



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

黄道军 许浩 虎建玲 董煜 焦鹏帅 陈世达 周国晓 吴小卓 武衡

引用本文:

黄道军, 许浩, 虎建玲, 等. 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[J]. 煤炭科学技术, 2025, 53(3): 115–123.

HUANG Daojun, XU Hao, HU Jianling. Pore development patterns and gas control effects of No.8 deep coal seam of Ordos Basin[J]. Coal Science and Technology, 2025, 53(3): 115–123.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12438/cst.2025-0088>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

煤层微观孔隙特征及沉积环境对孔隙结构的控制作用

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

煤炭科学技术. 2024, 52(6): 142–154 <https://doi.org/10.12438/cst.2023-1112>

鄂尔多斯盆地深部煤层气差异富集的地质控制

Geological control of differential enrichment of deep coalbed methane in the Ordos Basin

煤炭科学技术. 2025, 53(1): 203–215 <https://doi.org/10.12438/cst.2024-1144>

基于机器学习的煤系致密砂岩气储层分类研究——以鄂尔多斯盆地 D J 区块为例

Research on classification of tight sandstone gas reservoir in coal measures based on machine learning: a case from DJ Block of Ordos Basin

煤炭科学技术. 2022, 50(6): 260–270 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/943e02b6-b1a4-4185-8eb5-cffe5bb019fa3>

鄂尔多斯盆地侏罗系煤田保水开采技术与应用

Technology and application of water-preserving mining in Jurassic coalfield in Ordos Basin

煤炭科学技术. 2021, 49(4): 159–168 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2021.04.019>

深部煤储层孔裂隙结构对煤层气赋存的影响

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

煤炭科学技术. 2024, 52(8): 106–123 <https://doi.org/10.12438/cst.2023-1334>

鄂尔多斯盆地石炭—二叠纪太原组煤中稀土元素地球化学特征

Geochemistry characteristics of rare earth elements in the permo-carboniferous Taiyuan Formation coal in Ordos Basin—Taking Ningdong coalfield as an example

煤炭科学技术. 2024, 52(12): 239–246 <https://doi.org/10.12438/cst.2023-1726>



关注微信公众号，获得更多资讯信息



移动扫码阅读

黄道军, 许浩, 虎建玲, 等. 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[J]. 煤炭科学技术, 2025, 53(3): 115–123.

HUANG Daojun, XU Hao, HU Jianling, *et al.* Pore development patterns and gas control effects of No.8 deep coal seam of Ordos Basin[J]. Coal Science and Technology, 2025, 53(3): 115–123.

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

黄道军¹, 许浩^{2,3}, 虎建玲¹, 董煜^{2,3}, 焦鹏帅¹, 陈世达^{2,3}, 周国晓¹, 吴小卓^{2,3}, 武衡^{2,3}

(1. 中国石油长庆油田分公司勘探开发研究院, 陕西西安 710018; 2. 中国地质大学(北京)能源学院, 北京 100083;

3. 中国地质大学(北京)煤层气开发利用国家工程中心煤储层物性实验室, 北京 100083)

摘要: 鄂尔多斯盆地内部深部8号煤分布广泛, 煤阶跨度大, 是勘探的主要目的层。然而, 目前对于盆地内部深部煤储层的孔隙发育规律及其控制因素缺乏系统、全面的理解, 尤其是在深部煤储层孔隙发育模式及其控气作用方面尚未进行深入研究。基于盆地内14口探井岩心测试分析数据, 系统分析了煤储层的孔隙发育特征和发育模式, 并探讨了其分布规律和控气作用。结果表明: 随着变质程度增加, 研究区8号深部煤储层微孔和介孔的孔体积均明显增高, 宏孔体积逐渐降低。其中, 微孔主要为气孔, 尤以孔径为0.4~0.9 nm孔隙最为发育, 介孔相对不发育。宏孔由中-低变质程度煤发育的胞腔孔和屑间孔转变为中-高变质程度煤发育的内生裂隙。由北到南随着变质程度的增加($R_{o,max}$ 为0.60%~2.86%), 盆地内8号深部煤储层孔隙发育模式可分为: 宏孔发育型、双峰发育型和微孔发育型, 其中, 宏孔发育型煤储层含气量较低, 但也含有一定比例的游离气; 双峰发育型是盆地内8号深部煤储层的主要孔隙发育模式, 该类型储层微孔、宏孔均较为发育, 最有利于吸附气和游离气的富集与产出; 微孔发育型煤储层吸附能力最强, 含气性最优, 资源潜力大, 但渗透性较差, 需采用极限压裂方式提升储层的渗透能力。

关键词: 鄂尔多斯盆地; 8号煤; 变质程度; 孔隙发育模式; 控气作用

中图分类号: P618.13 文献标志码: A 文章编号: 0253-2336(2025)03-0115-09

Pore development patterns and gas control effects of No.8 deep coal seam of Ordos Basin

HUANG Daojun¹, XU Hao^{2,3}, HU Jianling¹, DONG Yu^{2,3}, JIAO Pengshuai¹, CHEN Shida^{2,3},
ZHOU Guoxiao¹, WU Xiaozhuo^{2,3}, WU Heng^{2,3}

(1. Exploration & Development Research Institute, PetroChina Changqing Oilfield Company, Xi'an 710018, China; 2. School of Energy Resource, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China; 3. Coal Reservoir Laboratory of National Engineering Research Center of CBM Development & Utilization, China University of Geosciences, Beijing 100083, China)

Abstract: The No.8 deep coal seam in Ordos Basin is widely distributed and spans a broad range of coal ranks, making it the primary target layer for exploration. However, a systematic and comprehensive understanding of the pore development patterns and their controlling factors in deep coal reservoirs within the basin is still lacking. In particular, there has been no in-depth research conducted on the pore development models and their gas-controlling effects in these deep coal reservoirs. Focusing on core test data from 14 exploratory wells within the basin, this study systematically examines the controlling factors and development patterns of pore structures in coal reservoirs and explores their distribution patterns and gas-controlling mechanisms. The results indicate that the pore volume of micropores and meso-

收稿日期: 2025-01-16 策划编辑: 常琛 责任编辑: 宫在芹 DOI: 10.12438/cst.2025-0088

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(42172188); 中国石油天然气股份有限公司攻关性应用性科技专项资助项目(2023ZZ18); 中国石油长庆油田公司重大科技专项资助项目(2023DZZ01)

作者简介: 黄道军(1979—), 男, 湖北监利人, 高级工程师, 硕士。E-mail: hdj_cq@petrochina.com.cn

通讯作者: 许浩(1979—), 男, 河北黄骅人, 教授, 博士生导师, 博士。E-mail: xuhao600@163.com

pores in the No.8 deep coal seam reservoirs of the study area increases significantly with the progression of coal metamorphism, while the pore volume of macropores decreases gradually. Micropores are predominantly composed of gas pores, with those in the 0.4–0.9 nm range being the most developed, whereas mesopores are relatively underdeveloped. Macropores are observed to transition from cellular pores and interclast pores in coal with low to medium metamorphic degrees to endogenetic fractures in coal with medium to high metamorphic degrees. From north to south with increasing metamorphic degree ($R_{o,max}$ 0.60%–2.86%), the pore development patterns of the No.8 deep coal seam are classified into three types: macropore-dominated, dual-peak, and micropore-dominated. Macropore-dominated reservoirs exhibit lower gas content but higher permeability, favoring free gas storage and coalbed methane production. Dual-peak reservoirs represent the predominant pore development pattern, where both micropores and macropores are well-developed, creating optimal conditions for adsorbed and free gas enrichment and production. Micropore-dominated reservoirs demonstrate the strongest adsorption capacity, superior gas content, and substantial resource potential, but require extreme fracturing techniques to enhance permeability.

Key words: Ordos Basin; No.8 coal seam; metamorphic degree; pore development pattern; gas controlling mechanisms

0 引言

近年来,随着深部煤层气勘探开发的逐渐深入,深部煤储层已经显现出“高储层能量、高含气量、高游离含量”等优势,同时也面临着“高地应力、特低渗透率、产量递减快”等问题^[1-3]。压裂规模的提升在工程技术上有效解决了以上问题,实现了深部煤层气开发的突破^[4]。研究认为,地质-工程一体化必将成为其实现效益勘探开发的关键^[5]。如何针对不同类型储层制定适配性的开发方案是亟需解决的问题。

煤储层孔隙系统是深部煤层吸附气和游离气赋存与产出的主要空间,是储层评价的关键要素^[6-10],前人已经对煤储层的孔隙类型和成因机制进行了深入研究^[11-14]。深部条件下,由于垂向应力成为绝对主导,煤层处于高度压缩状态,导致深部煤层较浅部更为致密,孔渗条件更差^[15],因此,系统研究深部煤层的孔隙差异发育规律更为重要。

鄂尔多斯盆地内部深部 8 号煤储层分布广泛,煤阶跨度大,对其孔隙发育规律以及与煤层气富集产出的关系缺乏系统、全面的理解,尤其是在深部煤储层孔隙发育模式及其控气作用方面尚未进行深入研究。因此,笔者以鄂尔多斯盆地深部 8 号煤储层为研究对象,采用高压压汞、低温 N_2 吸附、 CO_2 吸附试验、场发射扫描电镜、等温吸附等多种测试手段,系统分析煤储层微观孔隙系统的发育模式与分布规律,深入探讨其对甲烷富集产出的控制机制,旨在为鄂尔多斯盆地内部不同类型储层的深部煤层气勘探开发提供科学依据。需要指出的是,研究聚焦于深部煤层气的微观孔隙系统发育模式与控气作用的关系,未系统考虑深部储层特有的高温-高压-高地应力三场耦合作用对孔隙结构的改造效应。

1 地质概况

鄂尔多斯盆地位于华北板块西侧,是我国最大的沉积盆地之一^[16],分为伊盟隆起、西缘逆冲带、天环坳陷、伊陕斜坡、晋西挠褶带、渭北隆起 6 个一级构造单元。该盆地含煤面积大,煤层气资源丰富^[17-19]。前期勘探开发主要集中于盆地东缘晋西挠褶带^[20]。近年来,随着技术进步和勘探经验的积累,鄂尔多斯盆地深部煤层气勘探开发取得显著成功,并逐渐向盆内发展。中国石油长庆油田分公司按照源内勘探的思路,全面开展深部煤层气资源勘探,取得了良好的勘探效果。盆地内部的纳林、米脂北、绥德等区块实施了 30 余口深部勘探开发井,多数井初期日产气量在 10万 m^3 以上,稳产在 5万 m^3 以上。研究区块位于鄂尔多斯盆地中东部,横跨伊盟隆起与伊陕斜坡(图 1),本溪组 8 号煤层埋深主体处于 $1\ 800\sim 4\ 000\text{ m}$,厚度 $3\sim 10\text{ m}$,部分厚度可达 15 m 以上,总体具有北厚南薄的分布特征。

2 煤样采集与试验方法

本次研究系统采集了鄂尔多斯盆地中东部 14 口探井的 24 块煤样,取样深度为 $1\ 249\sim 3\ 636\text{ m}$ 。煤样最大镜质体反射率($R_{o,max}$)分布在 $0.60\%\sim 2.86\%$,显微组分中镜质组占绝对优势($59.2\%\sim 98.4\%$),水分质量分数较低($0.43\%\sim 7.16\%$),灰分质量分数差异较大($3.76\%\sim 26.89\%$),煤体结构以原生结构煤为主(表 1)。

研究采用了多种试验方法,从成因和尺度上对孔隙进行精细刻画,以获得更为全面和深入的信息。使用 Tescan Vega 2 型场发射扫描电子显微镜观察煤样的微观形貌,电子显微镜放大倍数达 $4\sim 100\ 000$ 倍,能够对孔径 $<1\ \mu\text{m}$ 的孔隙结构进行识别,并划分孔隙成因类型。

使用 AutoPore IV 9510 型压汞仪,遵循 GB/T

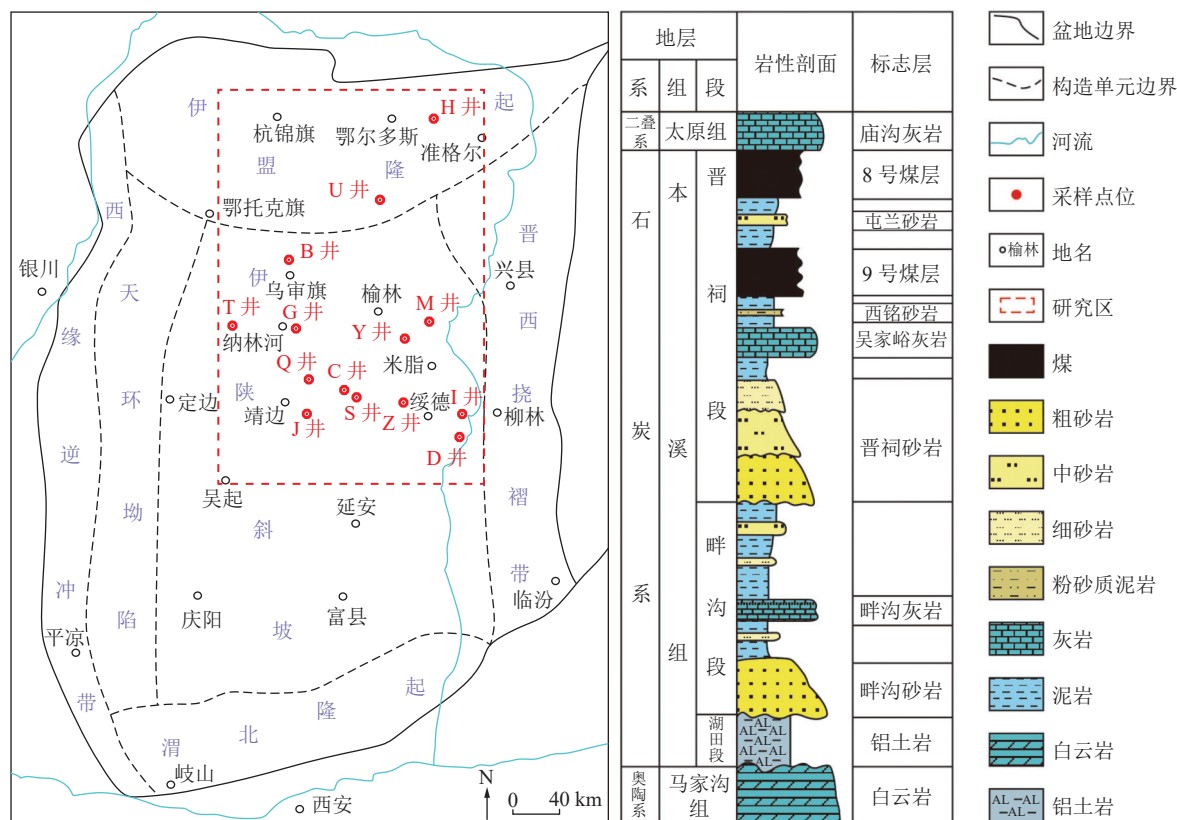


图1 鄂尔多斯盆地构造分区与盆地中东部本溪组地层柱状图(修改自文献[21])

Fig.1 Structural subdivisions of the Ordos Basin and stratigraphic column of the Benxi Formation in the central-eastern basin
(Modified according to Reference[21])

29171—2012《岩石毛管压力曲线的测定》,进行高压压汞试验。压汞法基于毛细管现象,通过施加外部压力将液态汞注入孔隙中。孔径分布与进汞压力的关系由 Washburn 方程计算得到,获取毛细管压力曲线、孔喉分布、排驱压力等关键数据,可以对孔径 $>4\text{ nm}$ 的孔径分布进行表征和评价。

使用美国 Micromeritics 公司生产的 ASAP 2020 型全自动气体吸附仪进行低温 N_2 吸附和 CO_2 吸附试验, 遵循国家标准 GB/T 19587—2017《气体吸附 BET 法测定固态物质比表面积》。低温 N_2 吸附法利用 N_2 在低温条件下 (77 K) 易发生吸附现象与毛细凝聚现象的原理, 当相对压力 p/p_0 介于 0.05 ~ 0.35 时, 使用 Brunauer-Emmett-Teller 多分子层吸附公式计算煤样孔隙的比表面积; 当相对压力 $p/p_0 > 0.4$ 时, 使用 Barret-Joynerand-Halenda 方程计算煤样孔隙的孔体积与分布。通过低温 N_2 吸附法, 可以实现对直径为 2 ~ 600 nm 的介孔和部分宏孔进行表征和评价。由于低温 N_2 吸附法对微孔的表征精度较差, 因此, 使用分子直径更小的 CO_2 代替 N_2 在 273 K 条件下进行测试。通过 Dubinin-Radushkevich 和 Dubinin-Astakhov 方程可以计算孔径 < 2 nm 的孔

隙体积和比表面积。

使用 ISO-300 等温吸附试验系统进行高温高压等温吸附试验, 测试遵循 GB/T 19560—2008《煤的高压等温吸附试验方法》。该试验系统可提供最大温度 100 ℃、最大吸附平衡压力 34.5 MPa 的测试条件。基于鄂尔多斯盆地深部 8 号煤层的试井温度与储层压力实测值, 设置试验温压条件温度 70 ℃, 压力 0~29 MPa。

3 孔隙分类及发育特征分析

3.1 孔隙分类依据及特征

根据孔隙成因,可将鄂尔多斯盆地深部 8 号煤储层孔隙划分为有机孔和无机孔 2 大类。其中有机孔又包括原生孔和后生孔。原生孔包括丝质体中的胞腔孔以及碎屑有机质间的屑间孔。胞腔孔在变质程度较低的惰质组丝质体里保存较为完好,排列有序,并遭受一定程度的矿物充填(图 2a)。屑间孔在中等变质程度中较为常见,无一定形态,以不规则为主,孔的大小小于碎屑体(图 2b)。后生孔主要指气孔,属于次生孔隙,气孔形状以圆形为主,有成群成带发育的特点(图 2c)。无机孔主要发育黏土矿物晶

表 1 煤样基础信息和参数
Table 1 Basic information and parameters of coal samples

井号	煤样编号	深度/m	层位	$R_{o,max}/\%$	工业分析/%				显微组分/%		
					M_{ad}	A_{ad}	V_{ad}	FC_{ad}	镜质组	惰质组	壳质组
Z井	Z1	2 522.0	本溪组	1.93	0.44	18.84	12.42	68.30	94.3	5.2	0.5
	Z2	2 523.3	本溪组	2.12	0.52	13.01	10.47	76.00	82.8	17.0	0.2
M井	M1	2 425.2	本溪组	1.84	0.98	12.69	12.16	74.17	59.2	38.3	2.3
Q井	Q1	3 260.1	本溪组	1.65	0.89	12.94	7.64	78.53	77.0	23.0	0
T井	T2	3 636.6	本溪组	1.96	0.59	23.09	10.53	65.79	88.7	10.9	0.4
U井	U1	2 582.1	本溪组	0.99	0.64	13.91	27.60	57.85	76.0	20.7	3.3
	U2	2 608.1	本溪组	1.06	0.78	5.44	24.89	68.89	77.2	19.7	3.1
D井	D1	2 254.1	本溪组	2.79	1.81	17.05	5.99	75.15	86.5	13.3	0.2
	D2	2 255.0	本溪组	2.76	1.50	12.50	6.10	79.90	80.8	19.0	0.2
	D3	2 256.3	本溪组	2.86	1.85	12.54	6.11	79.50	69.4	30.6	0
J井	J1	3 403.8	本溪组	1.90	0.72	11.98	11.01	76.29	64.7	35.3	0
	J2	3 403.4	本溪组	1.79	0.64	13.60	12.13	73.63	79.3	20.7	0
	J3	3 402.4	本溪组	1.81	0.63	5.29	13.23	80.85	61.4	38.6	0
Y井	Y1	2 472.1	本溪组	2.09	1.21	8.50	5.88	84.41	70.8	29.2	0
	Y2	2 473.4	本溪组	2.17	1.13	24.68	7.49	66.70	77.0	23.0	0
C井	C1	2 610.7	本溪组	1.61	1.67	14.47	11.53	72.33	83.2	14.1	2.7
	C2	2 611.7	本溪组	1.59	1.45	8.14	11.80	78.61	80.9	17.3	1.8
	S1	2 471.4	本溪组	1.80	0.51	11.16	9.55	78.78	86.3	10.5	3.2
S井	S2	2 471.7	本溪组	1.80	0.46	26.89	10.77	61.88	73.0	25.4	1.0
	S3	2 472.4	本溪组	1.82	0.61	4.49	8.35	86.55	89.2	8.0	2.8
B井	B1	3 277.5	本溪组	1.57	0.43	16.46	13.08	70.03	98.4	1.6	0
H井	H1	1 249.4	太原组	0.60	7.16	16.08	32.37	44.39	79.7	14.6	5.7
I井	I1	2 421.0	本溪组	2.58	0.48	3.76	5.90	89.86	63.8	35.6	0.6
G井	G1	3 187.0	本溪组	2.07	0.79	22.23	10.93	66.05	81.7	18.3	0

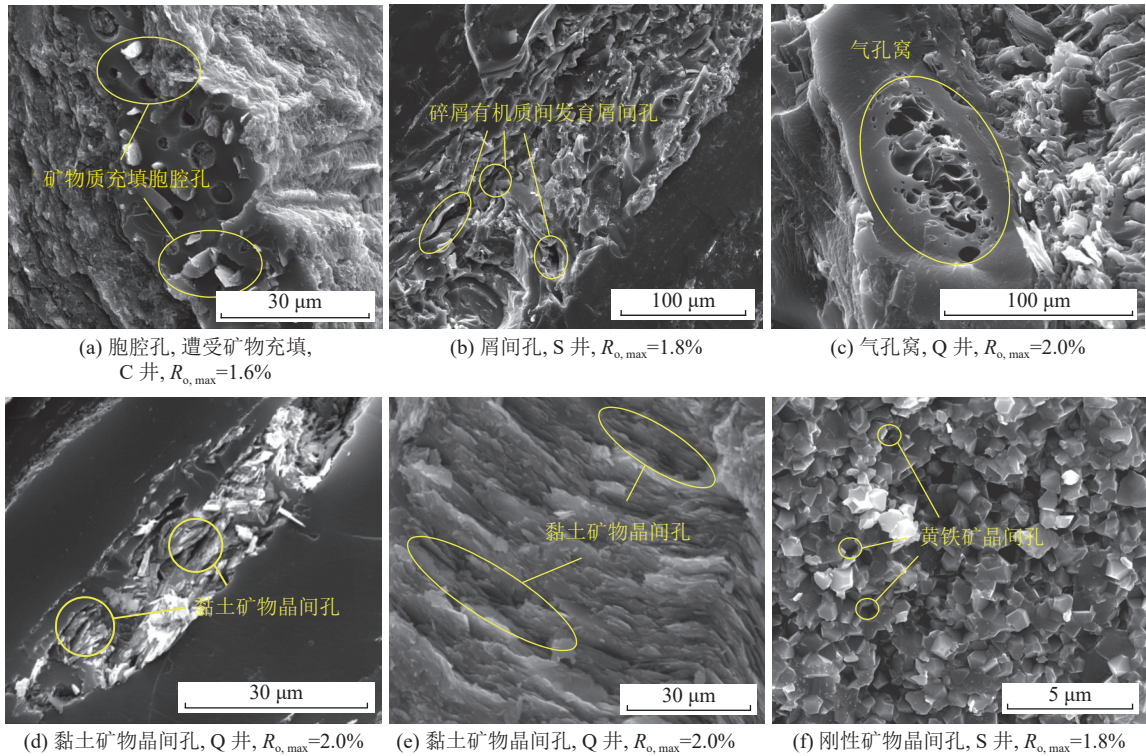


图 2 场发射扫描电镜观察的孔隙结构特征

Fig.2 Pore structure characteristics observed by field emission scanning electron microscopy

间孔(图 2d、图 2e)和黄铁矿晶间孔(图 2f)。

3.2 各尺度孔隙发育特征

依据国际纯粹与应用化学联合会(IUPAC)的分类标准对孔隙尺度类型进行划分^[22],将孔隙划分为微孔(孔径<2 nm)、介孔(孔径 2 ~ 50 nm)和宏孔(孔径>50 nm)。

3.2.1 微孔发育特征

分析对比盆地不同地区深部 8 号煤样的 CO₂ 吸附等温曲线,发现曲线形态基本一致,整体呈上凸状。吸附量与相对压力 p/p_0 呈现近似对数关系(图 3),当 $p/p_0<0.01$ 时,吸附量增加迅速,当 $p/p_0>0.01$ 时,增加速度放缓。

微孔气体吸附量整体较高,但不同煤样吸附量有较大差异。变质程度最高的 D2 样品吸附量最大,可达 21 mL/g。根据 DR 方程与 DA 方程计算微孔比表面积与孔体积(表 2),D2 煤样比表面积

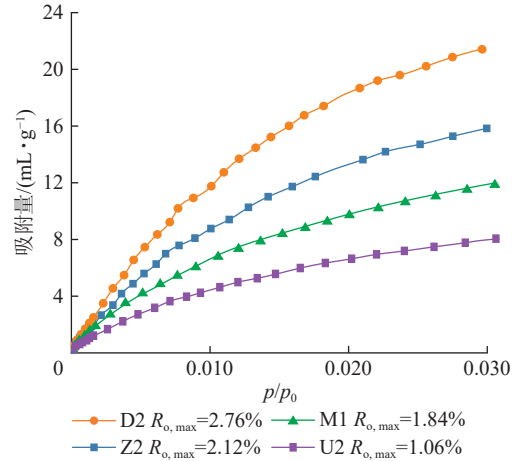


图 3 煤样二氧化碳吸附曲线

Fig.3 CO₂ adsorption isotherms of coal samples

(276.720 m²/g)与孔体积(0.081 cm³/g)同样高于 Z2、U2 与 M1 煤样,说明变质程度越高,微孔发育程度越好,有利于气体吸附。

表 2 CO₂ 吸附法和 N₂ 吸附法联测的孔隙特征

Table 2 Pore structure characteristic measured by CO₂ adsorption and N₂ adsorption method

煤样编号	$R_{0,max}/\%$	CO ₂ 吸附		N ₂ 吸附	
		比表面积/(m ² ·g ⁻¹)	孔体积/(cm ³ ·g ⁻¹)	比表面积/(m ² ·g ⁻¹)	孔体积/(cm ³ ·g ⁻¹)
D2	2.76	276.720	0.081	13.633	0.011 0
M1	1.84	112.879	0.041	1.357	0.005 1
U2	1.06	84.732	0.027	0.954	0.003 0
Z2	2.12	159.349	0.051	0.902	0.004 0

根据 CO₂ 吸附曲线计算微孔比表面积随孔径变化率,由图 4 可知,鄂尔多斯盆地深部 8 号煤样微孔呈“三峰式”分布特征,不同孔径段对比表面积和孔容的贡献率有所差异。其中,峰 1 的孔径分布区间

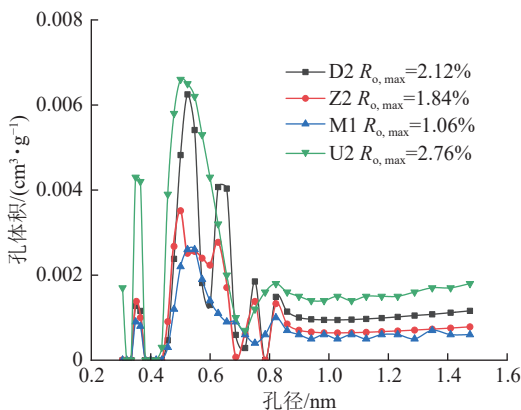


图 4 不同变质程度微孔体积分布曲线特征

Fig.4 Characteristics of micropore volumn distribution curves at different degrees of metamorphic

极窄,为 0.3 ~ 0.4 nm;峰 2 是微孔的主要分布区间,为 0.45 ~ 0.7 nm,贡献了绝大部分孔容,以 D2 煤样为例,孔径为 0.5 nm 的微孔最为发育,孔容可达 0.006 6 cm³/g,远高于其他井煤样;峰 3 为 0.8 ~ 0.9 nm,该区间微孔发育程度相对较差。

煤储层孔隙发育受显微组分和灰分等物质构成影响,由于有机孔是煤储层的主要孔隙类型,为了研究有机孔发育的主控因素,选取了低灰分产率的煤样进行对比分析,另外,研究区 8 号煤显微组分由镜质组和惰质组构成,且镜质组含量占绝对优势,因此,孔隙发育控制因素研究是在物质构成基本一致的情况下进行的。结果发现,随着煤变质程度升高,微孔的孔体积明显增高(图 5)。结合图 4 发现,随着 $R_{0,max}$ 的增高,第 2 个主峰区间(0.45 ~ 0.7 nm)对应的孔体积增量最为明显。推测此类孔隙主要为气孔,是吸附态甲烷储集的主要空间。

3.2.2 介孔发育特征

根据 8 号深部煤样的 N₂ 吸附等温曲线,对介

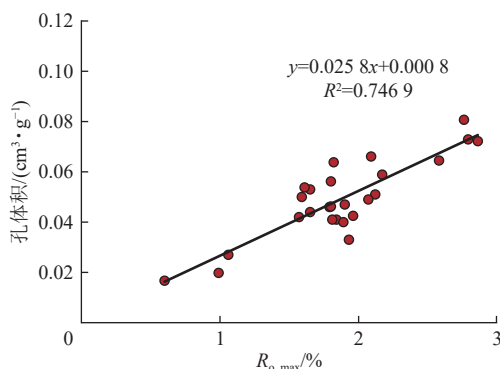


图 5 变质程度控制下的微孔体积变化特征

Fig.5 Changes in micropore volume controlled by degrees of metamorphic

孔孔径分布特征进行表征发现,不同 $R_{o, \max}$ 煤样介孔体积峰值差异明显,但发育区间相同,均在 3 ~ 5 nm 区间。据表 2 可知,介孔比表面积为 0.902 ~ 13.633 m²/g,远低于微孔比表面积 (84.732 ~ 276.720 m²/g),介孔体积为 0.003 ~ 0.011 cm³/g,同样远低于微孔体积 (0.027 ~ 0.081 cm³/g)。因此,与微孔的气体吸附量相比,介孔对气体的吸附能力相对较弱,说明不是吸附态甲烷储集的主要空间。但介孔同样受煤变质程度影响,低变质程度煤中介孔体积相对较低,U2 煤样 ($R_{o, \max}=0.99\%$) 孔体积为 0.003 cm³/g,随着变质程度的增高,煤样介孔体积显著升高,D2 煤样孔体积可达 0.011 cm³/g。

3.2.3 宏孔发育特征

根据压汞曲线计算得出不同变质程度的煤样宏孔区间孔径分布特征(图 6),对比发现,随着 $R_{o, \max}$ 的升高,宏孔体积降低,U1 煤样 ($R_{o, \max}=0.99\%$) 宏孔区间孔隙体积峰值可达 0.02 cm³/g,而 D3 煤样 ($R_{o, \max}=2.86\%$) 宏孔区间孔隙体积峰值仅为 0.005 cm³/g。同时,孔径分布峰值也有明显的向左偏移趋势。宏孔

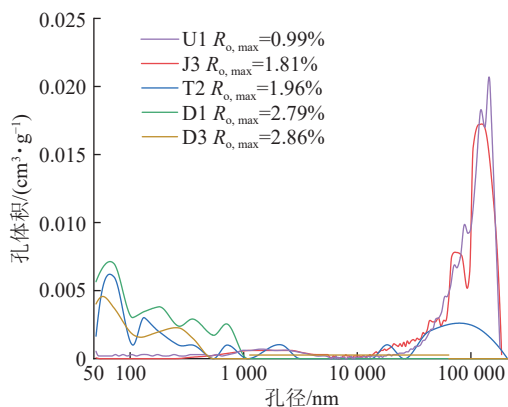


图 6 不同变质程度宏孔孔径分布曲线特征

Fig.6 Characteristics of macropore size distribution curves at different degrees of metamorphic

呈现“两段式”分布,变质程度较低的煤储层宏孔孔径集中在 10 ~ 100 μm,变质程度较高的煤储层宏孔孔径集中在 50 ~ 1 000 nm。该类孔隙是游离气的主要储集空间。

4 孔隙发育模式与控气作用

4.1 孔隙发育模式

结合高压压汞、低温 N₂ 吸附和 CO₂ 吸附的联合测试结果,充分考虑不同孔隙测试方法的优势区间:在微孔区间采用 CO₂ 吸附数据,在介孔区间采用 N₂ 吸附数据,在宏孔区间采用高压压汞数据,从而对全孔径尺度的孔隙发育模式进行了综合表征。由于选取低灰分产率和显微组分相近的煤样进行测试分析,所以同一口井煤样测试结果虽然具有离散性但幅度不大,分析过程中将同一煤层煤样测试数据取平均值。总的来看,盆地内深部煤储层非均质性极强,介孔普遍发育较差,微孔与宏孔发育特征差异明显。基于研究区 14 口井的孔体积随孔径分布变化特征,划分出 3 种孔隙发育综合模式。分别为宏孔发育型、双峰发育型和微孔发育型(图 7)。

宏孔发育型即宏孔体积峰值远高于微孔和介孔体积峰值,根据联测的全孔径孔体积分布特征计算,该类型煤储层孔隙体积最高。以 U2 煤样为例,微孔相对发育较差,宏孔贡献了绝大部分孔容,宏孔体积峰值可达 0.011 cm³/g。该类型对应煤储层变质程度较低,宏孔主要为胞腔孔、屑间孔和刚性矿物晶间孔,发育少量黏土矿物晶间孔,气孔不发育。

双峰发育型即宏孔体积峰值与微孔体积峰值接近,根据联测的全孔径孔体积分布特征计算,该类型煤储层孔隙体积相对较低,但内生裂隙最为发育。以 Q1 煤样为例,微孔与宏孔均较为发育,微孔体积峰值可达 0.003 7 cm³/g,对应孔径 0.500 8 nm,而宏孔体积峰值为 0.002 3 cm³/g,对应孔径为 84 853 nm,微孔与宏孔共同贡献了绝大部分的孔容。该类型煤储层变质程度增加,形成了大量微孔级气孔。

微孔发育型即微孔体积峰值远高于宏孔体积峰值,根据联测的全孔径孔体积分布特征计算,该类型煤储层孔隙体积次之。以 Z2 煤样为例,微孔最为发育,孔体积峰值为 0.006 3 cm³/g,对应孔径 0.523 9 nm,微孔贡献了绝大部分孔容。该类型煤储层变质程度最高,微孔主要为生气过程中产生的气孔,但该阶段由于割理融退作用,内生裂隙不发育,刚性矿物晶间孔与胞腔孔受压实作用破坏,宏孔整体发育较差。

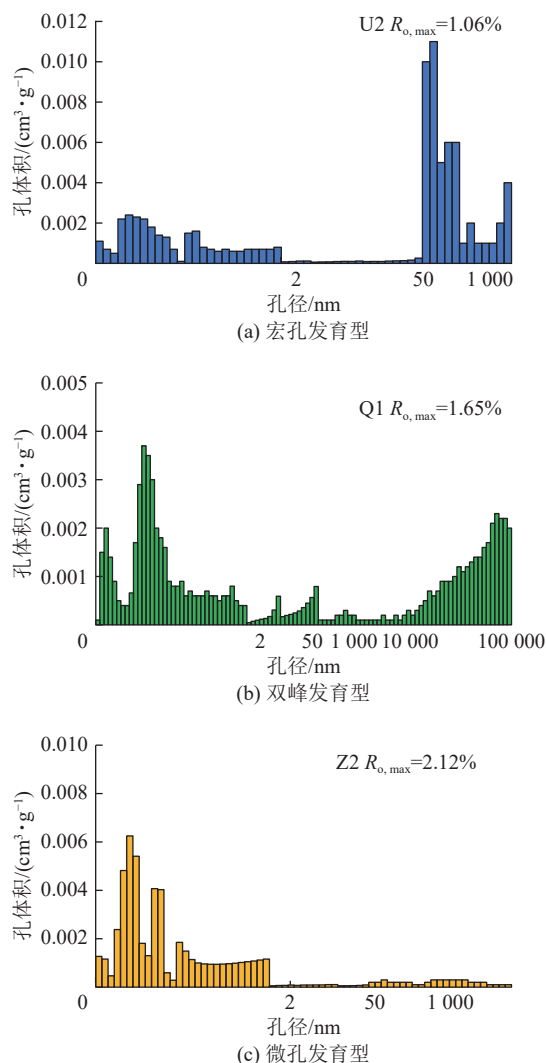


图 7 高压压汞、 N_2 吸附和 CO_2 吸附联测的全孔径孔体积分布特征

Fig.7 Distribution characteristics of pore volume measured by mercury intrusion porosimetry, N_2 adsorption and CO_2 adsorption methods in full scale

总体上,研究区 8 号深部煤储层随着变质程度的升高,孔隙发育模式由宏孔发育型逐渐转变为双峰发育型,并在高变质阶段最终转化为微孔发育型。

4.2 控气作用

基于 8 号深部煤样孔隙综合表征结果,对盆地内 14 口井的孔隙发育模式进行了分类(图 8)。整体而言,孔隙发育模式呈现出明显的区域分布规律,而变质程度是其主要控制因素。其中,双峰发育型是研究区主要孔隙发育模式,集中分布于研究区中部米脂、榆林一带,部分煤储层表现为宏孔发育型和微孔发育型,分别位于盆地北部准格尔一带和东南部绥德一带。

宏孔发育型煤储层的吸附能力有限,加上变质程度较低,通常储层含气量较低,但其煤层厚度较大,

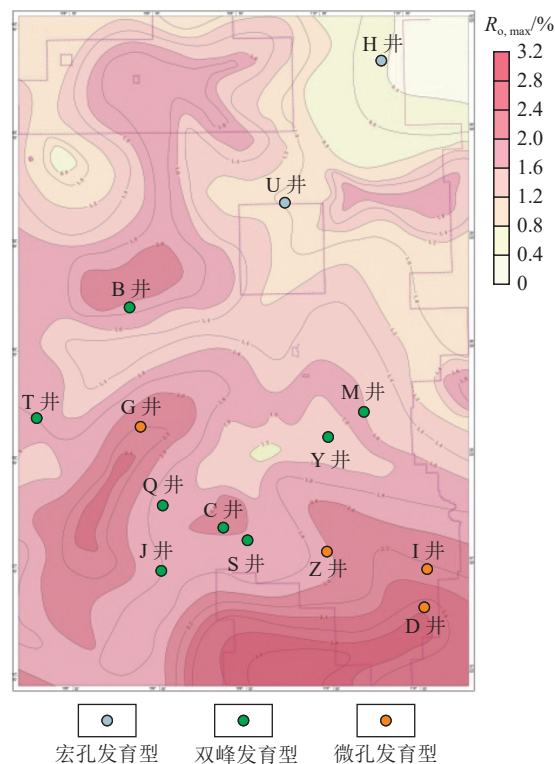


图 8 鄂尔多斯盆地孔隙发育模式区域分布特征

Fig.8 Regional distribution characteristics of pore development patterns in the Ordos Basin

渗透率较高,在保存条件较好的情况下有利于游离气的富集,同样具有很好的开发潜力。以 U 井岩心为例,其煤层厚度 12 m,实测含气量为 $6.98 \text{ m}^3/\text{t}$,计算游离气含量为 11.66%。

双峰发育型煤储层发育大量的微孔,有利于吸附气的富集,同时,由于深部煤储层的保存条件优于浅部储层,大量发育的宏孔有利于游离气的储集,此外,宏孔也为煤层中气体运移与产出提供了主要通道。等温吸附试验与现场取心含气量测试结果表明,该类储层含气量为 $14.67 \sim 25.68 \text{ m}^3/\text{t}$,游离气占比为 14.81%~31.95%。试采表明,Y 井和 M 井的日产气量分别达到 10.9 万 m^3 和 13.6 万 m^3 ,说明该类型储层对于深部煤层气富集和产出具有双重作用。

微孔发育型煤储层具有最大的吸附能力,有利于吸附气的富集。根据现场取心测试数据(表 3),实测含气量普遍可达 $22.0 \text{ m}^3/\text{t}$ 以上,变质程度最高的 D 井岩心含气量高达 $30.86 \text{ m}^3/\text{t}$,说明该类储层资源潜力大。然而,由于该类型储层宏孔不发育,缺少渗透通道,渗透率极低,不利于煤层气的产出。因此,在对该类储层中丰富的煤层气资源进行开发时,需采用极限压裂方式,实现裂缝的最大化延伸,从而提升储层的渗透能力和开发效率。

表 3 岩心现场含气量解吸测试结果及游离气占比统计
Table 3 Results of on-site gas content desorption tests and free gas proportion statistics

分类	井号	$R_{0, \max}/\%$	含气量/($\text{m}^3 \cdot \text{t}^{-1}$)	Langmuir 体积/($\text{m}^3 \cdot \text{t}^{-1}$)	游离气占比/%
宏孔发育型	U	0.60 ~ 1.06	6.98	6.89	11.66
	B		14.67	13.79	14.81
	Y		23.86	20.54	24.16
双峰发育型	Q	1.57 ~ 2.17	20.67	—	—
	M		23.46	—	—
	C		23.23	22.36	16.26
	S		25.68	21.83	31.95
微孔发育型	Z	1.93 ~ 2.86	22.03	—	—
	D		30.86	28.27	26.20
	I		25.88	27.06	12.27

5 结 论

1)随着变质程度的增加,鄂尔多斯盆地内 8 号深部煤储层微孔和介孔体积均明显增高,宏孔体积逐渐降低。其中,微孔主要为气孔和黏土矿物晶间孔,呈“三峰式”分布特征,孔径 0.45 ~ 0.70 nm 是微孔的集中分布区间,是吸附态甲烷储集的主要空间;介孔成因类型与微孔相同,主要发育在孔径 3 ~ 5 nm 区间,但其孔体积和比表面积远低于微孔,整体不发育;宏孔主要为胞腔孔、屑间孔、刚性矿物晶间孔和内生裂隙等,变质程度较低的煤储层中宏孔主要为胞腔孔、屑间孔,而中变质程度的煤储层中宏孔主要为内生裂隙。

2)鄂尔多斯盆地内 8 号深部煤储层划分为 3 种孔隙发育模式,由北向南随着变质程度增加,呈现出宏孔发育型-双峰发育型-微孔发育型的区域分布规律。其中,宏孔发育型煤储层含气量较低,但也含有一定比例的游离气;双峰发育型是盆地内 8 号深部煤储层的主要孔隙发育模式,该类型储层微孔、宏孔均较为发育,最有利于吸附气和游离气的富集与产出;微孔发育型煤储层吸附能力最强,含气性最优,资源潜力大,但渗透性较差,需采用极限压裂方式提升储层的渗透能力。

参考文献(References):

[1] 秦勇. 中国深部煤层气地质研究进展[J]. 石油学报, 2023, 44(11): 1791-1811.
QIN Yong. Progress on geological research of deep coalbed methane in China[J]. Acta Petrolei Sinica, 2023, 44(11): 1791-1811.
[2] 邓泽, 王红岩, 姜振学, 等. 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[J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(8): 106-123.

DENG Ze, WANG Hongyan, JIANG Zhenxue, et al. 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[J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(8) : 106-123.
[3] 石军太, 曹敬添, 徐凤银, 等. 深部煤层气游离气饱和度计算模型及其应用[J]. 煤田地质与勘探, 2024, 52(2): 134-146.
SHI Juntao, CAO Jingtian, XU Fengyin, et al. A calculation model of free gas saturation in deep coalbed methane reservoirs and its application[J]. Coal Geology & Exploration, 2024, 52(2) : 134-146.
[4] 陈世达, 汤达祯, 侯伟, 等. 深部煤层气地质条件特殊性与储层工程响应[J]. 石油学报, 2023, 44(11): 1993-2006.
CHEN Shida, TANG Dazhen, HOU Wei, et al. Geological particularity and reservoir engineering response of deep coalbed methane[J]. Acta Petrolei Sinica, 2023, 44(11): 1993-2006.
[5] 李勇, 汤达祯, 许浩, 等. 鄂尔多斯盆地东缘煤层气构造控气特征[J]. 煤炭科学技术, 2014, 42(6): 113-117, 129.
LI Yong, TANG Dazhen, XU Hao, et al. Characteristics of structural controlled coalbed methane in east margin of Ordos basin[J]. Coal Science and Technology, 2014, 42(6): 113-117, 129.
[6] 李松, 汤达祯, 许浩, 等. 深部煤层气储层地质研究进展[J]. 地学前缘, 2016, 23(3): 10-16.
LI Song, TANG Dazhen, XU Hao, et al. Progress in geological researches on the deep coalbed methane reservoirs[J]. Earth Science Frontiers, 2016, 23(3): 10-16.
[7] 姚艳斌, 刘大锰, 黄文辉, 等. 两淮煤田煤储层孔-裂隙系统与煤层气产出性能研究[J]. 煤炭学报, 2006, 31(2): 163-168.
YAO Yanbin, LIU Dameng, HUANG Wenhui, et al. Research on the pore-fractures system properties of coalbed methane reservoirs and recovery in Huainan and Huaibei coal-fields[J]. Journal of China Coal Society, 2006, 31(2): 163-168.
[8] 刘玉龙, 汤达祯, 许浩, 等. 煤岩类型控制下的微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 litho-

- types[J]. *Coal Engineering*, 2016, 48(11): 107–110.
- [9] 徐凤银, 聂志宏, 孙伟, 等. 鄂尔多斯盆地东缘深部煤层气高效开发理论技术体系[J]. *煤炭学报*, 2024, 49(1): 528–544.
- XU Fengyin, NIE Zhihong, SUN Wei, et al. Theoretical and technological system for Highly efficient development of deep coalbed methane in the Eastern edge of Erdos Basin[J]. *Journal of China Coal Society*, 2024, 49(1): 528–544.
- [10] 张松航, 汤达祯, 唐书恒, 等. 鄂尔多斯盆地东缘煤储层微孔隙结构特征及其影响因素[J]. *地质学报*, 2008, 82(10): 1341–1349.
- ZHANG Songhang, TANG Dazhen, TANG Shuheng, et al. The characters of coal beds micropores and its influence factors in the eastern margin of Ordos basin[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2008, 82(10): 1341–1349.
- [11] 张慧. 煤孔隙的成因类型及其研究[J]. *煤炭学报*, 2001, 26(1): 40–44.
- ZHANG Hui. Genetical type of pores in coal reservoir and its research significance[J]. *Journal of China Coal Society*, 2001, 26(1): 40–44.
- [12] 唐淑玲, 汤达祯, 杨焦生, 等. 鄂尔多斯盆地大宁—吉县区块深部煤储层孔隙结构特征及储气潜力[J]. *石油学报*, 2023, 44(11): 1854–1866, 1902.
- TANG Shuling, TANG Dazhen, YANG Jiaosheng, et al. Pore structure characteristics and gas storage potential of deep coal reservoirs in Daning-Jixian block of Ordos Basin[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2023, 44(11): 1854–1866, 1902.
- [13] 张慧, 王晓刚. 煤的显微构造及其储集性能[J]. *煤田地质与勘探*, 1998, 26(6): 34–37, 75.
- ZHANG Hui, WANG Xiaogang. Microstructures of coal and their reservoir property[J]. *Coal Geology & Exploration*, 1998, 26(6): 34–37, 75.
- [14] 秦勇. 中国高煤级煤的显微岩石学特征及结构演化[M]. 徐州: 中国矿业大学社, 1994: 202.
- [15] 许浩, 汤达祯, 陶树, 等. 深、浅部煤层气地质条件差异性及其形成机制[J]. *煤田地质与勘探*, 2024, 52(2): 33–39.
- XU Hao, TANG Dazhen, TAO Shu, et al. Differences in geological conditions of deep and shallow coalbed methane and their formation mechanisms[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2024, 52(2): 33–39.
- [16] 任战利, 祁凯, 李进步, 等. 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[J]. *石油与天然气地质*, 2021, 42(5): 1030–1042.
- REN Zhanli, QI Kai, LI Jinbu, et al. Thermodynamic evolution and hydrocarbon accumulation in the Ordos basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2021, 42(5): 1030–1042.
- [17] 秦勇, 袁亮, 胡千庭, 等. 我国煤层气勘探与开发技术现状及发展方向[J]. *煤炭科学技术*, 2012, 40(10): 1–6.
- QIN Yong, YUAN Liang, HU Qianting, et al. Status and development orientation of coal bed methane exploration and development technology in China[J]. *Coal Science and Technology*, 2012, 40(10): 1–6.
- [18] 张君峰, 毕彩芹, 汤达祯, 等. 中国煤层气勘探开发探索与实践[M]. 北京: 地质出版社, 2020.
- [19] 谢英刚, 孟尚志, 万欢, 等. 临兴地区煤系地层多类型天然气储层地质条件分析[J]. *煤炭科学技术*, 2015, 43(9): 71–75, 143.
- XIE Yinggang, MENG Shangzhi, WAN Huan, et al. Analysis on geological conditions of multi type natural gas reservoir in coal measure strata of Linxing Area[J]. *Coal Science and Technology*, 2015, 43(9): 71–75, 143.
- [20] 高向东, 孙昊, 王延斌, 等. 临兴地区深部煤储层地应力场及其对压裂缝形态的控制[J]. *煤炭科学技术*, 2022, 50(8): 140–150.
- GAO Xiangdong, SUN Hao, WANG Yanbin, et al. In-situ stress field of deep coal reservoir in Linxing Area and its control on fracturing crack[J]. *Coal Science and Technology*, 2022, 50(8): 140–150.
- [21] 刘新社, 黄道军, 虎建玲, 等. 鄂尔多斯盆地中东部地区石炭系本溪组煤岩气储层特征[J]. *天然气工业*, 2024, 44(10): 51–62.
- LIU Xinshe, HUANG Daojun, HU Jianling, et al. Reservoir characteristics of Carboniferous Benxi Formation coal-rock gas in the central and eastern Ordos Basin[J]. *Natural Gas Industry*, 2024, 44(10): 51–62.
- [22] ROUQUEROL J, AVNIR D, FAIRBRIDGE C W, et al. Recommendations for the characterization of porous solids (technical report)[J]. *Pure and Applied Chemistry*, 1994, 66(8): 1739–1758.