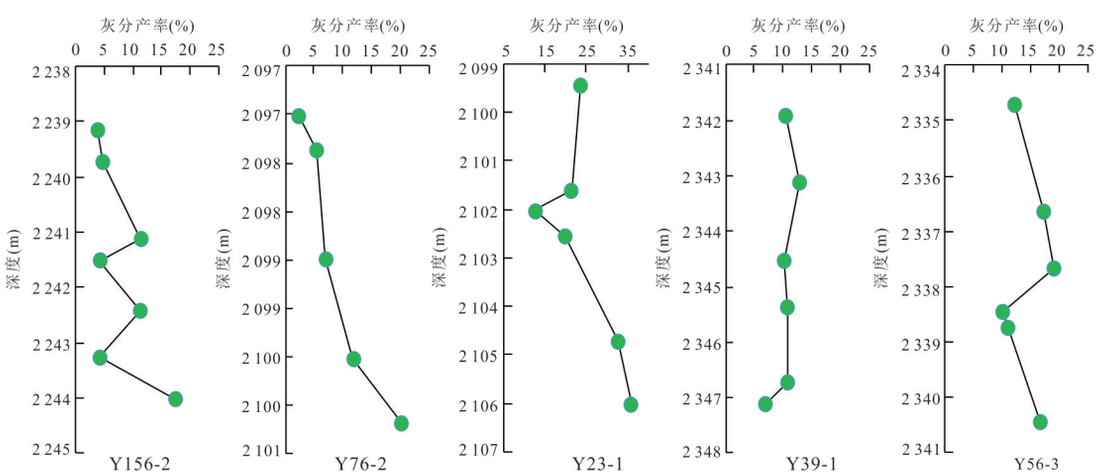

图 4　研究区本溪组 8#煤岩灰分产率随深度变化趋势

Fig.4　Variation trend of ash yield with depth for the No. 8 coal seam in the Benxi Formation of the study area

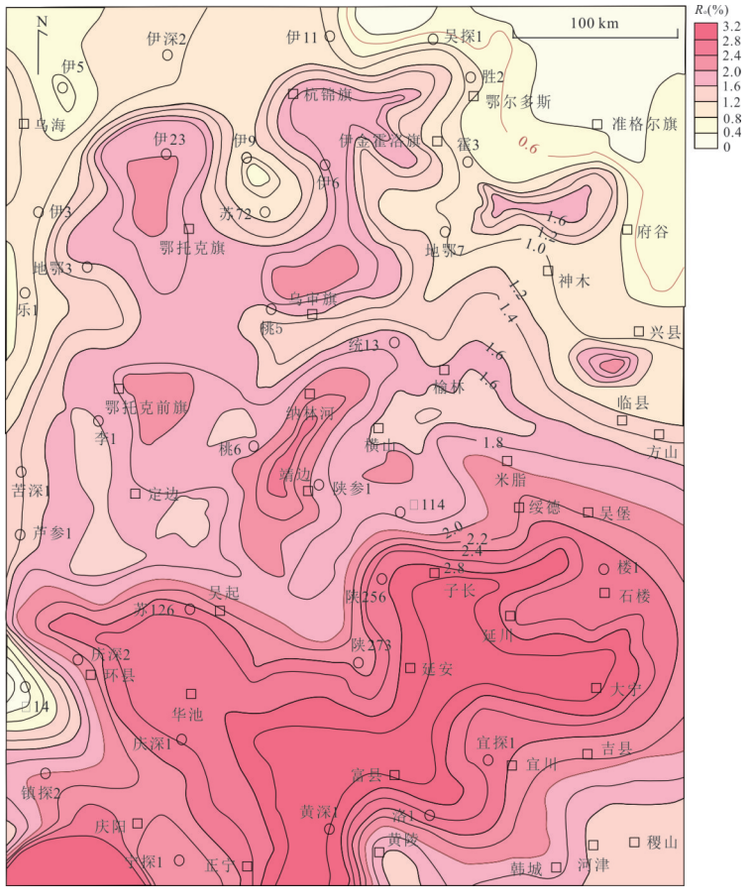

图 5　鄂尔多斯盆地 8#煤镜质体反射率等值线图

Fig.5　Contour map of vitrinite reflectance for the No. 8 coal seam in the Ordos Basin

据长庆油田，2026，深层煤岩气勘探开发工作汇报

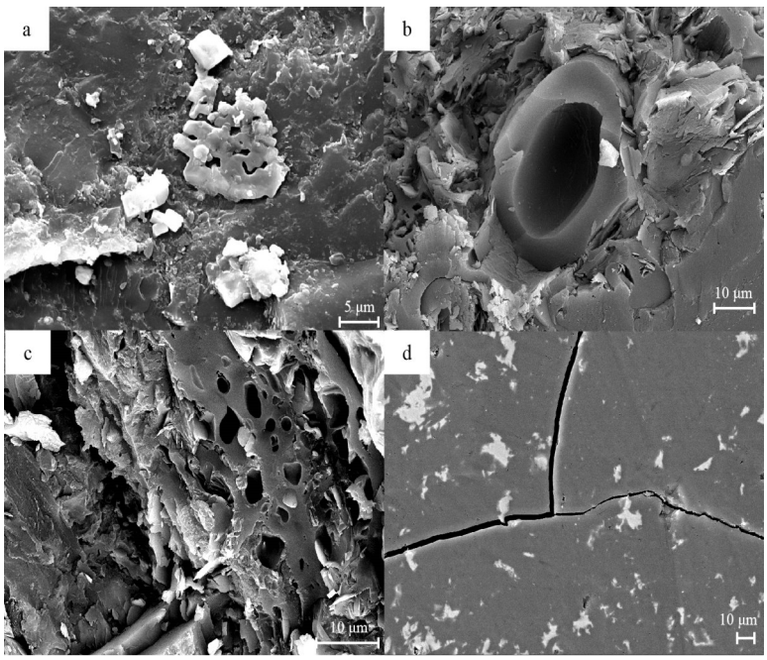

图 6　扫描电镜观察的研究区 8#煤孔隙类型

Fig.6　SEM-observed pore types in the No.8 coal seam of the study area

a. 镜质体表面矿物晶间孔；b. 胞腔孔；c. 气孔群，部分被无机矿物充填；d. 微裂隙

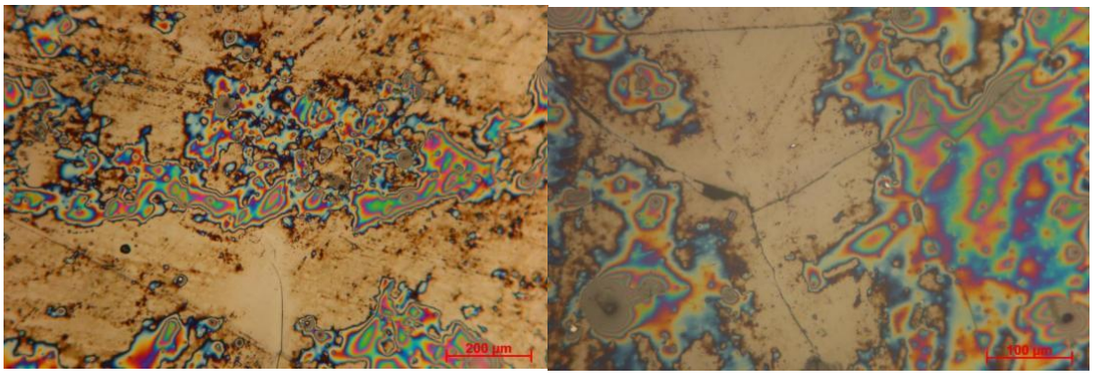

图7　研究区8#煤微裂隙图像(YQ27井)

Fig.7　Micro-fissure images of No.8 coal seam of the study area (Well YQ27)

略显层理构造,主裂隙垂直于层理面发育,次裂隙与主裂隙近垂直,局部呈雁列式、阶梯状、不规则状,个别裂隙被矿物充填.气体晕痕明显

3.3　煤岩孔隙结构

3.3.1　孔隙类型　扫描电镜观察,研究区8#煤发育有机孔和无机孔两种孔隙类型.无机孔主要为煤岩有机质中充填的黏土、碳酸盐或黄铁矿等无机矿物的晶间孔.有机孔是煤岩的主要孔隙类型,按成因又可划分为原生有机孔和次生有机孔两类.原生有机孔是煤岩沉积过程中自然形成的孔隙,包括木质素等植物组织在泥炭化过程中保留的细胞腔体形成的胞腔孔和植物碎屑间相互支撑形成的屑间孔,以屑间孔最为常见.胞腔孔镜下呈现边缘光滑、有序排列的椭圆状孔隙,孔隙间不连通,常被黏土矿物充填(图6);屑间孔无统一的形态,常呈现不规则的棱角状、半棱角状或似圆状等(陈佩元,1996),孔的大小一般小于碎屑(黄道军等,2025).次生孔隙主要包括煤岩热变质过程中形成的气孔和微裂隙.气孔镜下呈现孤立状边缘光滑的圆形或椭圆形,大小不一、连通性差,常成群出现,气孔群之间亦不连通.次生微裂隙边缘光滑,CT扫描显示裂缝宽度集中在5~7 μm区间,镜下微裂缝局部可见气体晕痕,表明微裂缝能有效沟通煤岩中的孔隙,游离气和部分解吸气可在其中运移和聚集(图7).

3.3.2　孔隙结构　8#煤孔隙尺度跨度大,按照IUPAC分类标准,其孔隙可划分为孔径<2 nm的微孔、孔径2~50 nm之间的介孔及孔径>50 nm的宏孔三类.目前对于不同孔径孔隙的表征方法不同,微孔通常利用CO_2吸附实验定量表征,介孔通常使用N_2吸附实验表征,宏孔和微裂隙通常采用高压压汞或CT扫描数据进行表征(张景缘等,2025).为了得到煤岩完整的孔隙结构参数,本次研究利用CT扫描图像分析和不同流体注入相结合的方式对8#煤开展全尺度孔隙结构定量表征.

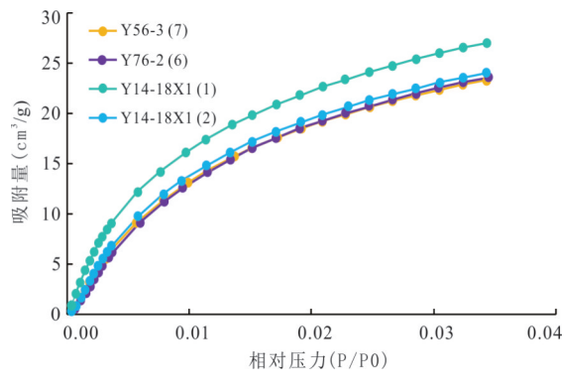

图8　研究区8#煤CO_2吸附曲线

Fig.8　CO_2 adsorption curve of the No.8 coal seam in the study area

(1)微孔特征.利用CO_2吸附实验定量表征小于2 nm孔径的分布特征.从样品CO_2吸附曲线可见(图8),在恒定温度条件下,吸附量与相对压力p/p_0明显正相关,曲线前半段斜率大,即当p/p_0小于0.01时,吸附量随压力变化迅速增加,当p/p_0大于0.01时,曲线斜率变换,即吸附量随压力变化缓慢增加.4个样品总吸附量在23.38~27.05 cm^3/g之间、平均吸附量为24.54 cm^3/g,计算微孔比表面积为189.53 m^2/g、微孔体积为0.064 8 cm^3/g(表4).对比同盆地不同热演化程度煤岩(黄道军等,2025),研究区8#煤热演化程度高,吸附量最大、比表面积和孔体积也最大(图9),说明煤变程度越高,微孔越发育,吸附能力越强.且随煤质由好变差,微孔比表面积和孔体积均大幅降低(图10),亮煤微孔比表面积为185.87 m^2/g、孔体积为0.065 2 cm^3/g,半亮煤微孔比表面积为169.08 m^2/g、孔体积为0.060 6 cm^3/g,半暗煤微孔比表面积为147.91 m^2/g、孔体积为0.053 9 cm^3/g,暗煤微孔比表面积为112.31 m^2/g、孔体积为0.041 8 cm^3/g.

表 4　研究区本溪组 8#煤岩 CO_2 吸附比表面积和孔体积

Table 4　CO_2 adsorption specific surface area and pore volume of the No.8 coal seam in the Benxi Formation, study area

序号	样品编号	比表面积			孔体积			样品宏观煤型
		Langmuir (m^2/g)	DFT PoreSize (m^2/g)	Dubinin-Astakhov (m^2/g)	Horvath-Kawazoe (cm^3/g)	DFT PoreSize (cm^3/g)	Dubinin-Astakhov (cm^3/g)	
1	Y56-3(7)	183.341 6	156.913 0	166.985 8	0.042 8	0.045 5	0.064 8	半亮煤
2	Y76-2(6)	219.226 0	157.887 0	166.533 8	0.043 3	0.046 8	0.064 6	光亮煤
3	Y14-18X1(1)	161.037 8	187.910 0	178.326 1	0.049 5	0.052 2	0.067 4	半亮煤
4	Y14-18X1(2)	194.506 3	161.554 0	162.989 0	0.044 1	0.047 2	0.062 4	半亮煤

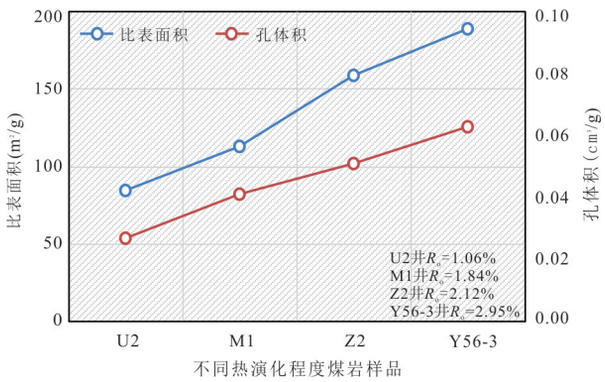

图 9　研究区本溪组 8#煤比表面与孔体积随热演化程度变化曲线

Fig.9　Curves of specific surface area and pore volume vs. thermal evolution degree for No. 8 coal seam in the Benxi Formation, study area

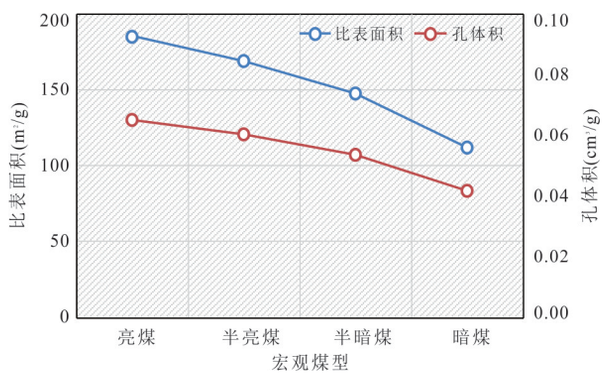

图 10　不同品质煤岩比表面积和孔体积变化曲线

Fig.10　Curves of specific surface area and pore volume variation for different quality coal samples

从孔体积随孔径变化曲线图可知（图 11），研究区 8#煤岩微孔孔径集中分布在 0.47～0.96 nm 之间，呈现“双峰式”分布特征，第一个主峰在 0.59 nm 附近，对应孔体积在 3.4×10^{-3} m^3/g、占比 47.93%；第二个主峰在 0.82 nm 附近，对应体积在 1.3×10^{-3} m^3/g、占比 23.61%.

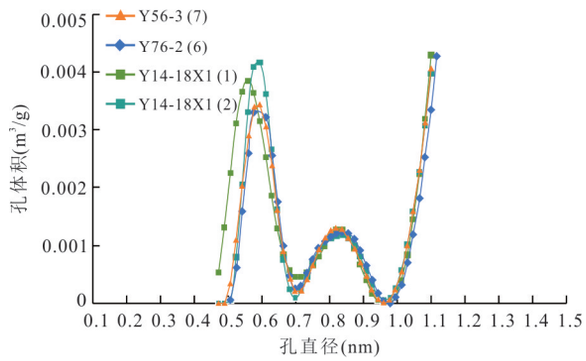

图 11　研究区 8#煤岩微孔孔径分布

Fig.11　Micropore size distribution of No.8 coal seam in the study area

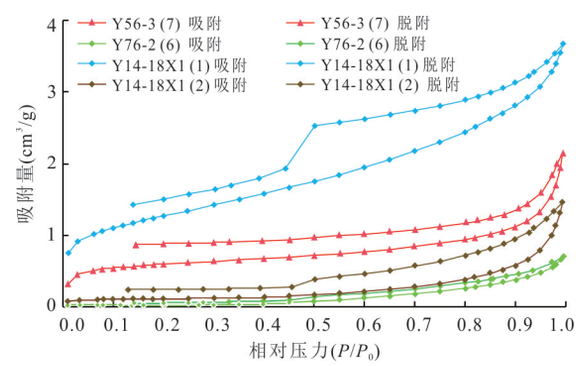

图 12　研究区 8#煤 N_2 吸附曲线

Fig.12　N_2 adsorption curve of the No. 8 coal seam in the study area

（2）介孔特征．利用 N_2 吸附实验定量表征 2～50 nm 区间孔径的分布特征．从吸附曲线看，吸附量随孔径增大呈现缓慢增长的趋势，但吸附量总体较低（图 12）．计算得到样品介孔比表面积为 0.1～4.5 m^2/g、平均为 1.75 m^2/g，孔体积为（1.1～4.7）$\times10^{-3}$ cm^3/g、平均为 2.3×10^{-3} cm^3/g（表 5）．可见介孔的比表面积和孔体积均远小于微孔，表明研究区 8#煤岩介孔不发育且吸附能力较弱．

表 5 研究区本溪组 8#煤岩 N_2 吸附比表面积和孔体积

Table 5 N_2 adsorption specific surface area and pore volume of the No.8 coal seam in the Benxi Formation, study area

序号	样品编号	比表面积（BET 法）(m^2/g)	微孔孔容（*t*-plot 法）(cm^3/g)	介孔孔容（BJH 法）(cm^3/g)	大孔孔容（BJH 法）(cm^3/g)
1	Y56-3(7)	2.0	0	0.001 852	0.001 028
2	Y76-2(6)	0.1	0.000 075	0.001 072	0.000 178
3	Y14-18X1(1)	4.5	0.000 236	0.004 747	0.000 476
4	Y14-18X1(2)	0.4	0.000 083	0.001 625	0.000 793

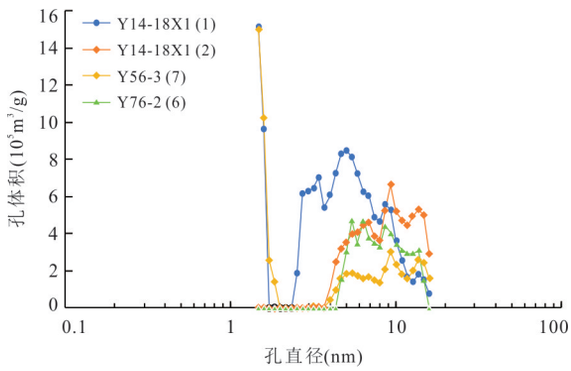

图 13 研究区 8#煤岩介孔孔径分布

Fig.13 Mesopores size distribution of No.8 coal seam in the study area

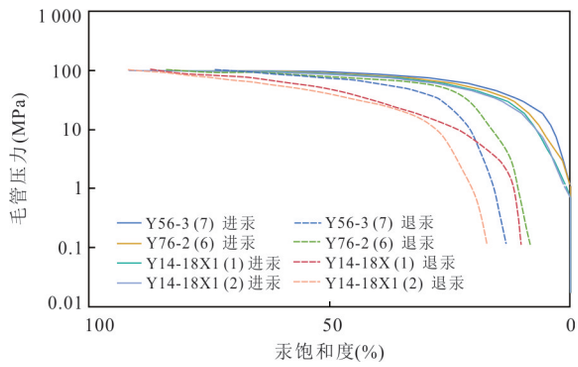

图 14 研究区 8#煤高压压汞曲线

Fig.14 High-pressure mercury injection curve of No.8 coal seam in the study area

从孔体积随孔径变化曲线图可知（图 13），研究区 8#煤岩介孔孔径集中分布在 2.52～15.94 nm 之间，呈现“单峰式”分布特征，孔体积平均为 7.3×10^{-4} cm^3/g，占比 84.36%.

（3）宏孔特征．利用高压压汞数据开展大于 50 nm 的宏孔和微裂隙定量表征．高压压汞曲线形态较为统一，均为近直立型（图 14），最大进汞饱和度分布在 73.7%～91.7%，平均为 84.0%，说明 8#煤具有较好的储集空间；退汞效率平均为 85.36%，煤岩孔喉连通性好，渗流能力较强，对渗透率占主要贡献的孔径集中分布于 400 nm 以上，说明微裂隙是主要渗流通道；排驱压力平均 1.79 MPa，中值压力平均 89.18 MPa，最大孔喉半径平均为 0.477 μm，中值半径平均为 0.008 μm，均值系数平均 12.90，均值系数较大，反映煤样宏孔与微裂隙系统发育，非均质性强．

（4）全尺度孔隙结构表征．利用 CO_2 吸附、N_2 吸附、高压压汞和 CT 扫描数据进行拼接，可以对从微孔到宏孔＋微裂隙的全尺度孔径孔隙结构进行定量表征．从孔体积随孔径变化曲线可以看出（图 15），孔体积呈现明显“U”形分布，即微孔及宏孔以上的孔隙体积最大，微孔孔体积 0.039 6 cm^3/g、占比 64.53%，宏孔以上孔体积 0.016 6 cm^3、占比 29.02%，介孔不发育，体积最小．表明研究区 8#煤的吸附空间几乎全由微孔提供，进而推断 8#煤深层煤层（岩）气的赋存状态还是以吸附气为主．取样井 Y14-18X1 为保压取心，依据《煤岩含气量测定 保压取心测气法》（T/CI267－2024）开展含气量测试，实测总含气量平均为 34.86 m^3/t，其中吸附气量（解吸气＋残余气）平均为 28.49 m^3/t、占比 81.73%，游离气量（保压气＋损失气）6.37 m^3/t、占比 18.27%.

4 聚煤环境分析

4.1 主量元素

研究区 8#煤岩煤灰成分中 SiO_2 含量最高，占灰分总量的 34.8%～66.2%、平均为 47.2%；其次为 Al_2O_3，占比 25.5%～45.0%、平均为 37.4%；其他主量元素氧化物含量较低，占比均小于 10%（表 6）．样品中 $SiO_2+Al_2O_3$ 占比与灰分产率和黏土矿物含量的变化趋势相近，表明煤岩灰分中 SiO_2 和 Al_2O_3 的主要来源为黏土矿物．

4.2 微量元素

附表 1 展示了研究区 8#煤岩微量元素测试结果，含量为（0.05～154.06）$\times10^{-6}$．其中 Cu、Ga、Cr、V、Li、Zr、Ba、Sr 等元素含量大于 10×10^{-6}，以 Zr、Ba、Sr 三种元素含量最高，分别为 95.05×10^{-6}、

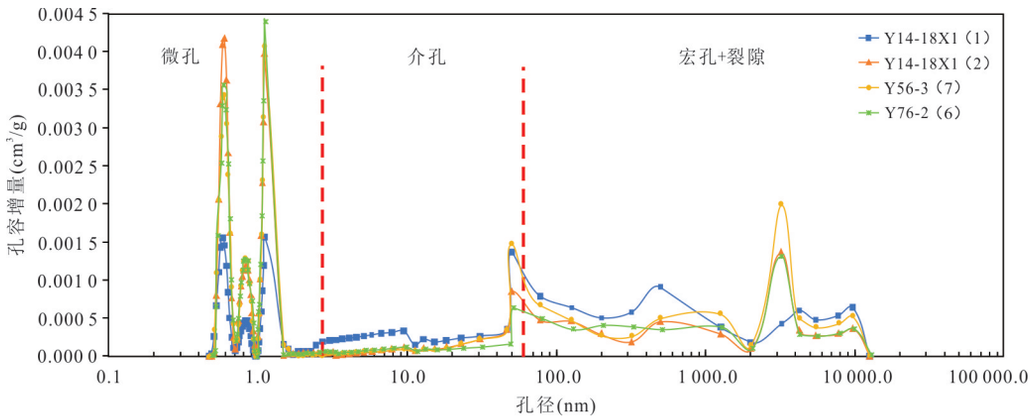

图 15　研究区 8#煤全孔径拼接孔容容量分布

Fig.15　Full pore size range integrated pore volume variation of No.8 coal seam in the study area

表 6　研究区本溪组 8#煤主量元素分析数据

Table 6　Major element analysis data of No. 8 coal seam in the Benxi Formation of the study area

样品编号	深度(m)	SiO_2(%)	TiO_2(%)	Al_2O_3(%)	TFe_2O_3(%)	MgO(%)	CaO(%)	Na_2O(%)	K_2O(%)
Y156-2(1)	2 239.31	52.10	1.12	25.49	3.64	0.56	15.97	0.56	0.56
Y156-2(2)	2 239.88	66.20	4.50	28.16	0.16	0.22	0.38	0.16	0.16
Y156-2(3)	2 241.32	44.21	0.78	30.30	15.08	0.65	7.93	0.39	0.52
Y156-2(4)	2 241.67	45.67	0.42	41.90	7.68	0.42	1.82	0.28	0.28
Y156-2(5)	2 242.62	50.83	2.52	44.19	0.94	0.41	0.23	0.18	0.67
Y156-2(6)	2 243.42	49.29	0.47	42.92	0.94	0.71	4.95	0.47	0.24
Y156-2(7)	2 244.17	48.37	2.48	43.76	0.25	0.35	4.16	0.15	0.45
Y39-1(1)	2 342.07	36.39	1.71	31.48	6.51	0.85	21.24	0.21	0.32
Y39-1(2)	2 343.28	40.96	0.49	36.02	0.85	0.92	15.61	0.21	0.42
Y39-1(3)	2 344.64	45.98	0.43	38.80	1.85	0.54	11.52	0.22	0.22
Y39-1(4)	2 345.58	49.48	0.57	44.72	0.38	0.57	3.62	0.19	0.19
Y39-1(5)	2 346.88	48.08	1.03	43.85	1.78	0.47	3.94	0.19	0.19
Y39-1(6)	2 347.23	34.79	0.42	32.50	24.40	0.73	5.71	0.21	0.31
Y23-1(1)	2 099.60	46.34	0.94	38.65	1.88	1.88	9.76	0.38	0.19
Y23-1(2)	2 101.71	51.71	2.54	26.54	0.29	1.85	16.68	0.20	0.20
Y23-1(3)	2 102.12	44.12	0.74	34.56	0.37	1.47	18.01	0.37	0.37
Y23-1(4)	2 102.67	51.70	0.82	36.61	3.27	1.40	4.80	0.70	0.70
Y23-1(5)	2 104.87	49.73	1.32	43.93	0.48	0.42	3.47	0.12	0.30
Y23-1(6)	2 106.17	50.40	4.15	43.83	0.12	0.35	0.81	0.12	0.17
Y76-2(1)	2 097.27	63.91	1.41	28.87	0.35	0.35	4.40	0.35	0.35
Y76-2(2)	2 097.61	53.46	0.45	38.93	0.79	0.79	4.43	0.68	0.45
Y76-2(3)	2 098.69	47.09	3.50	42.91	0.68	0.49	4.66	0.39	0.19
Y76-2(4)	2 099.74	45.60	0.28	42.19	6.11	0.57	3.27	0.28	0.28
Y76-2(5)	2 100.35	38.65	0.90	32.93	0.45	1.05	25.41	0.30	0.30
Y56-3(1)	2 334.99	51.06	0.56	42.68	1.45	0.56	3.24	0.11	0.34
Y56-3(2)	2 336.92	42.84	0.99	37.31	14.51	1.28	2.47	-	0.59
Y56-3(3)	2 337.85	39.49	0.59	34.63	20.58	0.49	3.84	0.11	0.27
Y56-3(4)	2 338.75	51.00	2.92	44.99	0.24	0.24	0.33	0.09	0.09
Y56-3(5)	2 339.00	36.48	0.69	31.55	19.33	0.37	10.99	0.05	0.37
Y56-3(6)	2 340.67	40.52	0.94	35.09	21.46	0.26	1.51	0.05	0.10
平均值		47.21	1.36	37.34	5.23	0.71	7.17	0.27	0.33

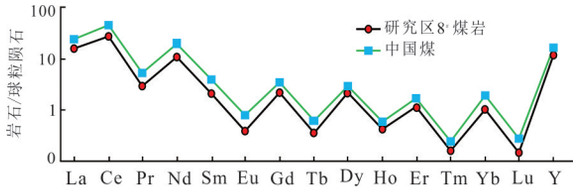

图 16　研究区 8#煤稀土元素分布模式图

Fig.16　Rare earth element distribution pattern diagram of No. 8 coal seam in the study area

121.58×10^{-6}和154.06×10^{-6};Co、Ni等亲铁元素含量相对较低,分别为1.82×10^{-6}、6.17×10^{-6}.相较于上地壳标准元素丰度,样品中U相对富集,含量为4.75×10^{-6}(UC标准值2.8×10^{-6});V、Ba、Ga、Sr等相对匮乏.

4.3　稀土元素

与中国煤岩稀土含量平均值(138.17×10^{-6})相比,研究区8#煤稀土元素总量相对较低(6.82×10^{-6}~350.59×10^{-6}、平均值为85.16×10^{-6}),且各元素含量均低于中国煤岩标准值,但分布模式基本一致(图16).样品中La等轻稀土元素总量为(4.02~310.17)×10^{-6}、平均值为64.02×10^{-6},Gd等重稀土元素总量(2.79~85.58)×10^{-6}、平均值为21.14×10^{-6}.为消除奇偶效应影响,利用球粒陨石对测试数据进行标准化后,绘制8#煤岩稀土元素分布模式图(图17).图17中各样品稀土元素分布模式基本一致,均呈现出明显右倾,且在Eu元素处出现V型特征,表明样品未受高温热液流影响.计算轻重稀土元素比(LREE/HREE)为0.35~20.31、平均值为3.41;分馏比值 La_N/Yb_N(15.22)>La_N/Sm_N(4.03)>Gd_N/Yb_N(1.84);δEu(0.58)表现出明显负异常;δCe(0.99)整体接近1.综上,样品中轻重稀土元素分馏明显,且轻稀土元素较重稀土元素分馏程度高,呈现轻稀土元素相对富集、重稀土元素相对亏损的富集特征.

4.4　聚煤环境分析

4.4.1　古气候分析　研究区位于华北板块,在早石炭世位于古赤道附近(北纬10°~20°),受古特提斯洋暖流影响,形成高温高湿的热带雨林气候.研究区8#煤化学蚀变指数(CIA)值介于55.8~98.9之间,平均为83.6,表明与无机物同源的源岩经历了强烈的化学风化作用,反映聚煤期古气候整体较为潮湿;煤岩UCC标准化后Sr/Cu值为0.099~62.015、平均为4.73,25个样品Sr/Cu值小于5、占比83.3%,3个样品Sr/Cu值在5~10之间、占比10%,2个样品Sr/Cu值大于10、占比6.7%(图17),也表明8#煤岩聚煤期整体为温暖潮湿气候.

4.4.2　古水体盐度　利用元素地球化学参数重建古盐度.微量元素Sr主要从海水咸化环境中直接沉淀而来,而Ba则极易被陆相黏土及细碎屑沉积物以吸附的形式富集(阳宏等,2021),因此可以用Sr/Ba值来判断古沉积环境和古水体盐度.通常认为海相咸水环境的Sr/Ba>1,陆相淡水环境的Sr/Ba<0.5.研究区8#煤Sr/Ba值为0.45~76.96、平均为7.84,其中Sr/Ba>1样品为27个、占比90%(图19).结果指示8#煤聚煤期水深较深且连通性差、水体盐度高,这与本溪末期潮坪-潟湖沉积背景一致.

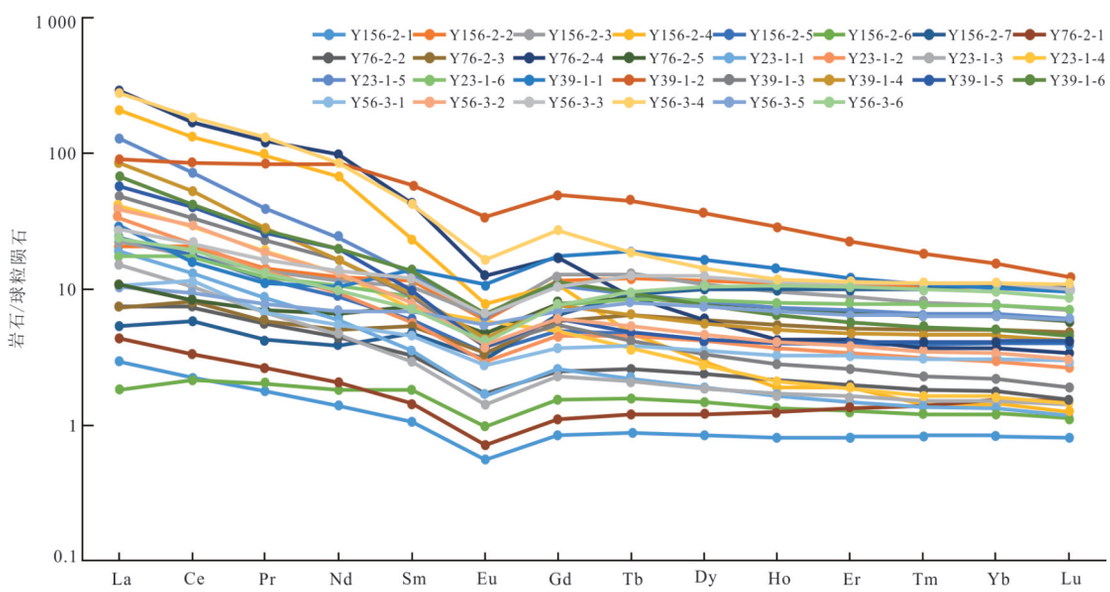

图 17　研究区 8#煤球粒陨石标准化后稀土元素配分模式图

Fig.17　Chondrite-normalized rare earth element distribution pattern diagram of No. 8 coal seam samples in the study area

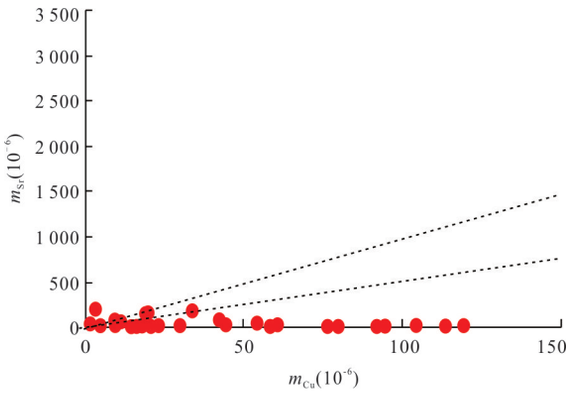

图 18　研究区 8#煤古气候判别图

Fig.18　Palaeoclimatic discrimination diagram for No. 8 coal seam in the study area

4.4.3　氧化-还原条件　在评估沉积环境氧化还原状态时，U/Th、V/Cr、V/(V+Ni)及 Ni/Co 等是常见的地球化学指标．本研究选取 V/(V+Ni)比值，用以反演 8#煤层聚煤期的氧化还原条件．经上地壳平均值标准化后，研究区该煤层的 V/(V+Ni)比值在 0.17～0.98 之间，平均值为 0.58．根据该比值的判别标准：小于 0.46 指示富氧环境，0.46 至 0.54 之间指示贫氧环境，0.54 至 0.83 之间指示厌氧环境，大于 0.83 则指示封闭还原环境（马文娟等，2022；赵凌云等，2023）．分析结果显示，研究区整体处于厌氧环境（图 20）．从平面分布来看，研究区东北部的 V/(V+Ni)比值普遍高于 0.6．其中中部的 Y23-1 井该值为 0.61，西南部的 Y39-1 井和 Y56-3 井分别为 0.35 和 0.60．这一分布特征表明，从西南向东北方向，古水体深度增加，还原性逐渐增强而氧化性相应减弱．该变化趋势与聚煤期西南部地势较高、东北部地势较低的古地貌格局相吻合．

4.4.4　煤相分析　通过亚显微组分数据计算可得到研究区 8#煤岩样品的 *TPI* 和 *GI* 参数，并编制 *TPI*-*GI* 相图（图 21）．研究区 8#煤主体成煤环境为覆水森林沼泽和深水芦苇沼泽相，其中中部 Y23-1 井和南部的 Y39-1 井样品 *TPI* 主体大于 1，反映成煤植物结构保存较好；靠近北部的 Y156-2 井 *TPI* 主体小于 1，表明成煤植物以草本为主．8#煤岩 *GI* 指数主体大于 5，反映成煤期水体较深，有利于凝胶化作用形成品质较好的亮煤-半亮煤．

4.4.5　优质煤发育区预测　开展“聚煤环境-煤岩类型-孔隙结构”的耦合分析，预测优质煤岩发育区．平面上，研究区中部和西南部 Y56-3、Y39-1、Y23-1 井区古地貌相对较高，沼泽水体相对较浅、盐度较低，成煤植物以大型木本植物为主，但受陆源碎屑

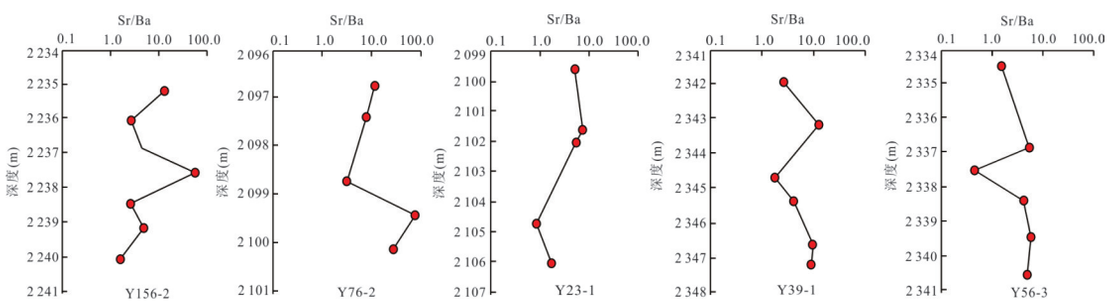

图 19　研究区 8#煤古盐度剖面

Fig.19　Palaeosalinity profile of the No. 8 coal seam in the study area

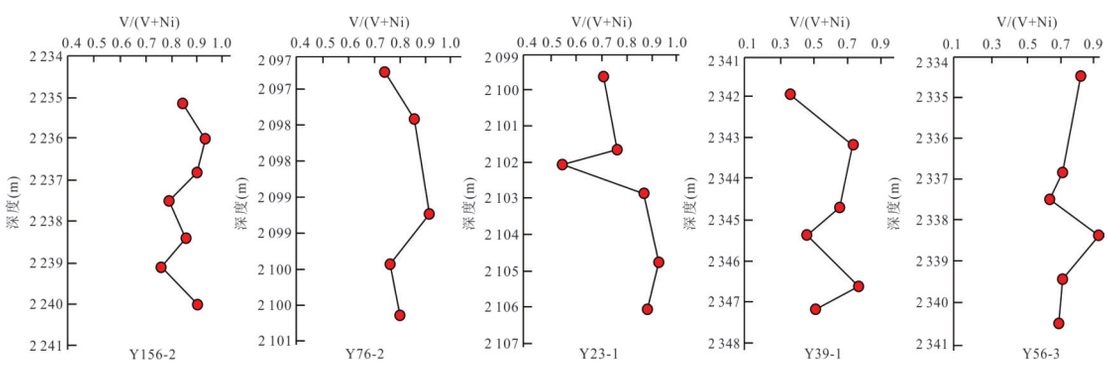

图 20　研究区 8#煤氧化还原条件剖面

Fig.20　Redox conditions profile of the No. 8 coal seam in the study area

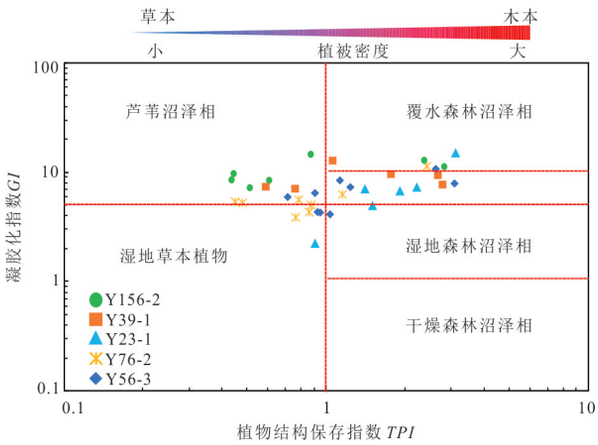

图 21　研究区 8#煤 *TPI-GI* 相图

Fig.21　Phase diagram of *TPI-GI* of No. 8 coal seam in the study area

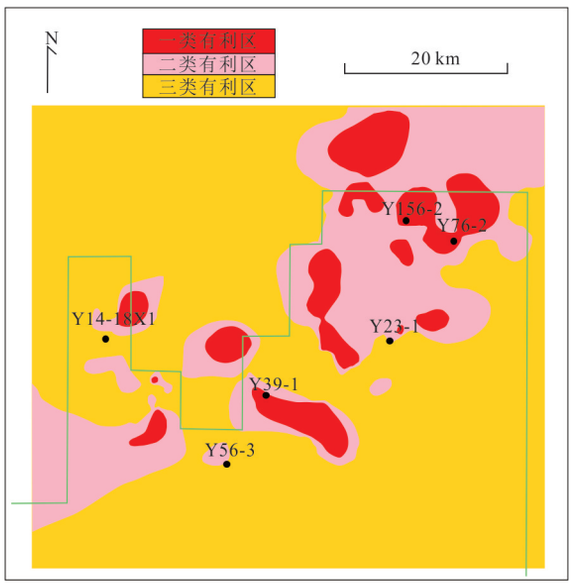

图 22　研究区本溪组 8#煤勘探有利区预测图

Fig.22　Prediction map of favorable areas for No. 8 coal seam exploration in the Benxi Formation of the study area

影响较大，水体封闭性和还原条件略低，形成的煤岩以半亮煤为主，灰分较高且夹矸发育，Y56-3井测试总比表面积 185.341 6 m^2/g、总孔容 0.051 1 cm^3/g. 研究区北部Y156-2、Y76-2井区古地貌较西南部低，沼泽水体相对较深、盐度略高，主要发育深水草本植物，水体封闭性和还原性更好，凝胶化作用更强，形成煤岩以光亮煤为主，厚度更大、灰分低且夹矸不发育，Y76-2井测试总比表面积 219.326 m^2/g、总孔容 0.054 6 cm^3/g，吸附能力较西南部更强，储集空间也相对更为发育，更有利于气体的富集和高产. 北部 Y156-2 井实测含气量 32.86 m^3/t、Y76-2 井实测含气量 28.79 m^3/t，Y156-2 投产后阶段日产气 $1.3\times10^4 m^3/d$，均要高于南部 Y39-1 井（含气量 27.73 m^3/t、日产气 $1.1\times10^4 m^3/d$）和 Y56-3 井（含气量 25.99 m^3/t、日产气 $0.92\times10^4 m^3/d$）. 在“聚煤环境-煤岩类型-孔隙结构”的耦合分析基础上，结合煤岩厚度、含气量、产能等指标，对研究区开展勘探潜力综合评价. 研究区北部聚煤环境更好，形成宏观煤岩类型以原生结构光亮煤、半亮煤为主，具有更好孔隙结构（宏孔-微裂隙更为发育），更有利于深层煤层（岩）气的富集，试气产量更高，总评价为下步勘探开发的有利区带（图 22）.

5　结论

（1）研究区本溪组 8#煤岩煤质较好，以原生结构亮煤-半亮煤为主；靠近盆地生烃中心，热演化程度高（R_o>2.9%）；显微组分中镜质组含量最高，平均占比为 80.5%；工业分析显示平均灰分产率为 13.29%，整体为中-低灰煤，煤岩品质在纵向上具有显著差异性，优质煤岩集中发育在煤层中上部.

（2）研究区 8#煤岩孔隙结构复杂、非均质性强. 8#煤发育孔-缝双重孔隙介质，次生有机质气孔占比最高；裂隙较发育，微裂缝局部可见气体晕痕，表明其能有效沟通煤岩中的微小孔隙，游离气和部分解吸气可在其中运移和聚集. 利用 CT 扫描图像分析和不同流体注入相结合的方式对 8#煤开展全尺度孔隙结构定量表征，8#煤孔体积呈现明显“U”形分布，即微孔及宏孔以上的孔隙体积最大，微孔孔体积 0.039 6 cm^3/g、占比 64.53%，宏孔以上孔体积 0.016 6 cm^3/g、占比 29.02%，介孔不发育，体积最小，煤岩比表面积几乎全由微孔提供，是吸附气赋存的主要空间.

（3）利用元素地球化学参数，开展聚煤环境-煤岩类型-孔隙结构的耦合分析. 研究区中部和西南部古地貌相对较高，沼泽水体相对较浅、盐度较低，封闭性和还原条件略低，形成以半亮煤为主的中-高灰煤，且夹矸发育；研究区北部古地貌较西南部低，沼泽水体相对较深、盐度略高，封闭性和还原性更好，凝胶化作用更强，形成低灰分、薄夹矸的光亮煤，煤岩宏观煤型更好、孔隙结构更优，实钻测试含气量及产量更好. 因此研究区北部是下步勘探开发的有利区带.

附表见https://doi.org/10.3799/dqkx.2026.162.

References

Chen, P.Y., Sun, D.S., Ding, P.X., et al., 1996. Atlas of Coal Petrology in China. China Coal Industry Publishing House, Beijing (in Chinese).

Chen, S.D., Tang, D.Z., Hou, W., et al., 2023. Geological Particularity and Reservoir Engineering Response of Deep Coalbed Methane. *Acta Petrolei Sinica*, 44(11): 1993—2006 (in Chinese with English abstract).

Deng, Z., Wang, H. Y., Jiang, Z. X., et al., 2024. Influence of Deep Coal Pore and Fracture Structure on Occurrence of Coalbed Methane: A Case Study of Daning-Jixian Block in Eastern Margin of Ordos Basin. *Coal Science and Technology*, 52(8): 106—123 (in Chinese with English abstract).

Fan, L.Y., Shi, Y.H., Dong, G.D., et al., 2024. Geochemical Characteristics and Coal-Forming Environments of Deep Coal Rocks of Permian Shanxi Formation in Central and Eastern Ordos Basin. *Natural Gas Industry*, 44(10): 113—125 (in Chinese with English abstract).

Huang, D. J., Xu, H., Hu, J. L., et al., 2025. Pore Development Patterns and Gas Control Effects of No.8 Deep Coal Seam of Ordos Basin. *Coal Science and Technology*, 53(3): 115—123 (in Chinese with English abstract).

Jiao, F.Z., Zhao, Q., Xiao, Y.H., et al., 2025. A Major Transformation from Coalbed Methane to Coal-Rock Gas Leading the "Coal-Rock Gas Revolution". *Acta Petrolei Sinica*, 46(12): 2211—2225 (in Chinese with English abstract).

Johnson, R. C., Flores, R. M., 1998. Developmental Geology of Coalbed Methane from Shallow to Deep in Rocky Mountain Basins and in Cook Inlet-Matanuska Basin, Alaska, U.S.A. and Canada. *International Journal of Coal Geology*, 35(1—4): 241—282. https://doi.org/10.1016/S0166-5162(97)00016-5

Liu, H. L., Zou, C. N., Deng, Z., et al., 2026. Pore Characteristics and Coalbed Gas Reservoir Formation Characteristics of Coal Reservoir of No. 8 Coal Seam in Well Suide 1H, Ordos Basin. *Earth Science*, 51(1): 284—302 (in Chinese with English abstract).

Liu, H. L., Zou, C. N., Yin, S., et al., 2024. Formation, Distribution, Sweet Spot Evaluation and Development Prospect of Coal-Measure Gas in China. *Natural Gas Industry*, 44(10): 1—21 (in Chinese with English abstract).

Luo, P.Y., Zhu, S.Y., 2023. Theoretical and Technical Fundamentals of a 100 Billion-Cubic-Meter-Scale Large Industry of Coalbed Methane in China. *Acta Petrolei Sinica*, 44(11): 1755—1763 (in Chinese with English abstract).

Ma, W. J., 2022. Accumulation Conditions and Favorable Exploration Areas Prediction of Lowrank Coalbed Methane in Member K1d2 of Huhehu Sag in Hailar Basin. *Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing*, 41(1): 33—40 (in Chinese with English abstract).

Niu, X.B., Fan, L.Y., Yan, X.X., et al., 2024. Enrichment Conditions and Resource Potential of Coal-Rock Gas in Ordos Basin, NW China. *Petroleum Exploration and Development*, 51(5): 972—985 (in Chinese with English abstract).

Peng, Z. X., Yu, X. H., Li, S. L., et al., 2023. Migration Patterns and Controlling Factors of Barrier of the Benxi Formation in Southeastern Ordos Basin. *Journal of Palaeogeography*, 25(6): 1330—1346 (in Chinese with English abstract).

Qin, Y., 2023. Progress on Geological Research of Deep Coalbed Methane in China. *Acta Petrolei Sinica*, 44(11): 1791—1811 (in Chinese with English abstract).

Qin, Y., Yuan, L., Hu, Q. T., et al., 2012. Status and Development Orientation of Coalbed Methane Exploration and Development Technology in China. *Coal Science and Technology*, 40(10): 1—6 (in Chinese with English abstract).

Ren, Z. L., Qi, K., Li, J. B., et al., 2021. Thermodynamic Evolution and Hydrocarbon Accumulation in the Ordos Basin. *Oil & Gas Geology*, 42(5): 1030—1042 (in Chinese with English abstract).

Shan, J. F., Wu, B. W., Jin, K., et al., 2022. Characteristics of Upper Paleozoic Reservoirs and Its Influence on Natural Gas Accumulation in Yichuan-Huanglong Area, Ordos Basin. *Special Oil & Gas Reservoirs*, 29(6): 29—38 (in Chinese with English abstract).

Shi, J. T., Cao, J. T., Xu, F. Y., et al., 2024. A Calculation Model of Free Gas Saturation in Deep Coalbed Methane Reservoirs and Its Application. *Coal Geology & Exploration*, 52(2): 134—146 (in Chinese with English abstract).

Xie, Y. G., Meng, S. Z., Wan, H., et al., 2015. Analysis on Geological Conditions of Multi Type Natural Gas Reservoir in Coal Measure Strata of Linxing Area. *Coal Science and Technology*, 43(9): 71—75, 143 (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. *Petroleum Exploration and Development*, 50(4): 669—682 (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. *China Offshore Oil and Gas*, 34(4): 30—42 (in Chinese with English abstract).

Xu, H., Tang, D. Z., Tao, S., et al., 2024. Differences

in Geological Conditions of Deep and Shallow Coalbed Methane and Their Formation Mechanisms. *Coal Geology & Exploration*, 52(2): 33－39 (in Chinese with English abstract).

Yang, H., Liu, C. L., Wang, F. L., et al., 2021. Paleoenvironment and Development Model of Source Rocks of Dongying Formation in Bozhong Sag. *Lithologic Reservoirs*, 33(6): 81－92 (in Chinese with English abstract).

Zhang, J. F., Bi, C.Q., Tang, D.Z., et al., 2020. Research and Practice of Coalbed Methane Exploration and Development in China. Geological Publishing House, Beijing (in Chinese).

Zhang, J. Y., Shi, X. W., Tian, C., et al., 2025. Multi-Scale Pore Structure of the Deep Coal-Rock Gas Reservoir in the Longtan Formation in the Central Sichuan Basin. *Natural Gas Geoscience*, 36(9): 1646－1660 (in Chinese with English abstract).

Zhao, L. Y., Guo, Z. J., Han, S. J., et al., 2023. Coal Quality Characteristics and Sedimentary Environment Indication of the Longtan Formation in the Yina Area of Zhijin County, Guizhou Province. *Geology and Exploration*, 59(5): 974－984 (in Chinese with English abstract).

Zhao, Z., Yang, W., Zhao, Z. Y., et al., 2024. Research Progresses in Geological Theory and Key Exploration Areas of Coal-Formed Gas in China. *Petroleum Exploration and Development*, 51(6): 1240－1253 (in Chinese with English abstract).

中文参考文献

陈佩元，孙达三，丁丕训，等，1996. 中国煤岩图鉴. 北京：煤炭工业出版社.

陈世达，汤达祯，侯伟，等，2023. 深部煤层气地质条件特殊性与储层工程响应. 石油学报，44(11): 1993－2006.

邓泽，王红岩，姜振学，等，2024. 深部煤储层孔裂隙结构对煤层气赋存的影响：以鄂尔多斯盆地东缘大宁-吉县区块为例. 煤炭科学技术，52(8): 106－123.

范立勇，史云鹤，董国栋，等，2024. 鄂尔多斯盆地中东部二叠系山西组深层煤岩地球化学特征及成煤环境. 天然气工业，44(10)：113－125.

黄道军，许浩，虎建玲，等，2025. 鄂尔多斯盆地深部8号煤储层孔隙发育模式及其控气作用. 煤炭科学技术，53(3): 115－123.

焦方正，赵群，肖宇航，等，2025. 煤层气到煤岩气的“蝶变”引领“煤岩气革命”. 石油学报，46(12): 2211－2225.

刘翰林，邹才能，邓泽，等，2026. 鄂尔多斯盆地绥德1H井8#煤储层孔隙特征及煤岩气成藏特征. 地球科学，51(1): 284－302.

刘翰林，邹才能，尹帅，等，2024. 中国煤系气形成分布、甜点评价与展望. 天然气工业，44(10): 1－21.

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

马文娟，2022. 海拉尔盆地呼和湖凹陷大二段低煤阶煤层气成藏条件及有利勘探区预测. 大庆石油地质与开发，41(1): 33－40.

牛小兵，范立勇，闫小雄，等，2024. 鄂尔多斯盆地煤岩气富集条件及资源潜力. 石油勘探与开发，51(5)：972－985.

彭子霄，于兴河，李顺利，等，2023. 鄂尔多斯盆地东南部本溪组障壁迁移样式及控制因素. 古地理学报，25(6): 1330－1346.

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

秦勇，袁亮，胡千庭，等，2012. 我国煤层气勘探与开发技术现状及发展方向. 煤炭科学技术，40(10): 1－6.

任战利，祁凯，李进步，等，2021. 鄂尔多斯盆地热动力演化史及其对油气成藏与富集的控制作用. 石油与天然气地质，42(5): 1030－1042.

石军太，曹敬添，徐凤银，等，2024. 深部煤层气游离气饱和度计算模型及其应用. 煤田地质与勘探，52(2): 134－146.

单俊峰，吴炳伟，金科，等，2022. 鄂尔多斯盆地宜川-黄龙地区上古生界储层特征及其对天然气成藏的影响. 特种油气藏，29(6): 29－38.

谢英刚，孟尚志，万欢，等，2015. 临兴地区煤系地层多类型天然气储层地质条件分析. 煤炭科学技术，43(9): 71－75, 143.

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

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. 中国海上油气，34(4): 30－42.

许浩，汤达祯，陶树，等，2024. 深、浅部煤层气地质条件差异性及其形成机制. 煤田地质与勘探，52(2): 33－39.

阳宏，刘成林，王飞龙，等，2021. 渤中凹陷东营组古沉积环境及烃源岩发育模式. 岩性油气藏，33(6): 81－92.

张君峰，毕彩芹，汤达祯，等，2020. 中国煤层气勘探开发探索与实践. 北京：地质出版社.

张景缘，石学文，田冲，等，2025. 川中地区二叠系龙潭组深层煤岩气储层多尺度孔隙结构表征. 天然气地球科学，36(9): 1646－1660.

赵凌云，郭志军，韩思杰，等，2023. 贵州织金县以那地区龙潭组煤质特征及其沉积环境指示. 地质与勘探，59(5): 974－984.

赵喆，杨威，赵振宇，等，2024. 中国煤成气地质理论研究进展与重点勘探领域. 石油勘探与开发，51(6): 1240－1253.