



煤层微观孔隙特征及沉积环境对孔隙结构的控制作用

赵伟波 刘洪林 王怀厂 刘德勋 李晓波

引用本文:

赵伟波, 刘洪林, 王怀厂, 等. 煤层微观孔隙特征及沉积环境对孔隙结构的控制作用[J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(6): 142–154.

ZHAO Weibo, LIU Honglin, WANG Huaichang. Microscopic pore characteristics of coal seam and the controlling effect of sedimentary environment on pore structure in No.8 coal seam of the Ordos Basin[J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(6): 142–154.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12438/cst.2023-1112>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于原子力显微镜观测的煤中显微组分微观形貌与孔隙结构

Micro morphology and pore structure of macerals in coal observed by atomic force microscopy (AFM)

煤炭科学技术. 2023, 51(4): 127–132 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2021-0803>

不同煤体结构煤的孔隙结构分形特征及其研究意义

Fractal characteristics of pore structures on different coal structures and its research significance

煤炭科学技术. 2023, 51(10): 198–206 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2022-1867>

沁水盆地中南部太原组煤系页岩孔隙结构特征

Pore structure characteristics of Taiyuan Formation coal measure shale in south central Qinshui Basin

煤炭科学技术. 2021, 49(9): 184–192 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/24e9c1de-0717-45e7-a086-2db58bcf930c>

煤、页岩和砂岩孔隙结构差异性及其对甲烷吸附的影响研究

Research on differences in pore structures of coal, shale and sandstone and their effects on methane adsorption

煤炭科学技术. 2022, 50(5) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/8bec0a83-45a1-49ca-8c01-78a9eb287527>

榆社—武乡区块煤储层孔隙结构特征及其影响因素

Analysis on pore structure characteristics and influencing factors of coal reservoir in Yushe–Wuxiang Block

煤炭科学技术. 2019(7) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/b6e8bd51-7ea3-4ad9-85b5-ed6a81ff1155>

不同变质程度煤孔隙结构分形特征对瓦斯吸附性影响

Fractal characteristics of pore structure of coal with different metamorphic degrees and its effect on gas adsorption characteristics

煤炭科学技术. 2020, 48(2) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/c30988c8-404a-42aa-9840-047813302665>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

地球科学与工程



移动扫码阅读

赵伟波, 刘洪林, 王怀厂, 等. 煤层微观孔隙特征及沉积环境对孔隙结构的控制作用——以鄂尔多斯盆地 8 号煤层为例[J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(6): 142–154.

ZHAO Weibo, LIU Honglin, WANG Huaichang, *et al.* Microscopic pore characteristics of coal seam and the controlling effect of sedimentary environment on pore structure in No.8 coal seam of the Ordos Basin[J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(6): 142–154.

煤层微观孔隙特征及沉积环境对孔隙结构的控制作用

——以鄂尔多斯盆地 8 号煤层为例

赵伟波¹, 刘洪林^{2,3,4}, 王怀厂¹, 刘德勋^{2,3,4}, 李晓波^{2,3,4}

(1. 中国石油长庆油田勘探开发研究院, 陕西 西安 710021; 2. 中国石油非常规油气重点实验室, 北京 100083; 3. 国家能源页岩气研发(实验)中心, 河北 廊坊 065007; 4. 中国石油勘探开发研究院, 北京 100083)

摘要: 寻找深部煤层气资源分布, 亟待查明深部煤储层沉积环境和孔隙分布特征。为此, 在开展鄂尔多斯盆地煤岩显微组分、核磁共振孔隙和电镜分析的基础上, 查明了煤岩显微组分和孔隙分布特征, 评价了鄂尔多斯盆地 8 号煤的煤沉积环境和孔隙结构特征之间的关系。结果表明: ①研究区 8 煤层煤岩有机显微组分以镜质组为主, 成煤早期植物类型应主要为木本植物, 后期随着覆水程度增大而逐渐转变为木本+草本混生植物为主; ②本溪期 8 号煤由早期为湿地森林沼泽逐步演化为后期开阔水域沼泽, 沼泽水体相对滞留, 沼泽环境稳定, 利于有机质富集和煤层结构稳定; ③研究区 8 煤大孔占比与结构保存指数(TPI)两者呈正相关, 而与凝胶化指数(GI)呈负相关; ④基质镜质体发育密集气孔群或稀疏带状气孔群, 团块镜质体中发育少量气孔, 结构镜质体中发育原始组织孔, 多为矿物充填, 均质镜质体气孔不发育。研究认为榆林地区煤层孔隙分布受到煤沉积环境和显微组分控制, 开阔水域沼泽相的煤层孔隙结构呈现三峰, 其中微孔和大孔发育最好, 湿地森林沼泽相煤层孔隙结构呈现双峰, 微孔发育好, 大孔发育较差。

关键词: 深部煤层气; 煤相; 孔隙结构; 煤岩显微组分; 鄂尔多斯盆地

中图分类号: TE155

文献标志码: A

文章编号: 0253-2336(2024)06-0142-13

Microscopic pore characteristics of coal seam and the controlling effect of sedimentary environment on pore structure in No.8 coal seam of the Ordos Basin

ZHAO Weibo¹, LIU Honglin^{2,3,4}, WANG Huaichang¹, LIU Dexun^{2,3,4}, LI Xiaobo^{2,3,4}

(1. PetroChina Changqing Oilfield Exploration and Development Research Institute, Xi'an 710021, China; 2. Key Laboratory of Unconventional Oil and Gas of PetroChina, Beijing 100083, China; 3. National Energy Shale Gas Research and Development (Experiment) Center, Langfang 065007, China; 4. China Petroleum Exploration and Development Research Institute, Beijing 100083, China)

Abstract: To accurately evaluate the distribution and potential of deep coalbed methane resources, it is critical to identify the coal sedimentary and pore distribution characteristics of deep coal reservoirs. Therefore, based on the analysis of coal macerals, nuclear magnetic resonance porosity, and electron microscopy, the characteristics of coal macerals and pore distribution in the Yulin area were identified, as well as the relationship between the coal sedimentary and pore structure characteristics of No.8 coal was evaluated. The results indicated that: ① The organic macerals of No.8 coal seam in the study area were predominantly composed of vitrinite, indicating a predominance of woody plants during the early stages of coal formation. As the degree of water cover increases, it gradually transitions into a mixture of

收稿日期: 2023-07-30

责任编辑: 宫在芹

DOI: 10.12438/cst.2023-1112

基金项目: 中国石油集团公司攻关性应用性科技专项资助项目(2023ZZ18)

作者简介: 赵伟波(1982—), 河北昌黎人, 高级工程师, 博士。E-mail: zhaowb_cq@petrochina.com.cn

通讯作者: 刘洪林(1973—), 山东鱼台人, 高级工程师, 博士。E-mail: liuhonglin69@petrochina.com.cn

woody and herbaceous plants. ② During the Benxi period, No. 8 coal evolved from an early wetland forest swamp to a later open water swamp with stagnant swamp water, creating a stable environment conducive to organic matter enrichment and coal seam stability. ③ The proportion of macropores in No.8 coal seam was negatively correlated with the structure preservation index (TPI), while it was positively correlated with the gel index (GI). ④ Matrix vitrinite developed dense or sparse banded pores, mass vitrinite developed few pores, and the structure vitrinite developed original tissue pores, mostly filled with minerals, while the homogeneous vitrinite did not develop pores. In conclusion, pore distribution in Yulin's coal seams was controlled by sedimentation and macerals. The pore structure of coal seams in the open water swamp sedimentary presented three peaks, with micropores and macropores developing best, which can simultaneously enrich free gas and adsorbed gas. The pore structure of coal seams in the wetland forest swamp sedimentary presented two peaks, with micropores developing well and macropores developing poorly, mainly enriching adsorbed gas.

Key words: deep coalbed methane; coal sedimentary; pore structure; coal macerals; Ordos basin

0 引 言

随着煤层气勘探开发不断向深部延伸,位于大型盆地的深部煤层气资源逐步进入勘探开发视野。2019 年以来,中国石油在大宁—吉县区块埋深大于 2 000 m 的深部煤层气勘探获得突破,吉深 6-7 平 01 井获得日产 $10 \times 10^4 \text{ m}^3$ 工业气流,2021 年准噶尔盆地白家海凸起彩探 1H 井获最高日产气 $5.7 \times 10^4 \text{ m}^3$,2022 年以来大宁—吉县多口煤层气深井 8 号煤层经过水平井分段体积改造获得日产 $10 \times 10^4 \text{ m}^3$ 以上的产量^[1]。深部煤层气开发不断获得突破,进一步提升了我国煤层气资源规模和开发前景。2023 年长庆油田钻探的 M172 井采用保压取心含气量测试方法,实测游离气占比可达 35.29%,这与中浅层吸附气为主的煤层气赋存状态有着明显差异。国内外学者对深部煤层气地质特征及开发思路开展了相关研究,秦勇等^[2]认为控制深部叠置煤层含气系统的关键条件是储层流体能量和力学性质、孔渗差异。申建等^[3-4]认为在超过煤层埋深的临界深度后出现含气量随埋深增大而降低的异常现象。何发岐等^[5-6]认为 2 000 m 以深的煤层气勘探潜力巨大,深部煤层中以圈闭形式赋存原地游离气。陈贞龙^[7]提出了“沉积控煤、构造控藏、水动力控气、地应力控缝、物性控产”的深部煤层气成藏富集的协同控制理论。在深部煤层气开发方面,国内学者提出以“大排量、大液量、大砂量”为核心的压裂技术^[8],徐凤银等^[1]提出了深部煤层气开发需要加强地质工程甜点定量评价、水平井优快钻完井、大规模体积缝网改造等关键技术研究。国内学者研究认为,煤层孔隙结构特征是影响中浅层煤层气赋存和开发效果的重要因素,但是深部游离气赋存的储层孔隙形成条件和控制因素尚不是完全清楚^[9-12]。国内外研究发现,煤相是控制煤储层孔隙发育特征的重要因素,煤相反映了水动力环境条件、水体含氧条件等环境地质因素^[13]。由于煤相对

煤层含气性高低和孔隙形成有较大影响,可以用煤相指数表征成煤沼泽环境,如凝胶化指数 (GI) 和结构保存指数 (TPI) 用于判别成煤沼泽环境^[14],搬运指数 (TI) 用于判别水体活跃强度^[15],地下水流动指数 (GWI) 反映覆水深浅,植被指数 (VI) 表示木本与草本亲源比率^[16],镜惰比 (V/I) 用于判别泥炭坪的氧化程度^[17]。如延川南 2 号煤层煤相与含气量一致性较好,高镜惰比和低灰分煤层具有较高的含气量^[18];韩城矿区干燥森林沼泽成煤环境形成的光亮煤发育一端封闭的 I 型孔,半暗煤发育 II 型开放孔,暗淡煤发育 III 型墨水瓶孔^[19];鄂尔多斯盆地东部榆神府矿区富油煤沼泽主要以湿地草本和干燥森林沼泽相为主,水动力较弱,TPI 煤相特征控制着大孔发育状况^[20]。

根据前人研究可以看出,开展煤相研究对于查明煤层孔隙结构特征具有重要作用,进而根据孔隙发育规律开展富集区预测,从而对于煤层气地质评价与有利区优选具有重要地质意义。但是目前国内由于深部煤层气钻井及相关资料缺乏,针对深部煤层气孔隙结构和煤相研究工作很少。笔者以鄂尔多斯盆地榆林地区最新深部钻井 M172 等井为例,以 8 号煤为主要研究对象,5 号、6 号、7 号煤层为辅助,开展核磁共振分析、煤岩显微组分定量分析、双束电镜孔隙观测等相关试验,分析煤相对煤孔隙结构的控制作用,探讨了成煤沼泽环境与煤孔隙结构特征关系,为探索深部煤层气富集规律和寻找游离气富集区提供了借鉴和参考。

1 研究区地质概况

研究区位于山西省和陕西省境内,北至神木、南至韩城,西邻榆林—延安,构造上位于鄂尔多斯盆地伊陕斜坡东部(图 1a),为走向 NNE、向 NW 缓倾的单斜构造^[21],区内断裂稀少。研究区自下而上发育的沉积地层包括:奥陶系马家沟组、石炭系本溪组以

及二叠系太原组、山西组、石盒子组和石千峰组,其中山西组发育5号煤层,太原组发育6号、7号煤层、本溪组发育8号煤层,厚度2~22 m,煤层埋深呈现东高西低特征,为2 000~3 200 m,钻探有煤层气取

心资料井 M172、J26、Y160 等多口深部煤层气井(图 1b),目的层均为本溪组 8 号煤层,这些井皆为长庆油田最近 2 a 钻探完成,并在煤层段进行取心和分析测试。

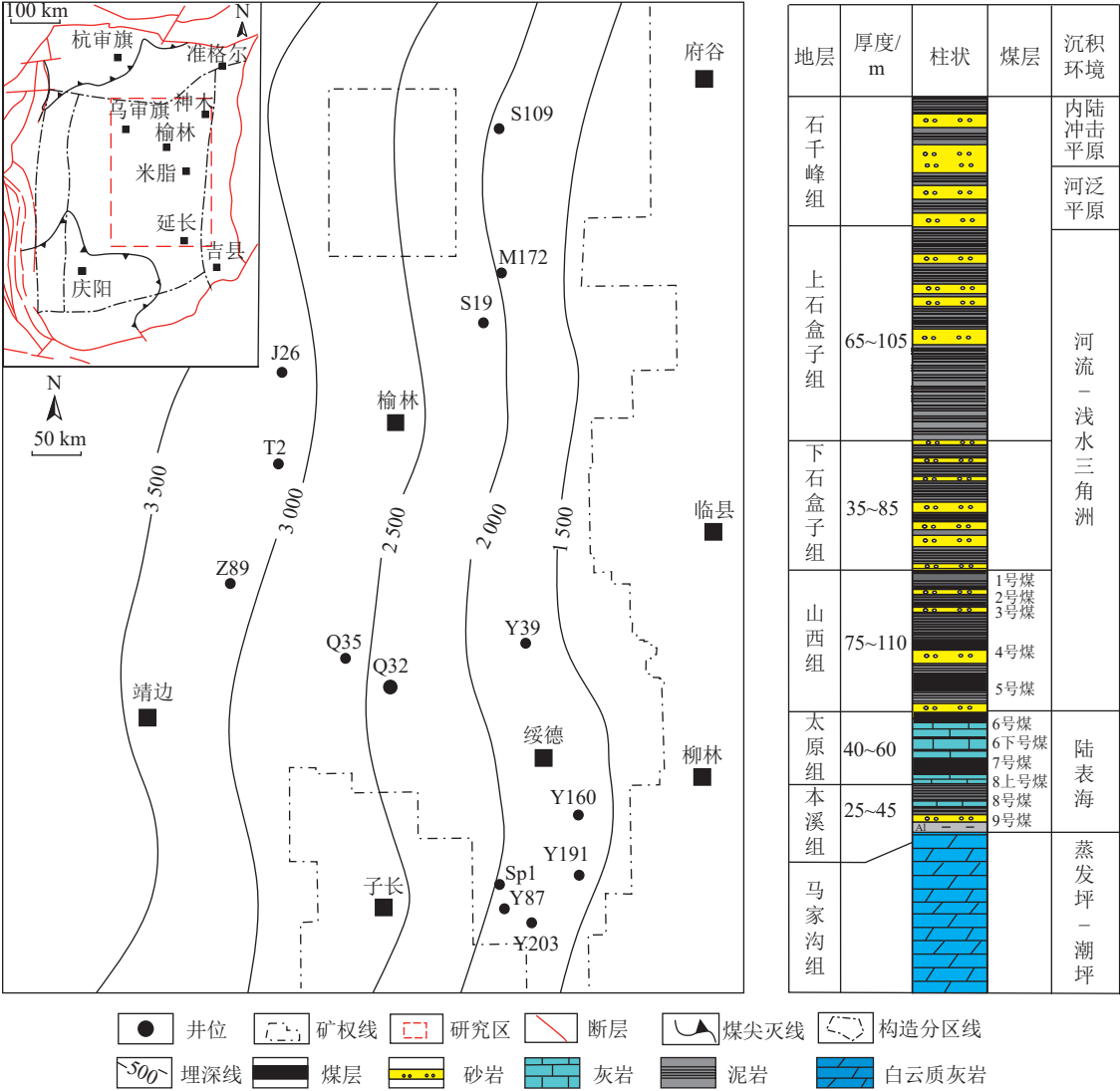


图 1 研究区地理位置及井位分布
Fig.1 Geographical location and well distribution of study area

2 样品采集与分析

2.1 样品采集位置

图 2 为研究区 8 号煤宏观煤岩柱状图及样品位置。本次研究煤样全部采自鄂尔多斯盆地东部煤层气井 M172、J26 等。煤心从钻孔中取出后,按先后顺序放入岩心箱内,清洗干全部煤心装入样袋内包装、密封、称重,按规定时间送检。为研究 8 号煤层的显微组分与孔隙特征关系,按照 0.5~1 m 间隔采集 M172 井 8 号煤层样品,样品切分为 4 份,分别用于显微组分鉴定、扫描电镜观测、核磁共振实验。为了对比研究,也采集了部分井中部的 5 号、6 号、7 号

煤层样品。研究使用的部分含气量测试数据和等温吸附测试数据由长庆油田公司提供。

2.2 核磁共振测量

研究使用 Recore 2500 型核磁共振仪进行核磁共振测量,仪器主频 5 MHz,磁体类型为永磁体,磁场强度为(0.3±0.03) T。样品预处理过程如下:将煤样制备成直径 2.5 cm、长度 2~5 cm 柱塞样品,最终根据实际长度进行了均一化处理,保证样品间可对比性;在 90 ℃ 的烘箱中干燥 24 h 后,浸入水中抽真空 8 h。测试流程如下:先对样品进行水饱和,进行一次核磁共振试验,然后对样品进行 5.55 MPa 离心处理

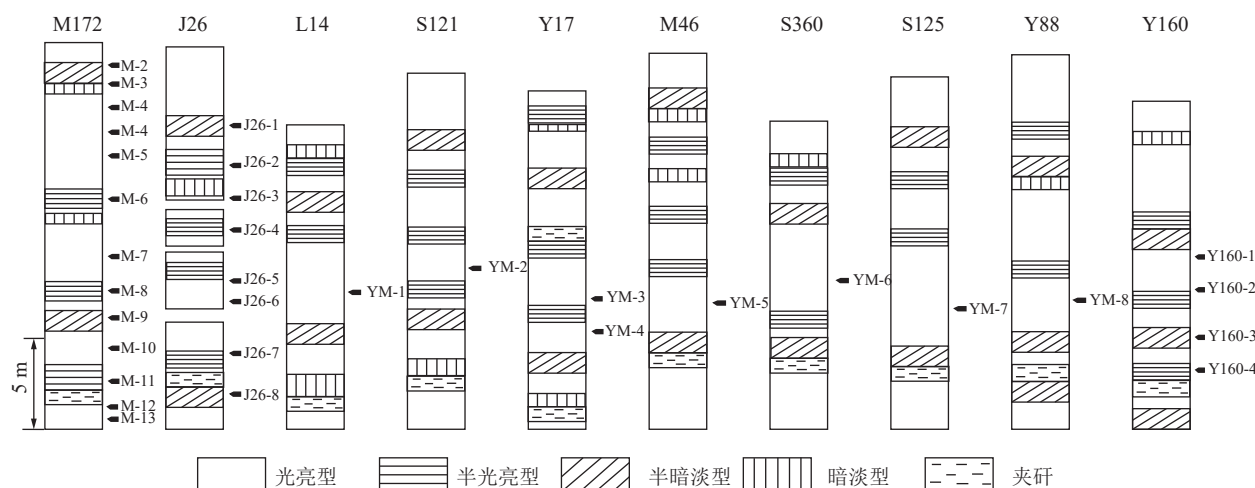


图2 研究区8号煤宏观煤岩柱状图及样品位置

Fig.2 Macro coal rock bar chart and sample location of No. 8 coal in study area

至质量变化小于0.01%，再对离心后样品进行二次核磁共振试验。试验采用测量参数设置如下：等待时间3 000 ms，回波间隔0.3 ms，回波个数1 024，扫描次数64，增益50。高速离心机转速为10 000 r/min，对应离心力5.55 MPa，气水界面张力72 mN/m，润湿角为0°。

2.3 显微组分和反射率测定

对煤层粉碎缩分后制备的光片进行光学显微组分分析，使用中国石油非常规油气重点实验室DM 4500P偏光显微及光度计（视野25 mm，支持透射光、正交偏光、荧光等，光源：12 V、100 W卤素灯）开展显微煤岩组分鉴定和定量分析，同时测定最大油浸镜质体反射率（ $R_{o,max}$ ）。显微组分鉴定和定量分析采用GB/T 8899—2013《煤的显微组分和矿物测定方法》进行，最大油浸镜质体反射率采用GB/T 6948—2008《煤的镜质体反射率显微镜测定方法》进行。

2.4 煤岩微观孔隙观测

煤岩微观孔隙观测试验使用中国石油非常规油气重点实验室的FEI Heilos 650F双束电镜，设备参数如下：场发射电子枪，电子束加速电压：350 ~ 30 000 V；Ga离子枪，离子束加速电压：500 ~ 30 000 V；分辨率：0.8 nm (@30 kV, STEM)，0.9 nm (@15 kV, BSE)，1.4 nm (@1 kV, BSE)。主要实验步骤如下，先采用Gatan model 697氩离子抛光仪抛光6 h，然后进行镀膜，然后采用FEI Heilos 650F对抛光面进行背散射成像模式(BSE)和深孔探测模式(DHV)扫描成像，获得观察区域的电镜照片。

3 结果分析

3.1 煤岩煤质特征

研究区本溪组8号煤层颜色均呈黑—褐黑色，条

痕色为棕色及棕黑色、褐红色。煤层结构以条带状、线理状、均一状结构为主，断口为阶梯状及参差状，裂隙较发育，含星点状黄铁矿薄膜及鲕粒状黄铁矿结核。以原生结构煤为主，煤心呈柱状，完整性好，割理较发育。宏观煤岩类型以光亮型和半暗型为主，该区镜质体反射率 R_o 从北向南有逐步增加趋势，变化范围1.2%~1.9%，热演化程度均较高，属于中—高变质程度（表1）。榆林地区8号煤层含气量平均21.15 m³/t，大部分样品处于超饱和状态，表1中游离气占比为游离气与总含气量的百分比，其中游离气量为总含气量减去储层温度压力条件下理论吸附量。

3.2 显微煤岩特征描述

榆林地区8号煤有机显微组分以镜质组为主，惰质组次之（表2，图3）。镜质组亚组分多数为基质镜质体，其次为结构镜质体、均质镜质体，少量团块镜质体；惰质组亚组分多为半丝质体，少量丝质体，几乎不含粗粒体和碎屑惰质体。壳质组成分主要为孢粉体和少量角质体。8号煤中镜质组是最主要显微组分，反射光照射下呈现为灰色。惰质组分常见有丝质体和半丝质体，反射光下有突起，呈现为白色。

3.3 煤相学特征参数计算

TPI反映植物保存与降解程度，GI推测地下水位。GWI反映沼泽覆水深度；VI判断成煤植物的类型与保存程度。MARCHIONI和KALKREUTH采用T-D-F三角图来划分煤相^[22]。其中，T（镜质体）=结构镜质体+均质镜质体；F（丝质体）=丝质体+半丝质体；D（分散组分）=孢子体+碎屑惰质体+碎屑镜质体+粗粒体^[11]。根据各亚显微煤岩组分定量成果，参

表 1 榆林地区 8 号煤储层显微组分与工业分析

Table 1 Microscopic composition and industrial analysis of No. 8 coal reservoir in Yulin area

编号	煤层	井深/m	镜质组/%	惰性组/%	壳质组/%	$R_{o,max}/\%$	$M_{ad}/\%$	$A_{ad}/\%$	$V_{ad}/\%$	$FC_{ad}/\%$	$G_c/(\text{m}^3\cdot\text{t}^{-1})$	井位
M-2	8号煤	2 426.22	47.22	20.48	32.30	1.76	0.65	22.84	12.75	63.76	14.85	M172
M-3	8号煤	2 427.27	50.51	31.96	17.53	1.77	0.98	12.69	12.16	74.17	15.40	M172
M-4	8号煤	2 427.89	65.55	31.76	2.69	1.77	0.65	17.38	15.70	66.27	23.63	M172
M-5	8号煤	2 428.65	54.88	41.13	3.99	1.77	0.65	12.23	11.95	75.17	18.05	M172
M-6	8号煤	2 429.29	59.80	40.20	0	1.83	0.79	21.46	11.81	65.94	21.48	M172
M-7	8号煤	2 429.90	34.15	49.82	16.03	1.77	1.09	11.04	11.54	76.33	20.07	M172
M-8	8号煤	2 430.55	60.20	30.51	9.29	1.76	0.66	42.17	11.93	45.24	22.85	M172
M-9	8号煤	2 431.01	61.18	36.25	2.57	1.76	0.98	35.42	11.88	51.72	12.97	M172
M-10	8号煤	2 431.69	43.59	30.76	25.65	1.76	0.93	16.46	11.89	70.72	17.30	M172
M-11	8号煤	2 432.60	60.76	34.72	4.52	1.76	0.79	19.43	11.96	67.82	22.55	M172
M-12	8号煤	2 433.25	47.31	34.05	18.64	1.74	0.70	17.47	12.84	68.99	17.50	M172
M-13	8号煤	2 434.08	41.45	41.46	17.09	1.75	0.72	17.63	13.13	68.52	16.73	M172
J26-1	5号煤	3 031.44	59.44	31.81	8.75	1.83	0.65	28.86	12.21	58.28	16.93	J26
J26-2	5号煤	3 032.86	28.61	70.71	0.68	1.81	0.73	26.28	12.70	60.29	11.01	J26
J26-3	5号煤	3 033.81	48.59	37.24	14.17	1.75	0.68	27.85	12.53	58.94	9.82	J26
J26-4	6号煤	3 066.10	52.47	36.12	11.41	1.79	0.64	32.44	11.76	55.16	14.59	J26
J26-5	7号煤	3 083.45	58.82	40.13	1.05	1.74	0.77	7.95	9.96	81.32	12.89	J26
J26-6	7号煤	3 094.36	39.58	46.99	13.43	1.76	0.68	38.29	9.17	51.86	16.93	J26
J26-7	8号煤	3 101.17	51.36	39.79	8.85	1.73	0.89	9.66	10.09	79.36	15.25	J26
J26-8	8号煤	3 110.14	37.07	38.13	24.80	1.73	0.69	26.28	10.25	62.78	—	J26
Y-M1	8号煤	4 101.00	95.80	0.30	0.60	1.65	0.65	11.23	14.34	73.78	—	L14
Y-M2	8号煤	2 737.26	95.40	0	3.80	1.75	0.64	11.44	14.04	73.88	—	S121
Y-M3	8号煤	2 508.45	92.90	3.10	0	1.63	0.68	5.66	11.32	82.34	—	Y17
Y-M4	8号煤	2 509.60	81.00	13.90	0	1.86	0.45	7.44	15.40	76.71	—	Y17
Y-M5	8号煤	2 230.34	92.10	1.80	0.10	1.56	0.65	12.23	12.43	74.69	—	M46
Y-M6	8号煤	2 942.02	95.40	0.50	3.20	1.58	0.76	7.11	11.34	80.79	—	S360
Y-M7	8号煤	2 472.60	96.00	1.40	0.20	1.66	0.87	6.44	14.49	78.2	—	S125
Y-M8	8号煤	2 506.02	96.60	0.70	0.20	1.64	0.97	5.90	14.95	78.18	—	Y88
Y160-1	8号煤	2 670.00	75.50	17.70	6.80	1.87	0.78	11.23	15.64	72.35	—	Y160
Y160-2	8号煤	2 720.00	71.20	28.60	0.20	1.85	0.73	13.42	16.75	69.10	—	Y160
Y160-3	8号煤	2 770.00	67.10	31.90	1.00	1.86	0.94	12.64	17.54	68.88	—	Y160
Y160-4	8号煤	2 820.00	66.50	24.51	8.99	1.85	0.84	10.40	15.50	73.26	—	Y160

注： $R_{o,max}$ 为油浸下镜质体最大反射率； G_c 为含气量。

考前人计算方法^[23-28]，计算得到煤相参数 GI、TPI、GWI 和 VI 的数值，煤相参数见表 2。

3.4 煤岩气孔发育特征

采用扫描电镜观测，发现研究区煤岩气孔主要有 2 类：原生气孔和改造型气孔，原生气孔包括孤立气孔、成群气孔 2 种常见类型(图 4)。气孔不仅为煤层气提供了主要的吸附空间，还可以容纳大量的游离气。气孔一般是在生烃过程中伴随着油气排出生

成的，也有一部分是由构造作用产生的。在扫描电镜下观察研究区样品，发现研究区气孔形态多样，呈圆形、新月形、气泡形、椭圆形等不规则形状，孔径介于 30 ~ 300 nm，其中 100 nm 以下的孔隙较多，气孔具有一定的定向性。

3.5 煤孔径分布特征

核磁共振(NMR)能够通过获取煤样孔隙中流体氢核核磁共振弛豫信号定量表征煤的完整孔喉分布，

表 2 榆林地区 8 号煤主要煤相参数

Table 2 Main coal facie parameters of No. 8 coal in Yulin area

编号	煤层	井深/m	镜质组/%	惰性组/%	壳质组/%	GI	TPI	V/I	F/%	D/%	T/%	F/M	GWl	VI	井号
M-1	8号煤	2 425.45	60.62	31.09	8.29	2.79	0.46	1.90	22.90	66.99	10.11	0.30	0.04	0.67	M172
M-2	8号煤	2 426.22	47.22	20.48	32.30	6.12	0.35	2.30	6.94	81.60	11.46	0.07	0.43	0.47	M172
M-3	8号煤	2 427.27	50.51	31.96	17.53	2.95	0.34	1.60	18.90	76.29	4.81	0.42	0.33	0.50	M172
M-4	8号煤	2 427.89	65.55	31.76	2.69	5.29	0.22	2.10	11.49	83.10	5.41	0.23	0.45	0.27	M172
M-5	8号煤	2 428.65	54.88	41.13	3.99	2.11	1.15	1.30	27.28	48.48	24.24	1.31	0.35	1.61	M172
M-6	8号煤	2 429.29	59.80	40.20	0.00	3.17	0.56	1.50	18.58	63.51	17.91	0.66	0.53	0.81	M172
M-7	8号煤	2 429.90	34.15	49.82	16.03	1.32	0.40	0.70	30.66	67.94	1.40	0.73	0.33	0.93	M172
M-8	8号煤	2 430.55	60.20	30.51	9.29	2.61	0.44	2.00	22.45	56.47	21.08	0.85	0.74	1.08	M172
M-9	8号煤	2 431.01	61.18	36.25	2.57	8.55	0.19	1.70	6.22	82.78	11.00	0.25	0.85	0.33	M172
M-10	8号煤	2 431.69	43.59	30.76	25.65	5.36	0.00	1.40	7.69	92.31	0.00	0.13	0.45	0.17	M172
M-11	8号煤	2 432.60	60.76	34.72	4.52	7.97	0.19	1.80	4.51	85.77	9.72	0.20	0.02	0.26	M172
M-12	8号煤	2 433.25	47.31	34.05	18.64	1.86	1.37	1.40	26.17	51.25	22.58	1.62	0.54	1.86	M172
M-13	8号煤	2 434.08	41.45	41.46	17.09	1.85	1.12	1.00	26.91	53.82	19.27	1.30	0.64	1.92	M172
J26-1	5号煤	3 031.44	59.44	31.81	8.75	3.73	0.14	1.90	15.73	84.27	0.00	0.22	0.56	0.25	J26
J26-2	5号煤	3 032.86	28.61	70.71	0.68	0.40	3.52	0.40	69.03	29.96	1.01	4.00	0.70	4.00	J26
J26-3	5号煤	3 033.81	48.59	37.24	14.17	2.46	0.58	1.30	23.05	68.08	8.87	0.73	0.09	0.89	J26
J26-4	6号煤	3 066.10	52.47	36.12	11.41	2.38	0.85	1.50	22.05	56.28	21.67	0.97	0.43	1.25	J26
J26-5	7号煤	3 083.45	58.82	40.13	1.05	2.72	0.79	1.50	23.18	52.95	23.87	1.03	0.54	1.30	J26
J26-6	7号煤	3 094.36	39.58	46.99	13.43	1.64	0.36	0.80	29.68	70.32	0.00	0.57	0.43	0.72	J26
J26-7	8号煤	3 101.17	51.36	39.79	8.85	2.34	1.05	1.30	23.81	51.02	25.17	1.20	0.50	1.80	J26
J26-8	8号煤	3 110.14	37.07	38.13	24.80	1.25	1.26	1.00	28.68	57.33	13.99	1.38	0.40	1.63	J26
Y-M1	8号煤	4 101.00	55.80	43.60	0.60	2.56	1.56	1.30	24.47	22.30	53.23	2.32	0.12	2.54	L14
Y-M2	8号煤	2 737.26	55.40	40.80	3.80	3.20	1.57	1.40	35.12	19.54	45.34	1.43	0.63	3.54	S121
Y-M3	8号煤	2 508.45	62.90	37.10	0.00	3.42	1.98	1.70	18.23	25.33	56.44	1.42	0.54	3.75	Y17
Y-M4	8号煤	2 509.60	81.20	18.80	0.00	2.65	1.43	4.30	25.81	16.65	57.54	1.53	0.43	3.98	Y17
Y-M5	8号煤	2 230.34	74.30	25.60	0.10	2.55	2.53	2.90	31.12	16.45	52.43	1.43	0.43	4.63	M46
Y-M6	8号煤	2 942.02	75.40	21.40	3.20	3.44	2.43	3.50	37.24	17.54	45.22	1.63	0.54	4.86	S360
Y-M7	8号煤	2 472.60	76.40	23.40	0.20	2.95	2.45	3.30	45.12	19.54	35.34	0.54	0.89	4.65	S125
Y-M8	8号煤	2 506.02	74.40	25.40	0.20	2.85	2.64	2.90	46.92	17.44	35.64	0.55	0.43	5.54	Y88
Y160-1	8号煤	2 670.00	75.50	43.60	6.80	2.57	1.87	4.30	2.80	23.20	74.00	0.43	0.43	5.74	Y160
Y160-2	8号煤	2 720.00	71.20	43.60	0.20	2.85	2.53	2.50	7.80	21.00	71.20	0.54	0.85	5.34	Y160
Y160-3	8号煤	2 770.00	67.10	43.60	1.00	2.60	2.75	2.10	14.70	18.20	67.10	0.53	0.22	4.54	Y160
Y160-4	8号煤	2 820.00	66.50	43.60	8.99	2.75	2.95	2.70	16.90	16.60	66.50	0.64	0.53	3.23	Y160

注：GI为凝胶化指数；TPI为结构保存指数；V/I为镜惰比；T、F、D分别为结构镜质体、丝质体、分散组分体积分数；F/M为骨基比；GWl为地下水活跃指数；VI为植被指数。

计算获得煤样孔隙结构、孔隙大小等参数。国内学者研究认为,核磁共振 T_2 谱面积反映孔隙体积,峰间连通或孤立反映孔隙连通状况, $T_2<10\text{ ms}$ 对应微小孔隙; $10\text{ ms}\leq T_2\leq 100\text{ ms}$ 对应中孔隙; $T_2>100\text{ ms}$ 对应大孔和微裂隙^[29-30]。

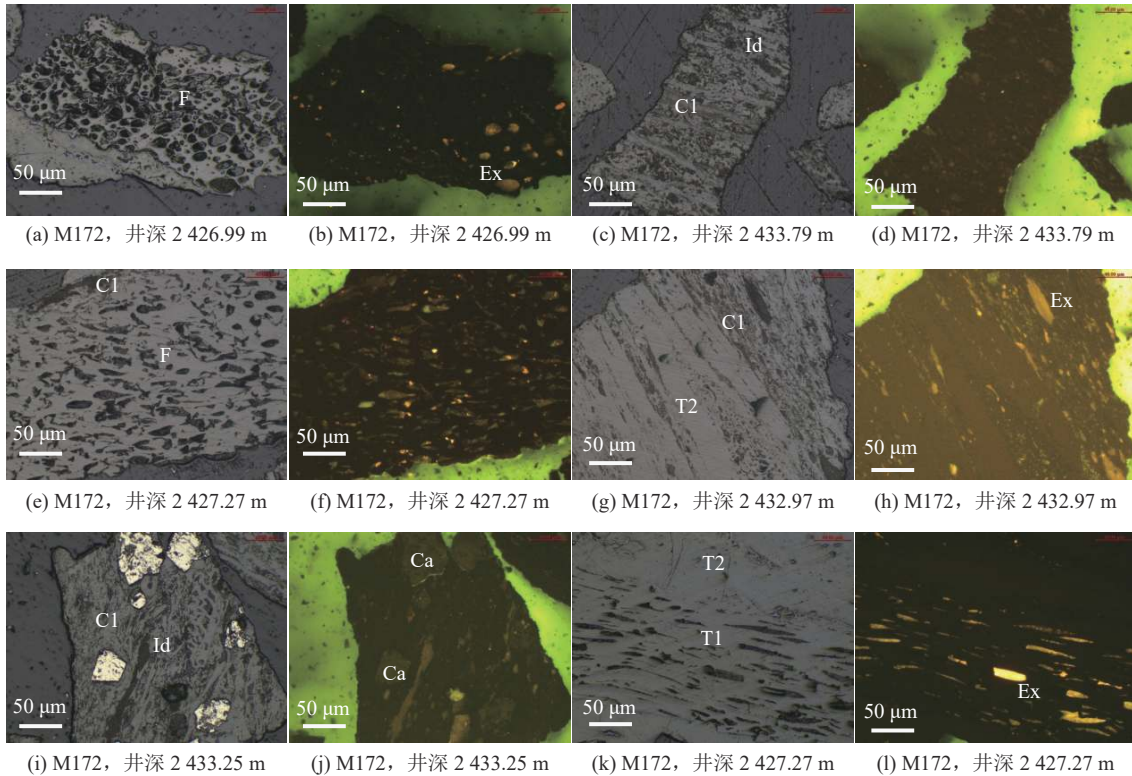
本文所选煤样主要发育吸附孔,其孔径结构可由

核磁共振测试和液氮吸附测试结果所求得。由饱和流体煤样 T_2 谱图得到吸附峰弛豫时间,结合液氮吸附测试结果,根据式(1)计算出煤样的表面弛豫率^[30]。

$$\frac{1}{T_2}=\rho_2\left(\frac{S}{V}\right)$$

(1)

式中: ρ_2 为表面弛豫率; S 为表面积; V 为孔隙体积。煤



注：图3a丝质体(F)胞腔呈椭圆-圆状，保存程度较好，充填渗出沥青体(Ex)和黏土矿物；图3b与图3a为同一视域下的荧光图像，渗出沥青体发橘黄色荧光；图3c为基质镜质体(C1)和惰屑体(Id)；图3d与图3c为同一视域下的荧光图像；图3e为丝质体(F)，胞腔呈椭圆-圆状，保存好，充填渗出沥青体(Ex)和黏土矿物；图3f与图3e为同一视域下的荧光图像，渗出沥青体橘黄色荧光；图3g基质镜质体(C1)和均质镜质体(T2)呈条带式分布；图3h与图3g为同一视域下的荧光图像，渗出沥青体发橘黄色荧光，均质镜质体发出很弱的褐色荧光，惰屑体不发荧光；图3i为基质镜质体(C1)胶结惰屑体(Id)和矿物(Ca)；图3j与图3i为同一视域下的荧光图像，矿物(Ca)呈现浅绿色荧光；图3k均质镜质体(C1)、结构镜质体(T2)呈条带式展布，胞腔中充填渗出沥青体；图3m与图3k为同一视域下的荧光图像，渗出沥青体发橘黄-黄色荧光。

图3 榆林地区8号反射光与荧光条件下煤岩显微组分特征

Fig.3 Microscopic composition characteristics of coal and rock under No. 8 reflected light and fluorescence conditions in Yulin area

中孔隙近似为柱状和球状孔隙情况下，式(1)可变形为

$$1/T_2 = F_s(\rho_2/r) \quad (2)$$

式中： F_s 为几何形状因子，对于柱状孔隙 F_s 为2，球状孔隙 F_s 值为3； r 为孔径，nm。

本文采用表面弛豫率 ρ_2 计算全尺度孔径分布。据LI等采用低温氮气吸附和压汞试验联合测试计算中国烟煤的表面弛豫率约为 $3.0 \mu\text{m/s}$ ^[30]。本文采用了该弛豫率将NMR测量 T_2 谱转换为全尺度孔径。根据核磁测试 T_2 谱形态分为3类：单峰、双峰和三峰类型，计算结果表明，单峰类型中微孔、中孔的占比为90%~95%，大孔占比极少，双峰型微孔、中孔占比85%~90%，三峰型小孔、中孔占比65%~70%，大孔占比30%~35%(图5)。

4 讨论

4.1 榆林地区深部及邻区8号煤储层特征对比

从榆林地区深部8号煤储层与邻区储层特征参数对比表3分析，榆林地区镜质组含量32个样品平

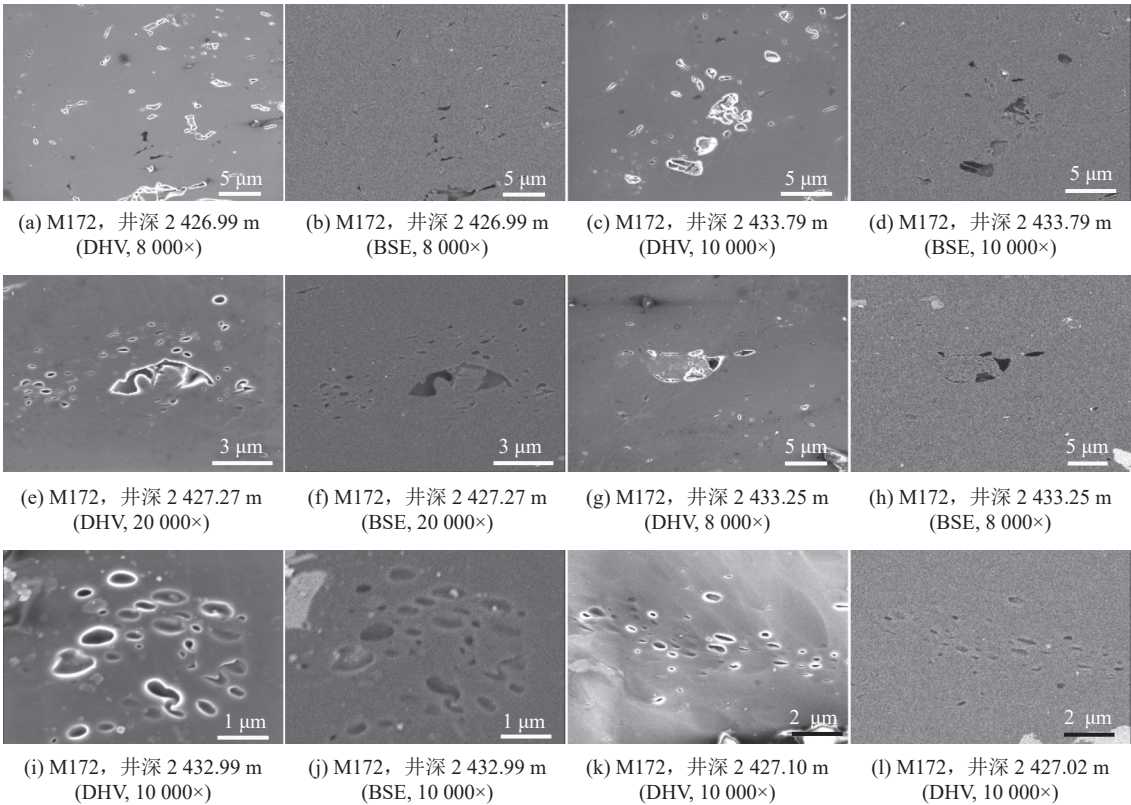
均值为52.22%明显低于邻区，榆林地区具有较高的惰性组含量，高达35.26%，榆林南地区具有中高成熟度，实测镜质体反射率1.77%，演化程度处于中高煤级，部分位于生油气窗口。榆林地区深部8号煤灰分含量产率20.52%，略高于邻区，煤层气含气量 $18.62 \text{ m}^3/\text{t}$ ，具有较高的游离气比例28%，具有最高游离气含量比例，明显高于其他地区。

4.2 镜质比与成煤沼泽覆水环境

镜质组一般形成于潮湿-还原环境，惰质组形成于干燥-氧化环境，镜质比参数 V/I 可反映沼泽的覆水程度及气候干湿，前人认为 $V/I < 1$ 时指示氧化环境^[18]，其中以许福美等分类较为详细，根据 V/I 值划分为强覆水、极潮湿-覆水、潮湿-弱覆水、干燥-极干燥环境4种类型^[7]。依据该分类方案，J26、M172等井的5号煤、6号/7号煤层、8号煤层的成煤环境属于极潮湿-覆水环境。

4.3 GI-TPI值与成煤沼泽环境

GI-TPI相图反映成煤泥炭沼泽持续时间及其湿



注：图 4a、图 4b 为煤中常见的不规则气孔；图 4c、图 4d 为煤中孤立气孔；图 4e、图 4f、图 4i、图 4j 为煤中成群气孔；图 4g、图 4h 为煤中压扁气孔；图 4k、图 4l 为压扁的线状成群气孔。BSE 为背散射成像模式，DHV 为深孔探测模式。

图 4 榆林地区 8 号煤常见煤岩气孔形态

Fig.4 Morphology of common coal rock pores in No. 8 coal seam in Yulin area

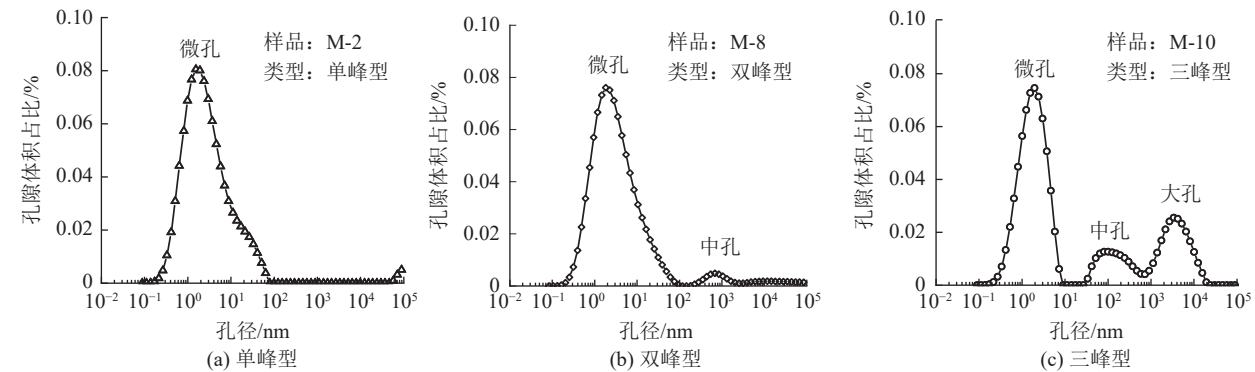


图 5 榆林地区 8 号煤样核磁共振孔径分布曲线

Fig.5 NMR pore size distribution curve of No. 8 coal sample in Yulin area

表 3 榆林地区与邻区 8 号煤储层参数对比

Table 3 Comparison of reservoir parameters of No. 8 coal in Yulin area and neighboring areas

地区	深度/m	镜质组 体积分数/%	惰性组 体积分数/%	壳质组 体积分数/%	$R_{o,max}/\%$	$M_{ad}/\%$	$A_{ad}/\%$	$V_{ad}/\%$	$FC_{ad}/\%$	来源
榆林地区	2 500 ~ 3 200	52.22	35.26	12.53	1.77	0.80	20.52	12.46	66.22	本文测试
大宁—吉县地区	1 200 ~ 2 300	84.22	10.26	5.52	2.15	0.79	17.97	10.17	71.07	文献[31]
延川南地区	1 500 ~ 1 800	71.28	27.62	1.10	2.35	0.61	8.94	13.78	76.68	文献[18,20,26]
保德地区	1 000 ~ 1 200	75.03	24.04	0.93	1.11	0.81	7.92	13.30	77.97	文献[31]

润程度，其中比较常用的方案将泥炭沼泽分为 5 类：
湿地草本沼泽相(TPI<1, GI<5)、低位沼泽(芦苇)相

(TPI<1, GI>5)、干燥森林沼泽相(TPI>1, GI<1)、潮
湿森林沼泽相(TPI>1, 1<GI<5)、较浅覆水森林沼泽

相($TPI > 1$, $5 < GI < 10$)和较深覆水森林沼泽相($TPI > 1$, $GI > 10$)^[32-33]。根据该方案,本文J26井山西组5号煤层、太原组6号/7号煤总体上属于湿地森林沼泽(图6a),5号煤底部1个样品 $GI < 1$ 属于干燥森林沼泽,表明5号煤成煤早期为泥炭沼泽地下水位低,沼泽环境较干燥。太原组6号/7号煤层值总体为 $1 < GI < 5$, $TPI > 1$,成煤沼泽环境较潮湿。

本溪组8号煤样品点落在开阔水域沼泽和湿地

森林沼泽(图6b),尤其是M172井的开阔水域沼泽,覆水较深,成煤植物以木本与草本混合植物为主,植物结构保存较好,降解程度低-中等。所有井的8号煤层 GI 值均在1以上,表明其成煤时沼泽环境较为潮湿,且发生了较强凝胶化作用。通过M172井8号煤层的 GI 值变化结合煤质、煤岩垂向变化,表明该M172井泥炭沼泽类型早期为湿地森林沼泽类型,晚期逐渐演变为开阔水体森林沼泽类型。

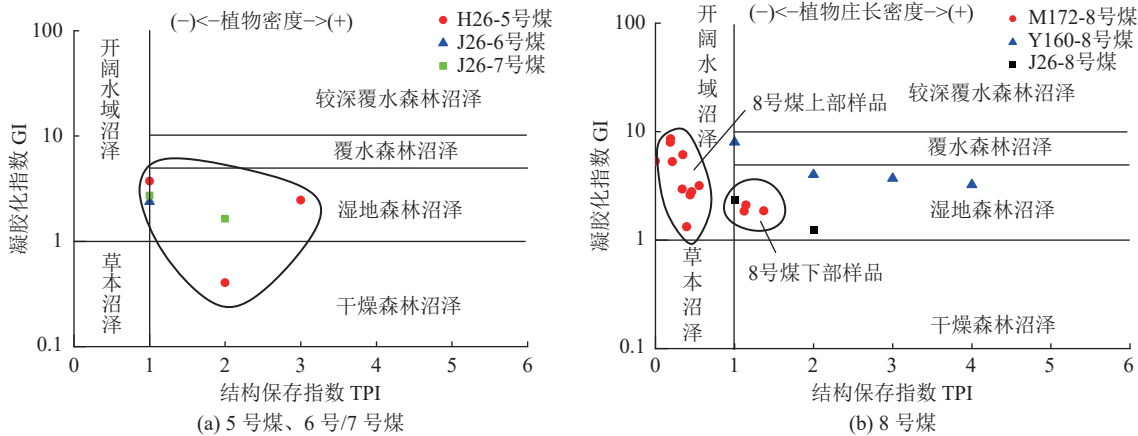


图6 榆林地区煤层 TPI-GI 相图

Fig.6 TPI-GI phase diagram of coal seams in Yulin area

从3套煤层沼泽类型变化来看,研究区内沼泽环境从本溪期8号由早期湿地森林沼泽逐步演化为后期开阔水域沼泽,到太原期6号/7号煤和山西组5号煤形成时主要发育湿地森林沼泽。表3中M172井的植被指数 $VI(0.27 \sim 1.92)$ 与Y17井的植被指数 $VI(3.75, 3.98)$ 及S125井的植被指数 $Vi(4.65)$ 相差数倍,反映了当时成煤沼泽环境在局部地区可能进一步复杂化。

4.4 GWI-VI图与成煤沼泽环境

GWI-VI煤相关系图最早由CALDER提出,GWI可以表示成煤泥炭沼泽的水位变化,值越大时,则水位越高,地下水动力条件越强,反之,则越弱^[34-35]。VI为植被指数,主要用以表示原始成煤植物的类型和其保存的完整程度,当VI值越高时,表示泥炭沼泽为以木本为主的森林沼泽;当VI值越低时,表示泥炭沼泽以多草本的湖泊环境为主。

本文13个样品落在 $VI < 2$ 区域,9个样品落在 $VI > 2$ 的区域(图7),说明成煤植物类型为木本+草本混生型为主,以木本植物为主。根据8号煤层样品VI垂向变化(表2)成煤早期植物类型应主要为木本植物,后期随着覆水程度增大而逐渐转变为木本+草本混生植物为主。全部样品GWI值 < 1 ,说明研究区

沼泽地下水位较低,水体不活跃,利于营养成分富集,利于沼泽环境稳定发展。

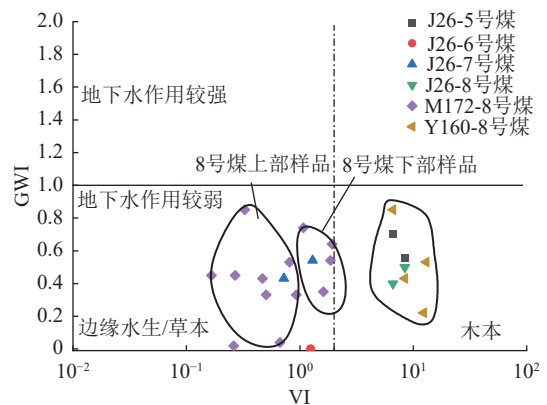


图7 榆林地区煤层 GWI-VI 相图

Fig.7 GWI-VI phase diagram of coal seams in Yulin area

4.5 T-D-F图与成煤沼泽环境

T-D-F三角相图判断煤层形成时的沉积环境,木质比 $(T+F)/D$ 表示木质组织中植物原料富集对泥炭的贡献度; T/F 表示木本组织的凝胶化程度。高 D 值表明开放沼泽相占主导, F 值高指示陆相, T 值则指示浅沼相^[36]。从T-D-F相图可以看出,样品 F 组分含量低,全部样品点都落在 F 线附近(图8)。5煤

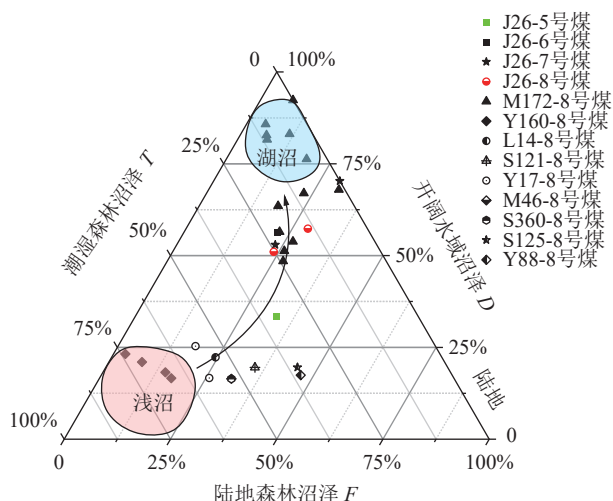


图8 榆林地区煤层 T-D-F 相图

Fig.8 T-D-F facie diagram of coal seams in Yulin area

层样品点集中靠近中心区域,从6号煤→8号煤层样品点则趋于向D区域靠近。仅少数样品靠近T区域,表明沼泽类型早期应为湿地森林沼泽类型,后期演变为以开阔水域沼泽类型为主,这与图5中的TPI-GI

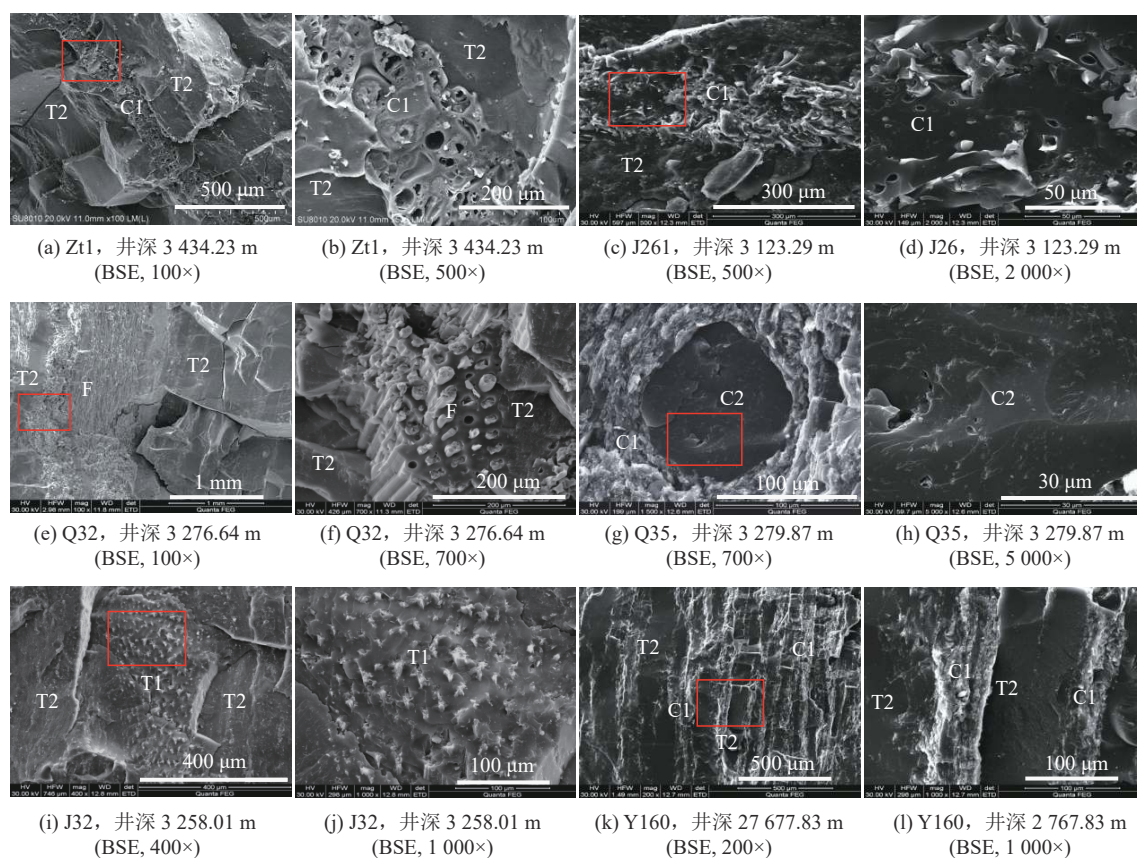
相图分析结果一致。

4.6 煤气孔发育特征与煤岩组分关系

前人研究发现,壳质组、惰质组中气孔少,而镜质组中气孔发育,其中基质镜质体、团块镜质体、胶质镜质体的凝胶化程度高,经历过类似原油的粘稠流体的演化历程。树脂体、渗出沥青体页曾经为粘稠的流体组分,而结构镜质体、镜屑体、均质镜质体、惰质组、角质体、木栓质体、孢粉体等均为不流动的固体组分^[37]。流动组分在不规则岩石空间和成煤变质过程中受压实作用发生过短距运移镜下多呈弯曲带状、团块状等流动形状。本研究区观察到的样品中基质镜质体发育密集大型气孔群(图9a、图9b)。

4.7 煤孔隙结构特征与煤相参数关系

通过统计煤样大孔与TPI、GI相关性图9可知,煤样大孔占比与TPI值呈现正相关(图10a),煤样大孔占比随着TPI值的增大而增大,而煤样大孔占比与GI呈负相关(图10b)。分析认为,TPI值与结构镜质体、丝质体、半丝质体数量有关,主要反映植物结



注:图9b为图9a中局部放大(红框);部分样品基质镜质体(C1)也可见稀疏带状气孔群(图9c、9d),图9d为图9c中局部放大(红框),丝质体(F)中发育植物原始孔隙,多为黏土矿物充填(图9e、9f),图9f为图9e中局部放大(红框);团块镜质体(C2)中发育少量气孔(图9g、图9h),图9h为图9g中局部放大(红框);结构镜质体(T1)中发育原始组织孔,充填严重(图9i、图9j),图9j为图9i中局部放大(红框);均质镜质体(T2)基本看不到气孔(图9k、图9l),图9l为图9k中均质镜质体(T2)局部放大(红框);BSE为背散射成像模式。

图9 榆林地区8号煤中常见组分中气泡孔和组织孔

Fig.9 Typical pores and plant tissue pores of No. 8 coal seam in Yulin area

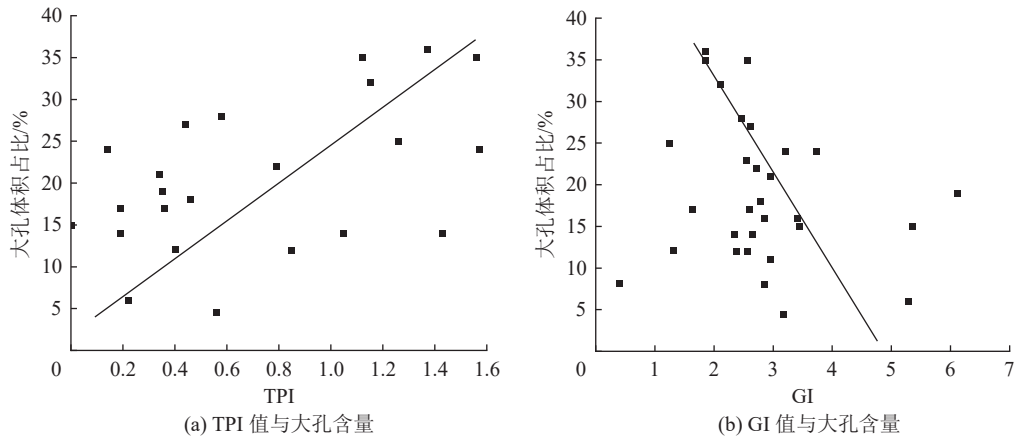


图 10 榆林地区 8 号煤大孔-煤相指标关系

Fig.10 Relationship between macropores and coal phase indicators of No. 8 coal in Yulin area

构保存程度,成煤植物的胞腔孔、碎屑孔等是煤中大孔的主要来源,因此 TPI 值与大孔含量应当正相关,而与生烃作用有关的气孔发育取决于煤岩组分活性化学成分,气孔通常以微孔为主构成,因此与 GI 值负相关。

4.8 煤孔隙结构特征与煤相沼泽类型关系

煤相通过控制成煤沼泽环境影响煤岩组分,进而影响煤的孔隙结构发育状况^[24]。本文根据核磁测定结果建立孔径分布与样品在 TPI-GI 图上位置综合分析可知,M172 井 8 号煤上部样品多数样品均位于开阔水域沼泽相,孔隙分布形态为三峰,其微孔和大孔孔隙占比高,中孔占比少(图 11),M172 井 8 号煤下部样品属于湿地森林沼泽相,孔隙分布均为双峰,其呈现为微孔发育,中孔不发育,大孔少量发育,仅为总孔隙的 5.3%,Y160 和 J26 地区属于湿地森林沼泽相,样品 T_2 谱表明孔隙分布均为双峰,其呈现为微孔发育较好,大孔发育较差。

煤植物和成煤环境的差别^[24-27]。由上述可知,在本研究区内,不同煤相煤样孔隙分布具有较大差异,可见煤相是控制本区煤层孔隙结构发育差异化的重要因素之一,研究区内本本沼泽成煤植被植物成煤组织保留好,利于组织孔发育,越接近草本沼泽,成煤植物越低等,组织结构松散,成煤环境动荡,含氧量变化大,植物组织易降解,发生凝胶化作用导致组织及组织孔不易保留,反而更加有利于后期气泡变孔作用形成的孔隙保存在软流组分中,形成目前在基质镜质体、团块镜质体、胶质镜质体等组分中观察到的大量气孔群。由此可见,在鄂尔多斯盆地榆林地区 8 号煤发育地区,成煤沼泽环境通过控制煤岩显微组分,进而对深部 8 号煤孔隙结构类型产生重要影响。

5 结 论

1)8 号煤岩有机显微组分以镜质组为主,惰质组次之,反映 8 号煤层成为植物以木本植物为主,草本植物为辅。镜质组亚组分多数为基质镜质体,次为结构镜质体、均质镜质体,少量团块镜质体。惰质组亚组分多为半丝质体,少量丝质体,几乎不含粗粒体和碎屑惰质体。

2)8 号煤大孔占比随着植物结构保存指数 TPI 的增大而增大,而煤样大孔占比与凝胶化指数 GI 呈现负相关。成煤植物的胞腔孔、碎屑孔等是煤中大孔的主要来源,而与生烃作用有关的气孔发育取决于煤岩组分活性化学成分。

3)8 号煤凝胶化程度较高的基质镜质体发育密集气孔群或稀疏带状气孔群,团块镜质体中发育少量气孔;结构镜质体中发育原始组织孔,多为矿物充填;均质镜质体气孔不发育;丝质体中发育原始组织

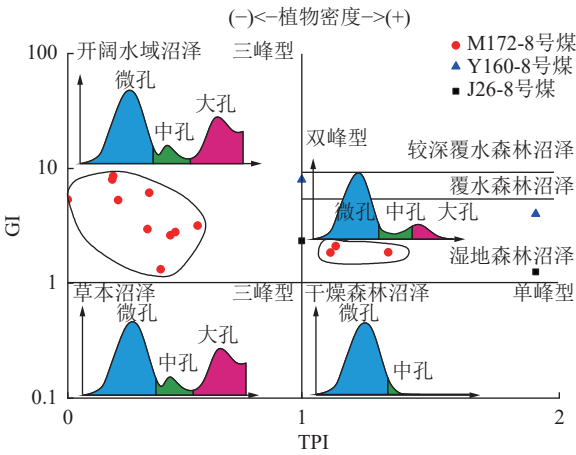


图 11 榆林地区 8 号煤成煤沼泽类别与孔隙关系

Fig.11 Classification and pore relationship of coal swamp from No. 8 coal in Yulin area

前人研究认为孔隙类型差异较大的原因是成

孔, 多为矿物充填。

4) 8 号煤孔隙结构特征受成煤沼泽类型控制。研究区成煤沼泽环境主要有 2 类: 一类为开阔水域沼泽相, 该成煤环境形成的孔隙结构分布呈现三峰, 微孔和大孔发育最好; 二类湿地森林沼泽相, 孔隙分布呈现双峰, 其呈现为微孔发育好, 大孔发育较差, 中孔不发育。

参考文献(References):

- [1] 徐凤银, 王成旺, 熊先钺, 等. 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, 2022, 34(4): 30–42, 262.
XU Fengyin, WANG Chengwang, Xiong Xianyue, *et al.* 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, 2022, 34(4): 30–42, 262.
- [2] 秦勇, 申建, 沈玉林. 叠置含气系统共采兼容性—煤系“三气”及深部煤层气开采中的共性地质问题[J]. 煤炭学报, 2016, 41(1): 14–23.
QIN Yong, SHEN Jian, SHEN Yulin. Joint mining compatibility of superposed gas-bearing systems: a general geological problem for extraction of three natural gases and deep CBM in coal series[J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(1): 14–23.
- [3] 秦勇, 申建, 王宝文, 等. 深部煤层气成藏效应及其耦合关系[J]. 石油学报, 2012, 33(1): 48–54.
QIN Yong, SHEN Jian, WANG Baowen, *et al.* Accumulation effects and coupling relationship of deep coalbed methane[J]. Acta Petrolei Sinica, 2012, 33(1): 48–54.
- [4] 申建, 秦勇, 傅雪海, 等. 深部煤层气成藏条件特殊性及其临界深度探讨[J]. 天然气地球科学, 2014, 25(9): 1470–1476.
SHEN Jian, QIN Yong, FU Xuehai, *et al.* Properties of deep coalbed methane reservoir forming conditions and critical depth discussion[J]. Natural Gas Geoscience, 2014, 25(9): 1470–1476.
- [5] 何发岐, 董昭雄, 赵兰, 等. 深部煤层游离气形成机理及资源意义[J]. 断块油气田, 2021, 28(5): 604–608, 613.
HE Faqi, DONG Zhaoxiong, ZHAO Lan, *et al.* Formation mechanism and resource significance of free gas in deep coalbed[J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2021, 28(5): 604–608, 613.
- [6] 何发岐, 董昭雄. 深部煤层气资源开发潜力: 以鄂尔多斯盆地大牛地气田为例[J]. 石油与天然气地质, 2022, 43(2): 277–285.
HE Faqi, DONG Zhaoxiong. Development potential of deep coalbed methane: a case study in the Daniudi gas field, Ordos Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2022, 43(2): 277–285.
- [7] 陈贞龙, 郭涛, 李鑫, 等. 延川南煤层气田深部煤层气成藏规律与开发技术[J]. 煤炭科学技术, 2019, 47(9): 112–118.
CHEN Zhenlong, GUO Tao, LI Xin, *et al.* Enrichment law and development technology of deep coalbed methane in South Yanchuan Coalbed Methane Field[J]. Coal Science and Technology, 2019, 47(9): 112–118.
- [8] 姚红生, 陈贞龙, 何希鹏, 等. 深部煤层气“有效支撑”理念及创新实践: 以鄂尔多斯盆地延川南煤层气田为例[J]. 天然气工业, 2022, 42(6): 97–106.
YAO Hongsheng, CHEN Zhenlong, HE Xipeng, *et al.* "Effective support" concept and innovative practice of deep CBM in south Yanchuan gas field of the Ordos Basin[J]. Natural Gas Industry, 2022, 42(6): 97–106.
- [9] 刘玉龙, 汤达祯, 许浩, 等. 煤岩类型控制下的微观孔隙结构及吸附特征研究[J]. 煤炭工程, 2016, 48(11): 107–110.
LIU Yulong, TANG Dazhen, XU Hao, *et al.* Study on microscopic pores structure and adsorption characteristics of different lithotypes[J]. Coal Engineering, 2016, 48(11): 107–110.
- [10] 王博洋, 秦勇, 申建, 等. 鄂尔多斯盆地紫金山地区煤孔隙分形规律及其主控地质因素分析[J]. 高校地质学报, 2017, 23(3): 499–510.
WANG Boyang, QIN Yong, SHEN Jian, *et al.* The fractal regularity of coal porosity and its controlling geological factors in Zijinshan area[J]. Geological Journal of China Universities, 2017, 23(3): 499–510.
- [11] 王锐, 夏玉成, 马丽. 榆神矿区富油煤赋存特征及其沉积环境研究[J]. 煤炭科学技术, 2020, 48(12): 192–197.
WANG Rui, XIA Yucheng, MA Li. Study on oil-rich coal occurrence characteristics and sedimentary environment in Yushen Mining Area[J]. Coal Science and Technology, 2020, 48(12): 192–197.
- [12] 秦勇, 申建. 论深部煤层气基本地质问题[J]. 石油学报, 2016, 37(1): 125–136.
QIN Yong, SHEN Jian. On the fundamental issues of deep coalbed methane geology[J]. Acta Petrolei Sinica, 2016, 37(1): 125–136.
- [13] STACH E, MACKOWSKY M, TEICHMÜLLER M, *et al.* 斯塔赫煤岩学教程[M]. 杨起, 李宝芳, 黄家福, 译. 北京: 煤炭工业出版社, 1990.
- [14] DIESSEL C. Utility of coal petrology for sequence-stratigraphic analysis[J]. International Journal of Coal Geology, 2007, 70(1/2/3): 3–34.
- [15] CALDER J H, GIBBING M R, MUKHOPADHAY P K. Peat formation in a Westphalian B piedmont setting. Cumberland Basin, Nova Scotia: implication for the maceral-based interpretation of rheotrophic and raised Paleomires[J]. BullSocGeol Fr, 1991, 162(2): 283–298.
- [16] MARQUES M. Coal facies and depositional environments of the Aurora and Cabeza de Vaca Units, Peñarroya–Belmez–Espiel Coalfield (Cordoba, Spain) [J]. International Journal of Coal Geology, 2002, 48(34): 197–216.
- [17] HARVEY R D, DILLON J W. Maceral distributions in Illinois coals and their paleoenvironmental implications[J]. International Journal of Coal Geology, 1985, 5(12): 141–165.
- [18] 李清. 山西延川南煤层气田 2 号煤层煤相研究: 煤层气开发选区意义[J]. 石油实验地质, 2014, 36(2): 245–248, 256.
LI Qing. Coal facies of No. 2 coal in Yanchuannan coal field of Shanxi: Significance for constituencies of coalbed methane exploitation[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2014, 36(2): 245–248, 256.

- [19] 桑树勋, 皇凡生, 单衍胜, 等. 碎软低渗煤储层强化与煤层气地面开发技术进展[J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(1): 196–210.
SANG Shuxun, HUANG Fansheng, SHAN Yansheng, *et al.* Technology processes of enhancement of broken soft and low permeability coal reservoir and surface development of coalbed methane[J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(1): 196–210.
- [20] 申艳军, 王旭, 师庆民, 等. 榆神府矿区富油煤煤相及孔隙结构特征试验研究[J]. 煤矿安全, 2021, 52(10): 30–37, 44.
SHEN Yanjun, WANG Xu, SHI Qingmin, *et al.* Coal facies characteristics and pore structure response of oil-rich coal in Yushenfu Mining Area[J]. Safety in Coal Mines, 2021, 52(10): 30–37, 44.
- [21] 陈瑞银, 罗晓容, 陈占坤, 等. 鄂尔多斯盆地埋藏演化史恢复[J]. 石油学报, 2006, 27(2): 43–47.
CHEN Ruiyin, LUO Xiaorong, CHEN Zhankun, *et al.* Restoration of burial history of four periods in Ordos Basin[J]. Acta Petrologica Sinica, 2006, 27(2): 43–47.
- [22] MARCHIONI D, KALKREUTH W. Coal facies interpretations based on lithotype and maceral variations in Lower Cretaceous (Gates Formation) coals of Western Canada[J]. International Journal of Coal Geology, 1991, 18(12): 125–162.
- [23] OBAJE N G, LIGOUIS B. Petrographic evaluation of the depositional environments of the Cretaceous Obi/Lafia coal deposits in the Benue Trough of Nigeria[J]. Journal of African Earth Sciences, 1996, 22(2): 159–171.
- [24] 许福美, 方爱民. 山东兖州矿区太原组 16 号煤层煤相研究[J]. 煤田地质与勘探, 2005, 33(4): 10–13.
XU Fumei, FANG Aimin. Coal facies analysis upon No. 16 coal seam in Yanzhou coal mining area of Shangdong Province[J]. Coal Geology & Exploration, 2005, 33(4): 10–13.
- [25] 代世峰, 任德贻, 李生盛, 等. 内蒙古准格尔黑岱沟主采煤层的煤相演替特征[J]. 中国科学(D辑: 地球科学), 2007(S1): 119–126.
DAI Shifeng, REN Deyi, LI Shengsheng, *et al.* Coal facies succession characteristics of main coal seam in Heidaigou, Zhungeer, Inner Mongolia[J]. Science China: Earth Sciences, 2007(S1): 119–126.
- [26] 马伟竣. 鄂尔多斯盆地延川南 2 号煤层煤相分析[J]. 中国煤层气, 2014, 11(2): 25–29.
MA Weijun. Analysis of Coal Facies of No. 2 Coal Seam in Yanchuannan Block of Erdos Basin[J]. China Coalbed Methane, 2014, 11(2): 25–29.
- [27] 武志威, 郑刘根, 韩必武, 等. 张集矿山西组 1 煤层煤相及泥炭沼泽演化特征[J]. 安徽理工大学学报(自然科学版), 2022, 42(3): 65–77.
WU Zhiwei, ZHENG Liugen, HAN Biwu *et al.* Coal facies and peat swamp evolution of NO. 1 coal seam in Shanxi Formation in Zhangji Mine[J]. Journal of Anhui University of Science and Technology: Natural Science, 2022, 42(3): 65–77.
- [28] 姚艳斌, 刘大锰, 蔡益栋, 等. 基于 NMR 和 X-CT 的煤的孔裂隙精细定量表征[J]. 中国科学: 地球科学, 2010, 40(11): 1598–1607.
YAO Yanbin, LIU Dameng, CAI Yidong, *et al.* Advanced characterization of pores and fractures in coals by nuclear magnetic resonance and X-ray computed tomography[J]. Sci China Earth Sci, 2010, 40(11): 1598–1607.
- [29] 刘彦飞, 汤达祯, 许浩, 等. 基于核磁共振的煤岩孔裂隙应力变形特征[J]. 煤炭学报, 2015, 40(6): 1415–1421.
LIU Yanfei, TANG Dazhen, XU Hao, *et al.* Characteristics of the stress deformation of pore-fracture in coal based on nuclear magnetic resonance[J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(6): 1415–1421.
- [30] ZHENG S J, YAO Y, LIU D M, *et al.* Nuclear magnetic resonance surface relaxivity of coals[J]. International Journal of Coal Geology, 2019, 205: 1–13.
- [31] 田文广. 鄂尔多斯盆地东缘煤层气富集规律与控制机制研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2012.
TIAN Wenguang. CBM enrichment rules of eastern Ordos basin and controlling mechanism[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2012.
- [32] 任会康, 王安民, 李昌峰, 等. 基于核磁共振技术的低阶煤储层孔隙特征研究[J]. 煤炭科学技术, 2017, 45(4): 143–148.
REN Huikang, WANG Anmin, LI Changfeng, *et al.* Study on porosity characteristics of low-rank coal reservoirs based on nuclear magnetic resonance technology[J]. Coal Science and Technology, 2017, 45(4): 143–148.
- [33] 胡社荣, 潘响亮, 张喜臣, 等. 煤相研究方法综述[J]. 地质科技情报, 1998, 17(1): 63–67.
HU Rongshe, PAN Xiangliang, ZHANG Xichen, *et al.* Overview of research methods of coal facies[J]. Geological Science and Technology Information, 1998, 17(1): 63–67.
- [34] 李静琴, 李明培, 樊俊雷. 吐哈盆地三道岭剖面西山窑组煤层煤相分析[J]. 煤炭科学技术, 2018, 46(2): 97–102.
LI Jingqin, LI Mingpei, FAN Junlei. Analysis on coal facies of seam in Xishanyao Formation of Sandaoling Section in Turpan-Hami Basin[J]. Coal Science and Technology, 2018, 46(2): 97–102.
- [35] 雷国明, 周继兵, 张东亮, 等. 准东煤田五彩湾矿区西山窑组巨厚煤层煤相研究[J]. 新疆地质, 2012, 30(3): 347–349.
LEI Guoming, ZHOU Jibing, ZHANG Dongliang, *et al.* The coal facies research on the Xishanyao formation in the Wucuiwan coalfield Eastern Junggar Basin, Xinjiang[J]. Xinjiang Geology, 2012, 30(3): 347–349.
- [36] 李玉坤, 李广. 吐哈盆地沙尔湖煤田煤质煤岩特征及煤相分析[J]. 煤炭科学技术, 2019, 47(5): 198–205.
LI Yukun, LI Guang. Analysis on quality, Petrography and facies of coal seam in Shaerhu Coalfield of Turpan-Hami Basin[J]. Coal Science and Technology, 2019, 47(5): 198–205.
- [37] 张慧, 吴静, 袁立颖, 等. 煤中气孔的发育特征与影响因素浅析[J]. 煤田地质与勘探, 2019, 47(1): 78–85, 91.
ZHANG Hui, WU Jing, YUAN Liying, *et al.* Analysis on the development characteristics and influencing factors of gas pores in coal[J]. Coal Geology & Exploration, 2019, 47(1): 78–85, 91.