

鄂尔多斯盆地上古生界本溪组8#煤岩煤岩气与致密砂岩气主要气藏特征对比

李明瑞^{1,2}, 史云鹤^{1,3}, 范立勇^{1,3}, 戴贤铎^{1,3}, 荆雪媛^{1,3}, 张沂⁴

(1. 低渗透油气田勘探开发国家工程实验室, 陕西 西安 710018; 2. 中国石油长庆油田公司勘探事业部, 陕西 西安 710018; 3. 中国石油长庆油田公司勘探开发研究院, 陕西 西安 710018; 4. 中国石油长庆油田公司采气一厂, 陕西 西安 710018)

摘要:鄂尔多斯盆地长庆油田在盆内煤岩气领域取得了良好的勘探进展,发现CH₄多以吸附态和游离态赋存于煤岩中,形成自生自储型煤岩气藏。针对上古生界本溪组8#煤岩为代表的煤岩气藏特征进行了深入研究。结果表明:鄂尔多斯盆地自上而发育10套煤岩,其中5#和8#煤岩为主力煤岩,分布稳定,厚度大。本溪组煤岩气相较于浅层煤层气表现出“高压、高温、高含气、高饱和、高游离”等5高特征。气藏平均地层压力22~35 MPa,压力高但压力系数为1.0~1.1,为正常压力系统。气藏平均地层温度为67~92 °C,地温梯度为29.4 °C/km,属于正常地温梯度。气体组分中CH₄含量平均值为96.92%,C₂H₆含量平均值为0.61%,CO₂含量平均值为0.85%,N₂含量平均值为1.47%,为干气气藏。气藏地层水矿化度为41 644~89 776 mg/L,平均值为62 228 mg/L,为CaCl₂型原生地层水,未受浅层水的影响。煤岩气试气产量高,生产阶段控压生产情况下产量稳定、压降速率低、稳产效果好。通过对煤岩气与苏里格气区石盒子组8段与山西组1段内致密砂岩气的系统性对比分析,发现两者在气藏类型、气藏压力和温度、气体成分、地层水性质及产能特征等主要气藏特征方面具有相似性,这个规律对后期煤岩气的大规模开发和建产具有指导意义。

关键词:气藏特征;致密砂岩气;煤岩气;煤岩;本溪组;鄂尔多斯盆地

中图分类号:TE122.3

文献标识码:A

Comparison of main reservoir characteristics between deep coal-rock gas of the No. 8 coal seam of the Upper Paleozoic Benxi Formation and tight sand gas reservoirs, Ordos Basin

LI Mingrui^{1,2}, SHI Yunhe^{1,3}, FAN Liyong^{1,3}, DAI Xianduo^{1,3}, JING Xueyuan^{1,3}, ZHANG Yi⁴

(1. National Engineering Laboratory for Exploration and Development of Low-Permeability Oil & Gas Fields, Xi'an, Shaanxi 710018, China; 2. Petroleum Exploration Division, Changqing Oilfield Company, PetroChina, Xi'an, Shaanxi 710018, China; 3. Research Institute of Exploration and Development, Changqing Oilfield Company, PetroChina, Xi'an, Shaanxi 710018, China; 4. No. 1 Gas Production Plant, Changqing Oilfield Company, PetroChina, Xi'an, Shaanxi 710018, China)

Abstract: The Changqing Oilfield Company of PetroChina has achieved significant advances in exploring deep coal-rock gas within the Ordos Basin, discovering that methane (CH₄) largely occurs in coals as both adsorbed and free gas, which contributes to the formation of self-sourced coal-rock gas reservoirs. In this study, we comprehensively investigate the characteristics of coal-rock gas reservoirs represented by the No. 8 coal seam of the Benxi Formation. The results indicate that the Ordos Basin contains 10 coal seams from top to bottom. The Nos. 5 and 8 coal seams, among others, predominate, exhibiting stable distribution and great thickness. Compared to shallow coalbed methane (CBM), the deep coal-rock gas occurring in the No. 8 coal seam of the Paleozoic Benxi Formation is characterized by high formation pressure, high formation temperature, high gas content, high gas saturation, and high free gas content. Specifically, these coal-rock gas reservoirs exhibit average formation pressure ranging from 22 to 35 MPa, suggesting high formation pressure. However, their formation pressure coefficients vary between 1.0 and 1.1, indicating a normal pressure

收稿日期:2024-05-26;修回日期:2024-07-01。

第一作者简介:李明瑞(1975—),男,博士、教授级高级工程师,油气勘探综合研究和勘探管理。E-mail: lmrui_cq@petrochina.com.cn。

通信作者简介:史云鹤(1982—),男,高级工程师,天然气勘探综合地质研究。E-mail: syhe_cq@petrochina.com.cn。

基金项目:中国石油天然气股份有限公司科技专项(2023ZZ18);中国石油长庆油田公司“揭榜挂帅”项目(2022D-JB01)。

system. The coal-rock gas reservoirs present average formation temperatures ranging from 67 to 92 °C and an average geothermal gradient of 2.94 °C/km, suggesting normal geothermal gradients. The composition of coal-rock gas in these reservoirs manifests an average CH₄ content of 96.92 %, average C₂H₆ content of 0.61 %, average CO₂ content of 0.85 %, and average N₂ content of 1.47 %, establishing these reservoirs of dry gas type. The formation water in these reservoirs has total dissolved solids (TDS) concentrations ranging from 41 644 to 89 776 mg/L (average: 62 228 mg/L), indicating primary CaCl₂-rich formation water. Unaffected by shallow groundwater, the coal-rock gas reservoirs exhibited high gas production rates in tests and stable production at a low pressure drop rate. A systematic comparison between deep coal-rock gas reservoirs in the No. 8 coal seam of the Benxi Formation and tight-sand gas reservoirs in the 8th member of the Xiashihezi Formation (He 8 Member) and the 1st member of the Shanxi Formation (Shan 1 Member) in the Sulige gas field reveals similarities in major reservoir characteristics, including reservoir type, reservoir pressure and temperature, gas composition, formation water properties, and production capacity. These similarities will provide a valuable guide for future large-scale exploitation and production capacity construction of deep coal-rock gas.

Key words: tight-sand gas, coal-rock gas, gas reservoir characteristics, coal seam, Benxi Formation, Ordos Basin

引用格式:李明瑞,史云鹤,范立勇,等. 鄂尔多斯盆地上古生界本溪组8[#]煤岩煤岩气与致密砂岩气主要气藏特征对比[J]. 石油与天然气地质,2024, 45(6):1590-1604. DOI:10.11743/ogg20240607.

LI Mingrui, SHI Yunhe, FAN Liyong, et al. Comparison of main reservoir characteristics between deep coal-rock gas of the No. 8 coal seam of the Upper Paleozoic Benxi Formation and tight sand gas reservoirs, Ordos Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2024, 45(6): 1590-1604. DOI: 10.11743/ogg20240607.

鄂尔多斯盆地总面积约为 $25 \times 10^4 \text{ km}^2$,是中国第二大沉积盆地,具有整体沉降和拗陷迁移的大型多旋回克拉通特征,同时也是一个大型、多期聚煤盆地,发育3套含煤岩系,自下而上分属于石炭系—二叠系、三叠系和侏罗系^[1-2],石炭纪—二叠纪海—陆过渡环境形成广泛分布的煤系地层,自上而下发育10套煤层,其中,5[#]和8[#]煤岩为主力煤岩,分布稳定、厚度大,是鄂尔多斯盆地古生界气藏的主要气源,支撑长庆油田发现了下古生界的靖边和乌审旗等碳酸盐岩气田和上古生界的榆林、苏里格、子洲和米脂等致密砂岩气田^[3-8],共探明气田14个,支撑长庆油田天然气建成 $500 \times 10^8 \text{ m}^3$ 产能大气区^[9-12],成为中国最大的天然气生产基地和天然气枢纽中心,有力保障了国家能源安全。

鄂尔多斯盆地煤系地层分布范围广,埋深差异大^[13-15],从东部到西部,埋深从500 m增至4 000 m以深,早期的煤层气开发主要集中在盆地东缘地区,包括保德、临兴、石楼、大宁—吉县和韩城等地区,总体以中—浅层地层为主(埋深1 500 m以浅),而盆地腹部埋深2 000 m以深的煤层,长期以来被视为古生界烃源岩,虽也进行了一两口井的深煤层试气,但限于认识的局限和改造规模的限制,勘探效果不是很理想^[16-17]。2019年中国石油在鄂尔多斯盆地东缘和准噶尔盆地实现勘探突破,JS6-7P01井和CT1H井压裂

后迅速见气,单井日产气量分别达到 $9.6 \times 10^4 \text{ m}^3$ 和 $5.7 \times 10^4 \text{ m}^3$,埋深大于2 000 m的深层煤岩气勘探取得良好效果,揭开了煤岩气大规模勘探的序幕^[18-20]。近两年来,鄂尔多斯盆地腹部煤岩气勘探全面开花,中国海油2023年发现探明地质储量超 $1 143 \times 10^8 \text{ m}^3$ 的神府气田;中国石化大牛地YM1HF井获得 $10.4 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 的高产气流;中国石油长庆油田在纳林河—米脂北区块落实预测储量超万亿立方米、探明储量超千亿立方米;同时辽河油田在南部宜川地区也取得突破,盆地煤岩气勘探展现出良好的勘探前景。与浅层煤层气不同,煤岩气是介于常规气和浅层煤层气之间的一种新的非常规天然气资源类型,具有常规和非常规储层共存、游离气和吸附气共生以及自源气和他源气共储的特征,一般埋深大于2 000 m^[21],需借助大规模体积压裂进行开采,其开井即见气,具有“高气藏压力、高气藏温度、高含气量、高含气饱和度、高游离气含量”5高气藏特征,明显不同于浅层煤层气^[22-23](表1),与致密砂岩气藏特征相似。该地区以石盒子组8段(盒8段)和山西组1段(山1段)致密砂岩为主要目的层段探明的苏里格气田,探明储量超 $4 \times 10^{16} \text{ m}^3$,是致密砂岩气藏最典型的代表。因此,本文通过系统对比以煤岩气藏与苏里格气田为代表的致密砂岩气藏的关键气藏特征,总结了煤岩气藏的特征,并得出了新的认识和启示。

表1 鄂尔多斯盆地8#煤岩深层煤岩气与浅层煤层气特征对比

Table 1 Comparison of deep coal-rock gas in the No. 8 coal seam of the Benxi Formation and shallow CBM, Ordos Basin

气藏类型	主要气藏特征				
	气藏压力/MPa	气藏温度/℃	含气量/(m ³ /t)	含气饱和度/%	游离气含量/%
浅层煤层气	4~8	约40	8~12	变化较大	很低
深层煤岩气	22~35	67~93	15~25, 平均21.77	高达99.85	平均29.93

1 煤层特征

1.1 含煤地层划分

鄂尔多斯盆地上古生界自下而上主要发育上石炭统本溪组,下二叠统太原组和山西组,中二叠统石盒子组和上二叠统石千峰组^[24-26]。华北板块位于北纬30°以南,石炭纪一二叠纪属热带雨林气候,植被繁盛,盆地总体属于海-陆过渡相沉积^[27-28],平缓的地形发生区域性海平面变化,形成广泛分布的海-陆过渡相煤系地层。含煤层系主要包括石炭系本溪组和二叠系太原组、山西组,含煤层数多(5~10层),煤岩厚度大(10~70 m)。山西组主要发育1#—5#煤岩,与砂岩和泥岩间互;太原组主要发育6#、7#和8#煤岩,

分布于山西组底部的北岔沟砂岩和太原组东大窑灰岩、斜道灰岩、毛儿沟灰岩以及庙沟灰岩之间;本溪组主要发育8#、9#和10#煤岩。山西组5#和本溪组8#煤岩为主力煤岩^[29-30](图1a,b),也是盆地深层煤岩气的主要勘探领域(图2)。

8#煤岩位于庙沟灰岩和吴家峪灰岩两套标志层之间,为本溪组最为发育的煤岩,厚度大,分布稳定,全区可采。本溪组沉积时期,鄂尔多斯盆地属于近岸三角洲和障壁海岸潮坪—泻湖沉积体系,8#煤岩全硫含量高(平均2.58%),形成于近滨海平原的潮坪环境,有利于植物遗体的保存,泥炭层不断堆积,发育了广覆式分布的煤岩,面积16.08×10⁴ km²。盆地自北向南依次发育三角洲平原、三角洲前缘和浅海泻湖沉积^[31-32]。北部三角洲平原河道间湾发育沼泽沉积,植物繁茂,河道横向迁移形成大面积分布的泥炭沉积,演化成巨厚

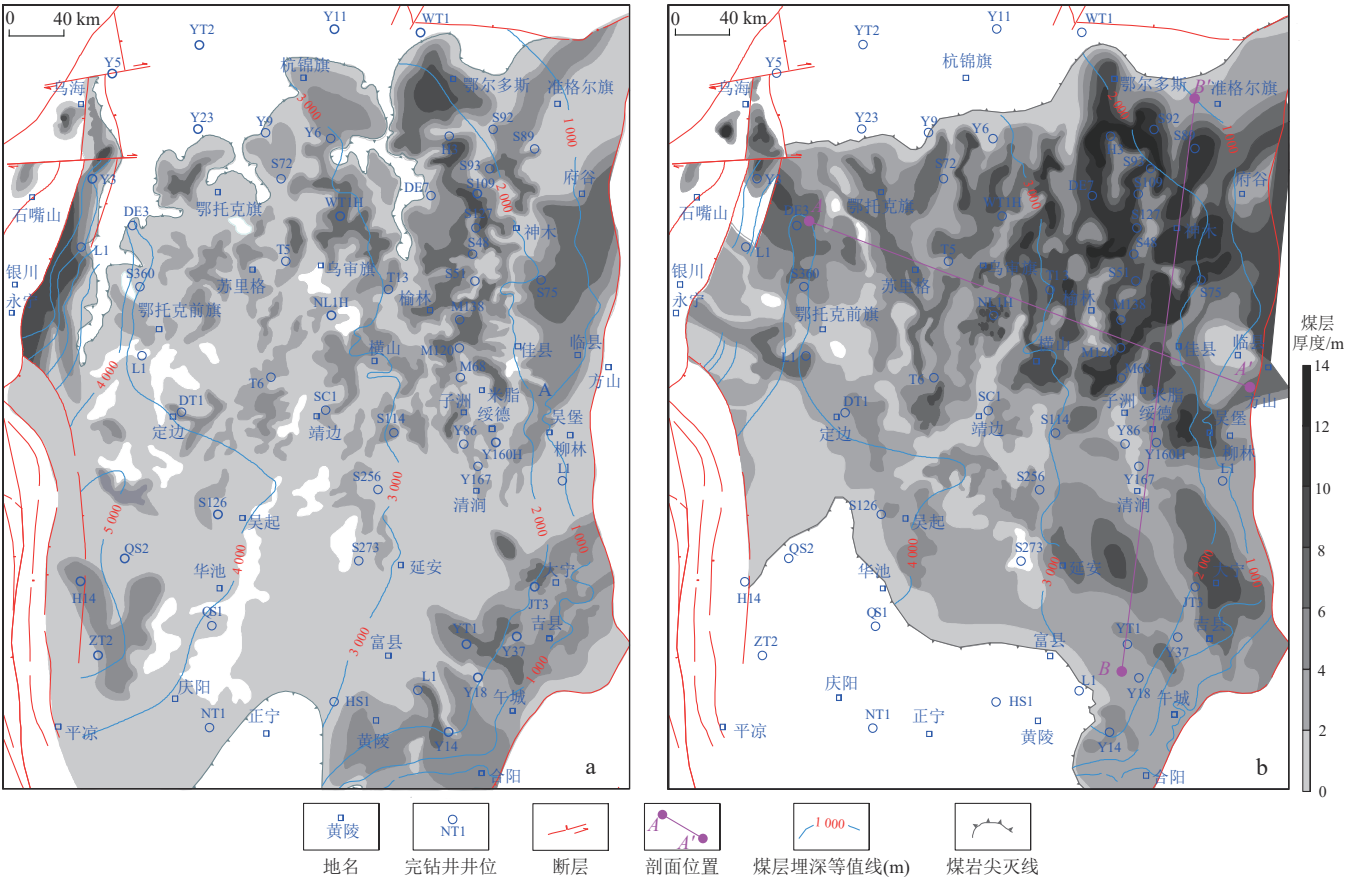


图1 鄂尔多斯盆地5#煤岩(a)与8#煤岩(b)厚度

Fig. 1 Isopach maps of the Nos. 5 (a) and 8 (b) coal seams in the Ordos Basin

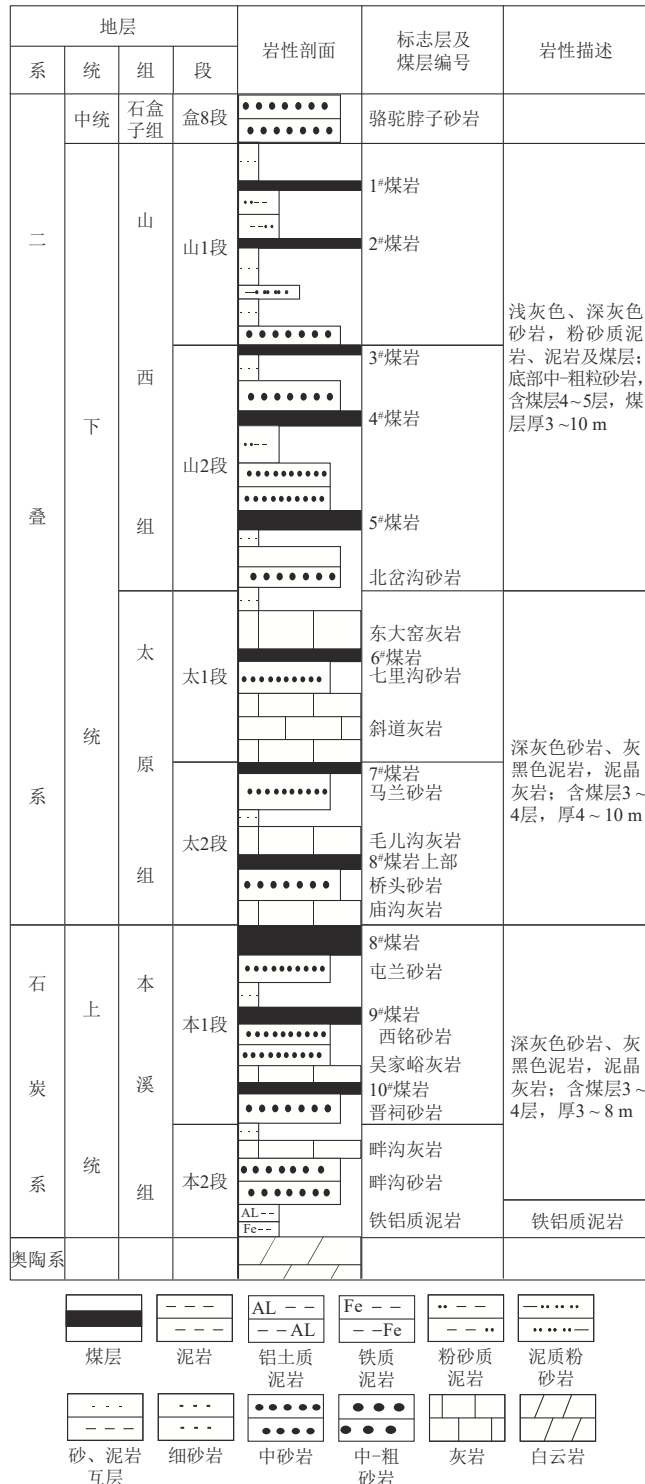


图2 鄂尔多斯盆地石炭系—二叠系地层柱状图

Fig. 2 Stratigraphic column of the Carboniferous-Permian in the Ordos Basin

的煤岩^[33-34],厚度可达25 m。中部三角洲前缘地带,分支河道稳定持续发育,形成水道间湾浅水近岸沼泽,演化成叠置发育的厚层煤岩,厚度4~16 m。南部属于障壁海岸-潟湖沉积体系,大量浅水成煤植物发育,演化形成广覆式和大面积分布的煤岩(图3)。由于海平

面频繁变化,适合煤岩形成的环境持续时间较短,煤岩略薄,夹矸较多,厚度介于2~12 m。总体上盆地8#煤岩分布连续稳定,自西向东厚度逐渐变大^[33-35],向南、向北和向西煤层相对复杂,夹矸及分叉增多(图4)。

1.2 本溪组8#煤岩特征

1.2.1 宏观煤岩类型

根据煤岩相对光泽强度,可将煤岩划分为光亮煤、半亮煤、半暗煤和暗淡煤4种宏观煤岩类型(表2)。鄂尔多斯盆地本溪组8#煤岩以光亮煤和半亮煤为主,半暗煤和暗淡煤占比很小(图5)。垂向上受沉积相序控制,8#煤岩中、上段以光亮煤为主,下段多发育半亮煤,夹薄层光亮煤及泥质条带,平面上光亮煤主要分布在盆地中、东部,向北、向西、向南煤岩亮度均减弱,多发育半亮煤与半暗煤^[13]。

1.2.2 煤体结构

根据煤岩储层的结构,煤体结构可划分为原生结构煤、碎裂煤、碎粒煤和糜棱煤4种结构(表3)。鄂尔多斯盆地本溪组8#煤岩整体以原生结构煤为主,局部地区发育碎裂煤和碎粒煤(图5)。

1.2.3 工业组分分析

从工业组分看,本溪组8#煤岩挥发分含量属特低-低,灰分含量属低-中等,水分含量极低,煤质好。固定碳含量为56.41%~82.93%,平均值为70.35%;挥发分含量为6.36%~27.39%,平均值为12.31%;灰分含量为6.84%~28.96%,平均值为16.66%;水分含量为0.40%~1.72%,平均值为0.83%。

1.2.4 显微组分特征

从显微组分看,本溪组8#煤岩以镜质组组分为主,含量为40.5%~80.7%,平均值为66.4%;壳质组组分含量为0.6%~18.5%,平均值为3.7%;惰质组组分含量8.1%~37.5%,平均值为20.4%;矿物质组分含量为3.4%~17.5%,平均值为9.4%。除了镜质组组分总体占比较高以外,其他组分变化较大,表明煤岩非均质性较强。

2 煤岩气成藏地质特征

煤岩气是一种非常规天然气资源,具有常规和非常规储层共存、游离气和吸附气共生、自源气和它源气

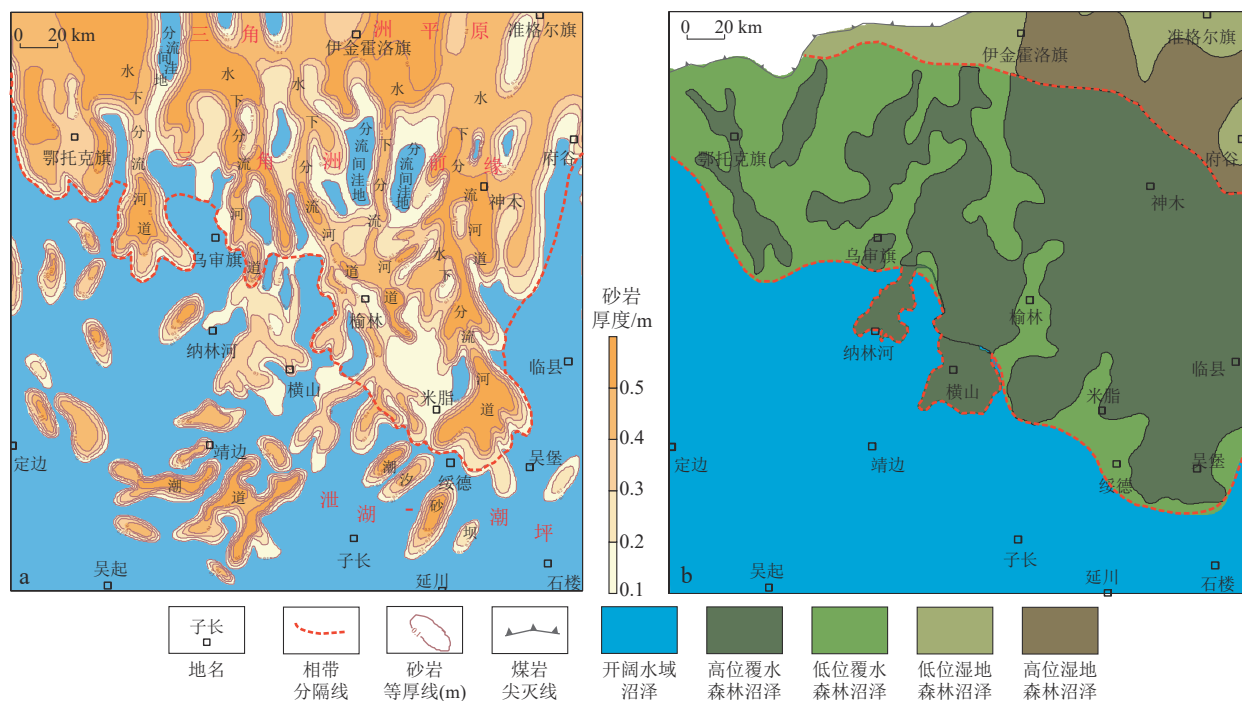


图3 鄂尔多斯盆地本溪组沉积相(a)与煤岩煤相分布(b)

Fig. 3 Planar distribution of the sedimentary facies (a) and coal facies (b) in the Benxi Formation, Ordos Basin

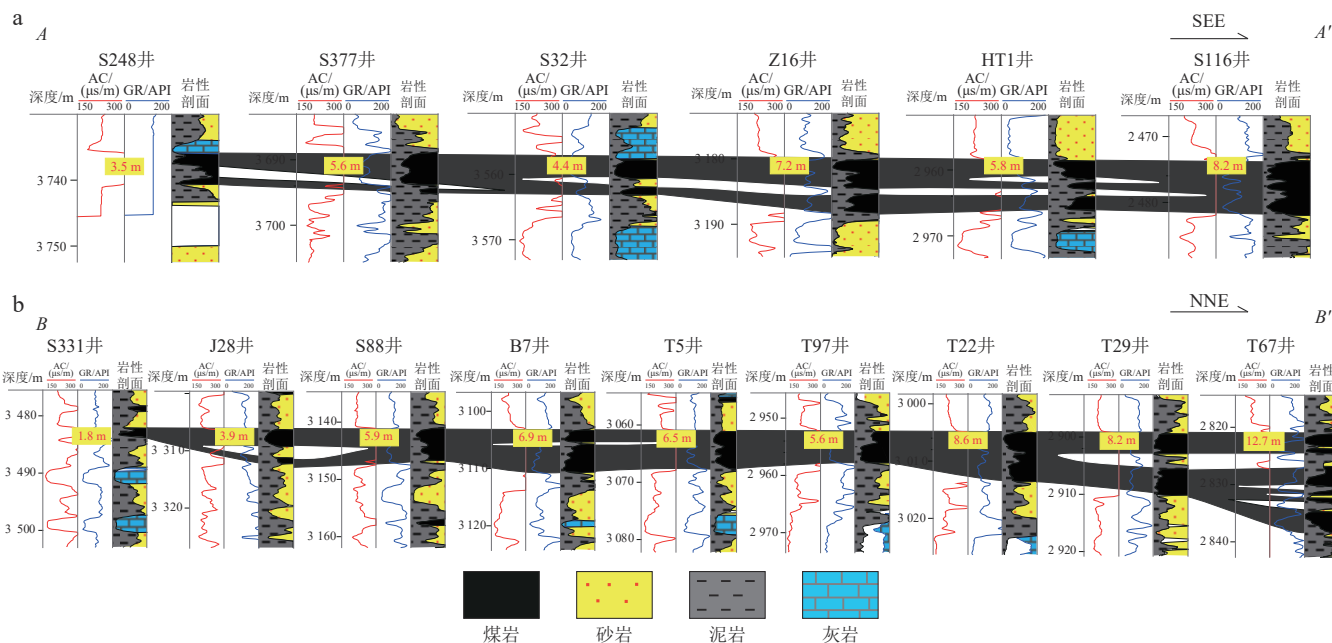


图4 鄂尔多斯盆地8#煤岩东西向(a)与南北向(b)连井对比剖面(剖面位置见图1b)

Fig. 4 E-W (a) and S-N (b) well-to-well cross-sections of the No. 8 coal seam in the Ordos Basin

共储的特征,一般埋深大于1 500 m,割理和裂隙发育,储层压力大,含气量高,需借助大规模体积压裂进行开采^[36]。

2.1 发育孔隙-裂隙型储集空间,煤岩物性好

煤岩孔隙类型以有机质孔为主,占比达90%以

上,包括原生的植物组织孔(胞腔孔)、次生的气泡孔和割理裂隙^[37],无机孔次之,主要为矿物晶间孔(图6)。煤岩宏观割理和显微裂隙发育,呈线状和网状连续分布,一般线密度为0.6~6.6条/cm,平均值为1.4~1.6条/cm。未充填-全充填不等,充填物以方解石为主,见泥质和硅质。按孔隙直径大小,煤岩孔隙主要分

表 2 宏观煤岩划分标准

Table 2 Criteria for classifying macrolithotypes of coal rocks

宏观煤岩类型	划分指标	
	总体相对光泽强度	光亮成分含量/%
光亮煤	强	>75
半亮煤	较强	75 ~ 50
半暗煤	较弱	50 ~ 25
暗淡煤	暗淡	≤25

为微孔(孔径<2 nm)、介孔(孔径 2 ~ 50 nm)以及宏孔(孔径 50 ~ 100 000 nm)和裂隙(孔径>100 000 nm)。通过 CO₂和 N₂低温吸附实验、高压压汞实验和微米 CT 分析等多方法综合应用,分别表征煤岩微孔、介孔和宏孔以及割理和微裂缝,形成煤层全尺度孔隙结构定量

表征方法,试验表明煤岩微孔和大孔(宏孔+裂隙)占比高(图 7a),核磁共振 T₂(核磁共振弛豫时间)谱也显示双峰特征(图 7b),表明煤岩具有“哑铃状”双孔隙结构,孔隙体积中微孔平均占比 56.5 %,大孔(宏孔+裂隙)平均占比 28.4 %(图 8),介孔欠发育。而煤岩气以孔壁表面高密度(0.43 g/cm³)吸附态和不同尺度自由空间的低密度(0.09 ~ 0.17 g/cm³)游离态构成,其中大孔为游离气的富集提供空间,微孔可以提供大量吸附点位,是吸附气主要赋存的场所。

基质孔隙、微裂隙与宏观割理沟通,形成高质量的扩散-渗流输导体系,平均孔隙度 4.80 %,平均渗透率 2.352×10⁻³ μm²(剔除割理和微裂隙为 0.624×10⁻³ μm²),煤岩储层物性好。

表 3 煤体结构划分标准

Table 3 Criteria for classifying coal structures

煤体结构	分层特征	层理特征	破碎程度	裂隙发育特征	手试硬度
原生结构煤	平行层状, 上、下层整合接触	平行层理,带状结构	呈棱角状块体, 且无相对位移	原生割理发育, 连通性较好	硬度较强, 煤块沿割理面断开
碎裂煤	类似层状的透镜体	层理界限清晰, 呈条带状结构	块体呈棱角状, 出现块体间的相对位移	发育割理和裂隙, 且连通性好	煤块易沿裂隙面断开
碎粒煤	透镜体和团块, 与上、下层不整合接触	条状结构遭受破坏, 层理界限不清晰	块体遭受揉皱破碎, 粒径>1 mm	割理遭受破坏, 连通性变差	硬度较小,易搓成碎粒
糜棱煤	透镜体和团块,揉皱分状, 与上、下层不整合接触	原生条状结构遭受破坏, 层理不清晰	煤体严重破碎呈粒状或粉状, 粒径<1 mm	发育揉皱镜面	硬度和强度很低, 呈粉末或粉尘状

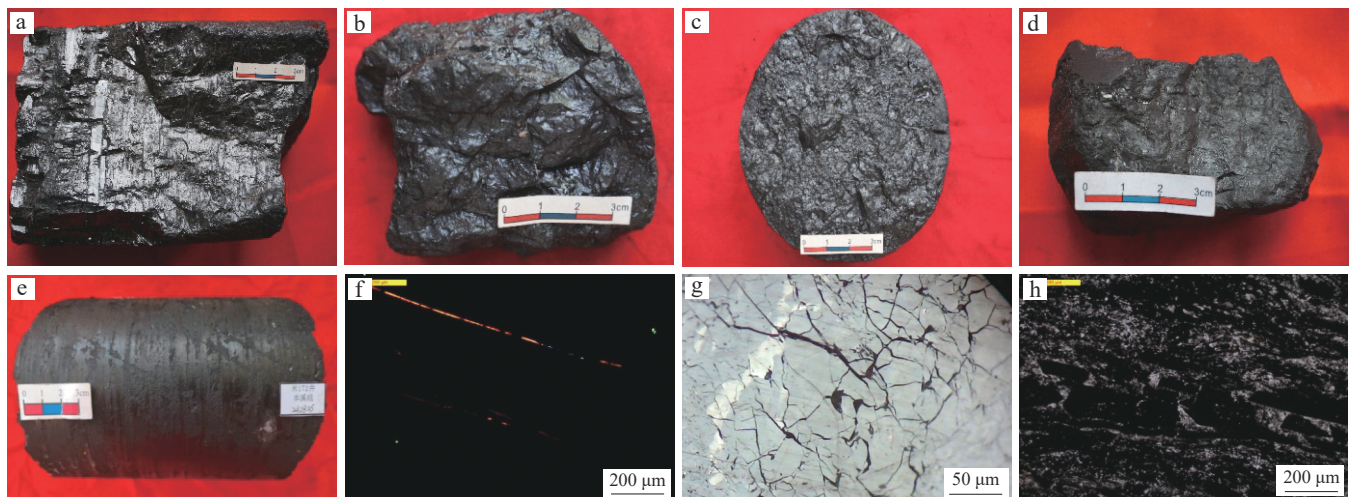


图 5 鄂尔多斯盆地本溪组 8[#]煤岩宏观煤岩类型及煤体结构显微照片

Fig. 5 Photos of cores and casting thin sections showing the macrolithotypes and coal structures of the No. 8 coal seam in the Benxi Formation, Ordos Basin

- a. 光亮煤,具有强的光泽强度,光亮成分含量大于 75 %, Q36 井,岩心;b. 半亮煤,相对光泽强度较强,光亮成分含量介于 50 % ~ 75 %, H10 井,岩心;c. 半暗煤,相对光泽强度较弱,光亮成分含量介于 25 % ~ 75 %, H10 井,岩心;d. 暗淡煤,相对光泽强度暗淡,光亮成分含量小于 25 %, J26 井,岩心;e. 原生结构煤,呈棱角块状,硬度较强, M172 井,岩心;f. 原生结构煤,层状构造, M172 井,铸体薄片(正交光);g. 碎裂煤体结构,割理和裂隙发育,致煤体碎裂呈棱角状, Y40 井,铸体薄片(单偏光);h. 碎粒煤体结构,煤体呈透镜状和不规则团块,层理界限模糊, Y106 井,铸体薄片(单偏光)

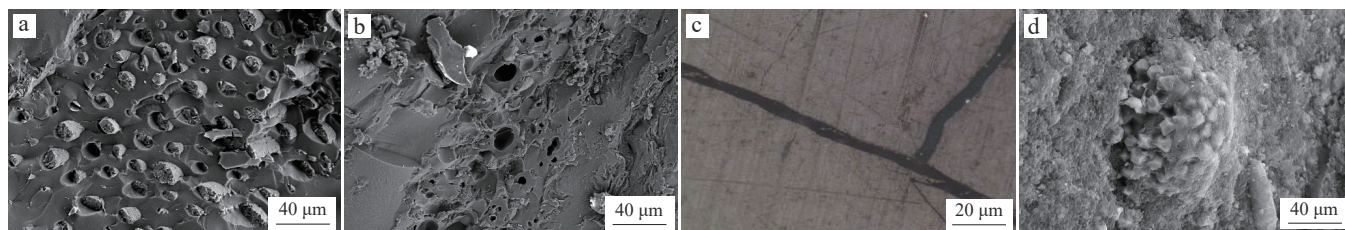


图6 鄂尔多斯盆地本溪组8#煤岩孔隙类型显微照片

Fig. 6 Micrographs showing major pore types of coals in the No. 8 coal seam in the Benxi Formation, Ordos Basin

a. 植物组织孔, M115井, 扫描电镜; b. 气泡孔, M115井, 扫描电镜; c. 割理裂隙, Q36井, 铸体薄片(单偏光); d. 黄铁矿晶间孔, SP1井, 扫描电镜

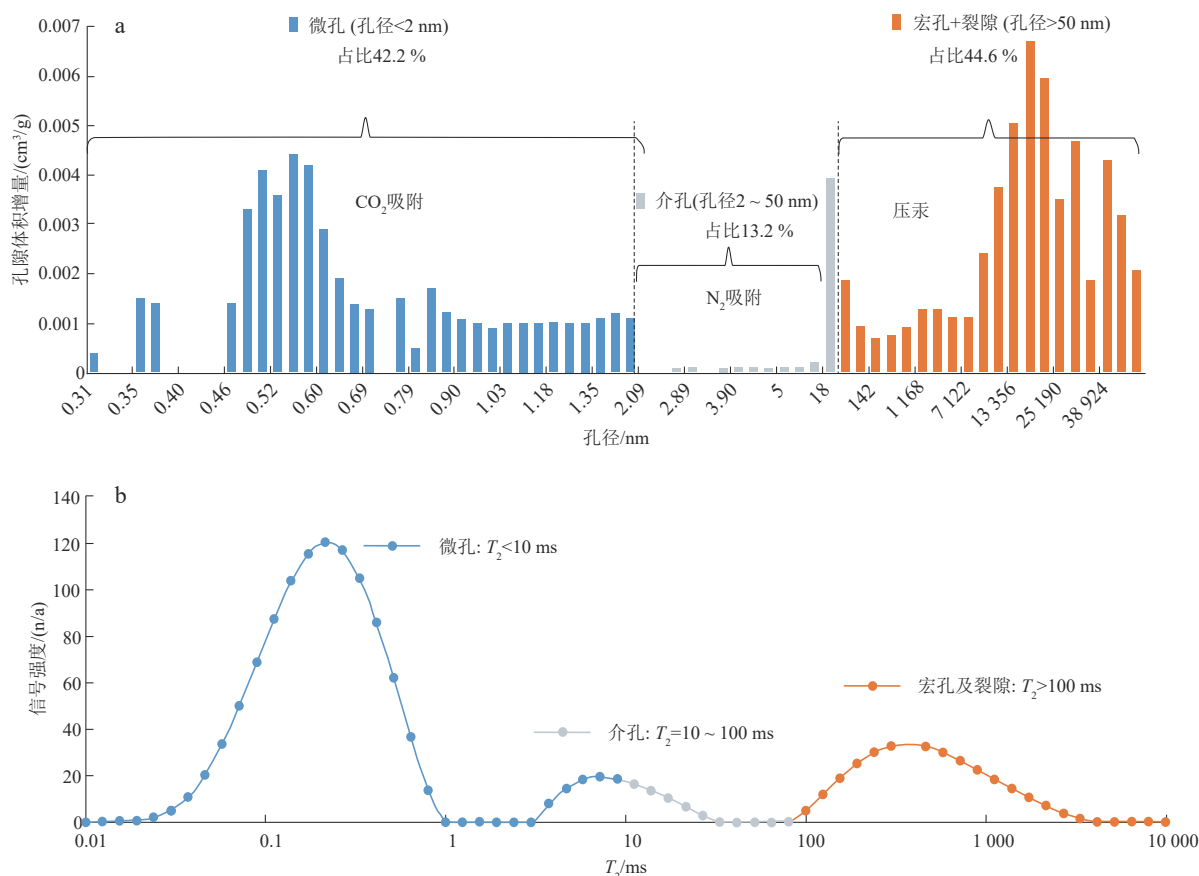
图7 鄂尔多斯盆地M172井本溪组8#煤岩CO₂-N₂吸附-压汞法表征孔隙图(a)与核磁共振T₂峰谱图(b)

Fig. 7 Diagrams showing pores characterized using CO₂-N₂ adsorption experiments and mercury intrusion porosimetry (MIP) (a) and nuclear magnetic resonance (NMR) T₂ spectrum (b) for the No. 8 coal seam in well M172, Benxi Formation

2.2 煤岩含气量高,富含游离气

目前有保压、密闭、绳索和常规4种取心方式^[38],通过开展不同取心方式现场含气量测试对比,建立了不同取心含气量校正模型,总体分析认为结果可靠性为保压>绳索>密闭>常规。通过对盆地腹部23口井系统取心开展现场含气量解析,8#煤岩总含气量主体介于15.00~25.00 m³/t,平均值为21.77 m³/t,游离气含量1.03~18.27 m³/t,平均值为7.42 m³/t,游离气平均占比29.93%,占比近1/3。

2.3 源内原位聚集,保存条件优越

煤岩气具有“源-储一体、持续生烃、箱式封存”的成藏特征,生成未排出的CH₄被强力封存在煤岩孔隙中,形成了自生自储型煤岩气藏^[39]。本溪组上部沉积的太原组,为一套海-陆过渡相沉积,浅海沉积环境发育庙沟灰岩,上覆灰岩厚度2~20 m,海相和陆相沉积过渡区,泥岩较厚,上覆泥岩厚度3~10 m,三角洲平原环境以砂岩沉积为主,上覆砂岩厚度4~15 m,根据8#煤岩顶板岩性变化,8#煤岩与上覆岩性组合划分为

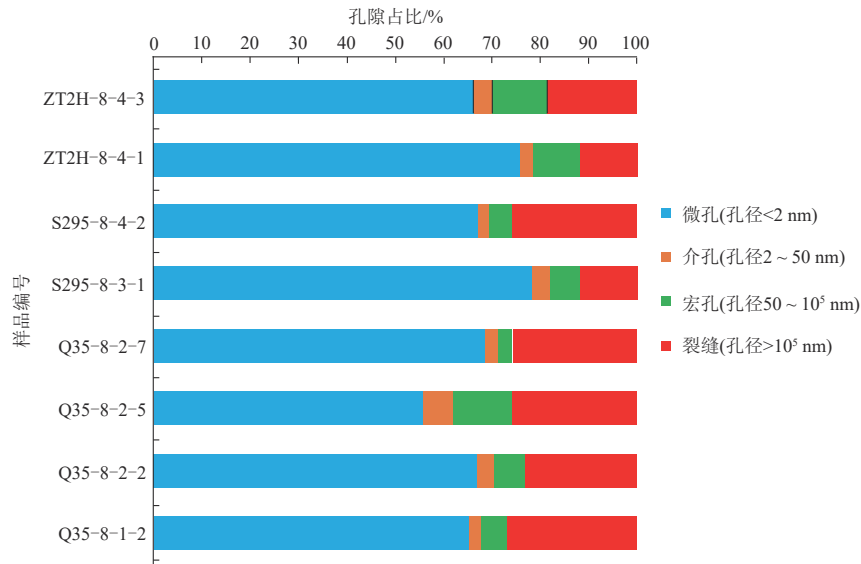


图8 鄂尔多斯盆地本溪组8#煤岩中不同尺度孔隙体积占比柱状图

Fig. 8 Volumetric proportions of pores and fractures of diverse sizes in the No. 8 coal seam of the Benxi Formation, Ordos Basin

煤-灰、煤-泥和煤-砂3种储-盖组合(图9),其中煤-灰和煤-泥组合封闭性较好,气测含气量峰值一般在65%~95%(图10),含气性好。

3 煤岩气与致密砂岩气主要气藏特征对比

反映气藏特征的主要关键参数有气藏类型、压力、温度、气体组分、地层水性质和产能特征等^[40-42],通过系统对比主要气藏特征,明确了二者之间的异同。

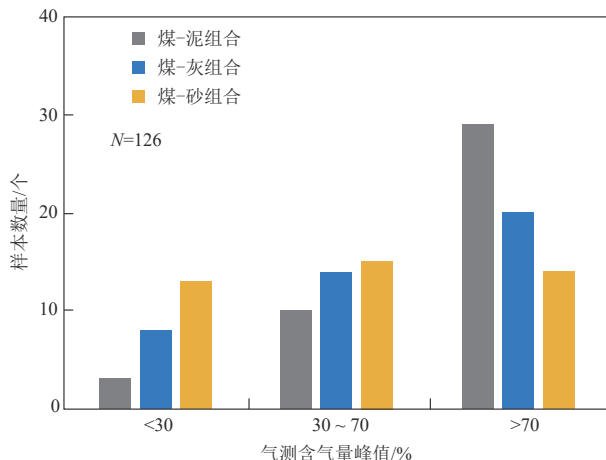


图9 鄂尔多斯盆地本溪组8#煤岩不同储-盖组合煤岩气测含气量峰值统计

Fig. 9 Histogram showing the peak mud logging-derived values of coal-rock gas for different reservoir-cap rock assemblages in the No. 8 coal seam of the Benxi Formation, Ordos Basin

3.1 气藏类型

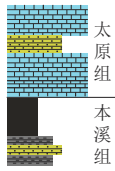
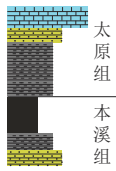
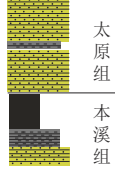
盆地腹部伊陕斜坡构造单元为一大型宽缓斜坡区,为简单的西倾单斜,倾角小于1°,断层不发育,煤岩产状平缓,总体趋势为西南缓倾的单斜,局部存在低幅度背斜和鼻状构造^[43],构造类型为I类;分布连续稳定,其顶板岩性以灰岩和泥岩为主,自南向北,由煤-灰和煤-泥过渡为煤-泥和煤-砂,含水性弱,有利于气体保存;直接底板以泥岩为主,厚度4.0~12.0 m,平均值为8.5 m,发育连续稳定,含水性及渗透性均较差,具有较好封存性能,有利于气体保存,具备形成超大型岩性气藏的地质条件。

苏里格气田发育于西倾单斜构造背景之上,上古生界各层段间有厚层泥质岩分隔,为相互独立的含气单元,各单元内气层的发育程度和分布范围受砂体展布及储层物性控制^[14]。同一层段内部多期砂体复合叠置形成的大型复合储集体在横向和纵向上都存在一定的非均质性。总体来看,同一砂带内气层呈层状分布,横向连片且纵向窜通,属同一气藏,气藏沿主砂体近南北向分布,侧翼泥岩遮挡,为典型的岩性气藏^[15,44]。

3.2 气藏压力

3.2.1 煤岩气藏压力

煤岩气的有效压力系统决定了煤岩气地层的能量大小和有效驱动能量持续作用时间,更直接影响吸附饱和度和煤层含气量^[45]。储层压力越高、临界解吸压

储-盖组合类型	煤-灰组合	煤-泥组合	煤-砂组合
岩性组合示意图			
代表井	LT1井	S148井	S30井
突破压力/MPa	15.02 ~ 26.03 (20.53)	3.05 ~ 7.01 (5.03)	0.31 ~ 2.61 (1.51)
封盖能力	好	较好	差

注：表中数据为“最小值~最大值(平均值)”。

 灰岩

 砂岩

 泥岩

 煤岩

图10 鄂尔多斯盆地本溪组8[#]煤岩煤岩气储-盖组合类型划分
Fig. 10 Classification of reservoir-cap rock assemblages of coal-rock gas in the No. 8 coal seam of the Benxi Formation, Ordos Basin

力越大、有效地应力越小,煤岩气的解吸-扩散-渗流过程进行得越彻底,表现为采收率增大,煤岩气井产能增大。

据本溪组储层压力数据,得到储层压力与煤岩埋深关系图(图11a),关系式为:

$$p=0.010\ 3H-1.758\ 8 \quad (1)$$

式中: p 为储层压力,MPa; H 为煤岩层中部埋深,m。估

算储层压力为22.3~32.5 MPa,平均地层压力系数为1.0~1.1,属于常压气藏。

3.2.2 致密砂岩气藏压力

苏里格气田盒8段和山1段气藏内实测压力点较多,以实测压力值为基础,进行压力分析。受气藏内部储层非均质性及其总体低渗透特征影响,部分压裂改造井由于压入液体未完全返排,导致压力测试数据明显偏低,压力分析中选择测压条件相近和压力恢复较好的井分层开展。

选择苏里格气田44口井盒8段实测静压数据与相应气层中部埋深回归,得到的关系式为:

$$p_{\text{回归}}=-0.002\ 0Z+26.429\ 0 \quad (2)$$

式中: $p_{\text{回归}}$ 为气层静压压力,MPa; Z 为气层中部埋深,m。选择苏里格气田36口井山1段实测静压数据与相应气层中部埋深回归,得到的关系式为:

$$p_{\text{回归}}=-0.002\ 0Z+26.470\ 0 \quad (3)$$

估算盒8段储层压力23.6~37.3 MPa、平均地层压力系数0.75~0.95(图11b),山1段储层压力25.7~32.4 MPa、平均地层压力系数0.74~0.96(图11c),均属低压气藏。

煤岩气属常压气藏,相较于致密砂岩气具有较高的压力系数,但二者在盆地内都不存在异常高压和异常低压的特征,均属于正常压力系统。

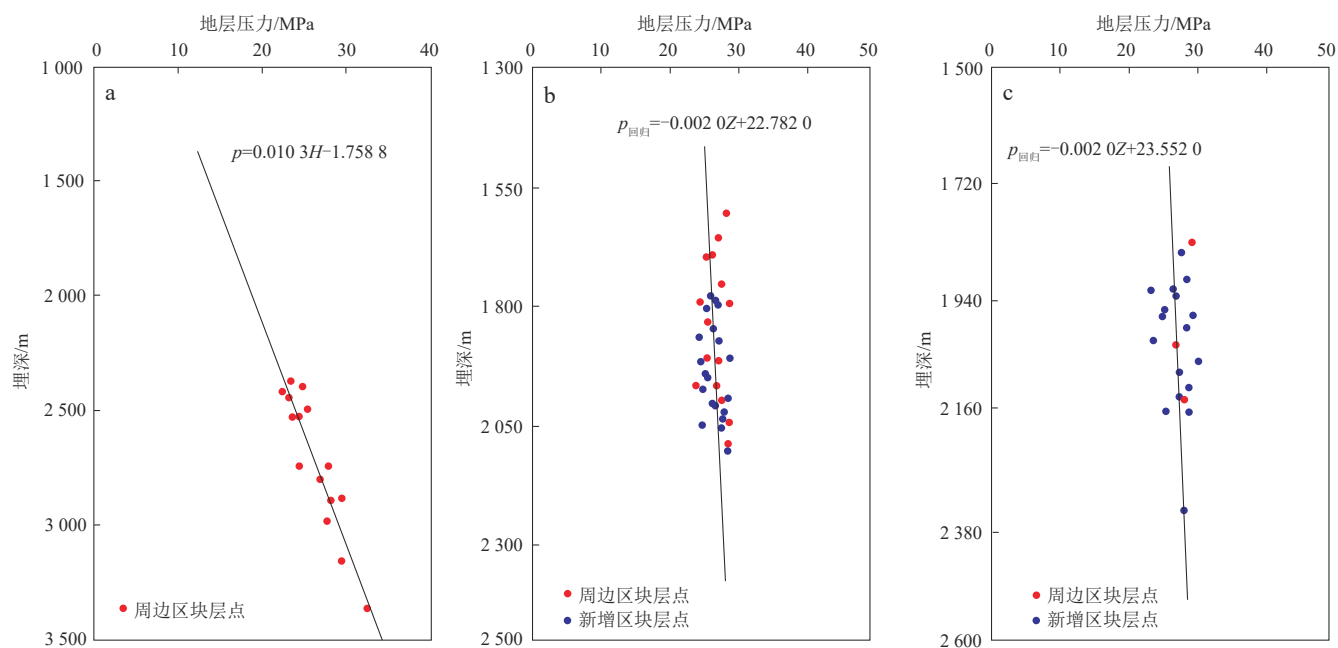


图11 鄂尔多斯盆地本溪组煤岩气藏(a)与苏里格气田盒8段、山1段致密砂岩气藏(b,c)地层压力与埋深关系

Fig. 11 Formation pressure vs. burial depth (elevation) plots for coal-rock gas reservoirs in the Benxi Formation (a) and tight-sand gas reservoirs in the He 8 (b) and Shan 1 (c) members of the Sulige gas field, Ordos Basin

3.3 气藏温度

3.3.1 煤岩气藏温度

煤岩气的吸附能力和解吸速度除了受地层压力影响以外,仍受储层温度条件控制。储层温度低,吸附量大,温度升高有利于煤岩气解吸^[46-47]。鄂尔多斯盆地蒙陕气田本溪组气藏埋深主要集中在2 000~3 500 m,借鉴本溪组砂岩气藏数据,利用14口井实测地层温度资料与对应埋深做地层温度与埋深关系图(图12a),而求得地温梯度关系式为:

$$D=(T+0.293\ 5)/H \quad (4)$$

式中: D 为地温梯度, $^{\circ}\text{C}/\text{km}$; T 为地层温度, $^{\circ}\text{C}$; H 为地层埋深,m。由此求得地温梯度29.4 $^{\circ}\text{C}/\text{km}$,属于正常温度梯度。

3.3.2 致密砂岩气藏温度

利用苏里格气田南一区54口井上古生界实测地层温度与对应深度作相关分析,得到两者之间的关系为:

$$D=(T-1.767\ 7)/H \quad (5)$$

由此求得上古生界地层的地温梯度为30.5 $^{\circ}\text{C}/\text{km}$ (图12b),属于正常温度梯度。

煤岩气和致密砂岩气均属于正常地温梯度,地温梯度均为30.0 $^{\circ}\text{C}/\text{km}$ 左右。

3.4 气体组分

3.4.1 煤岩气气体组分

根据对盆地8#煤岩5口井进行气体组分取样分析,结果表明 CH_4 含量95.17%~98.34%,平均值为96.92%; C_2H_6 含量0.03%~1.72%,平均值为0.61%; CO_2 含量0.52%~1.21%,平均值为0.85%; N_2 含量0.05%~3.28%,平均值为1.47%(表4)。

11口井全部进行了硫化氢(H_2S)检测,其中3口井3样次(NL1H井,B16井和Y160H井)检测出 H_2S ,井口 H_2S 含量0.007~0.013 g/m^3 ,平均值为0.010 g/m^3 (表4),气藏属局部微含硫干气藏。

3.4.2 致密砂岩气气体组分

天然气组分分析结果表明,苏里格气田盒8段气藏 CH_4 含量92.59%~98.56%,平均值为95.73%,天然气相对密度0.561 7~0.606 1,平均值为0.581 1;山1段气藏 CH_4 含量91.93%~98.50%,平均值为94.77%,天然气相对密度0.553 0~0.598 3,平均值为0.580 7(表4)。天然气组分分析中未见 H_2S ,属无硫干气气藏。

煤岩气和致密砂岩气均为干气气藏,气体组分均以 CH_4 为主,深层煤岩气藏 CH_4 平均含量为96.92%,苏

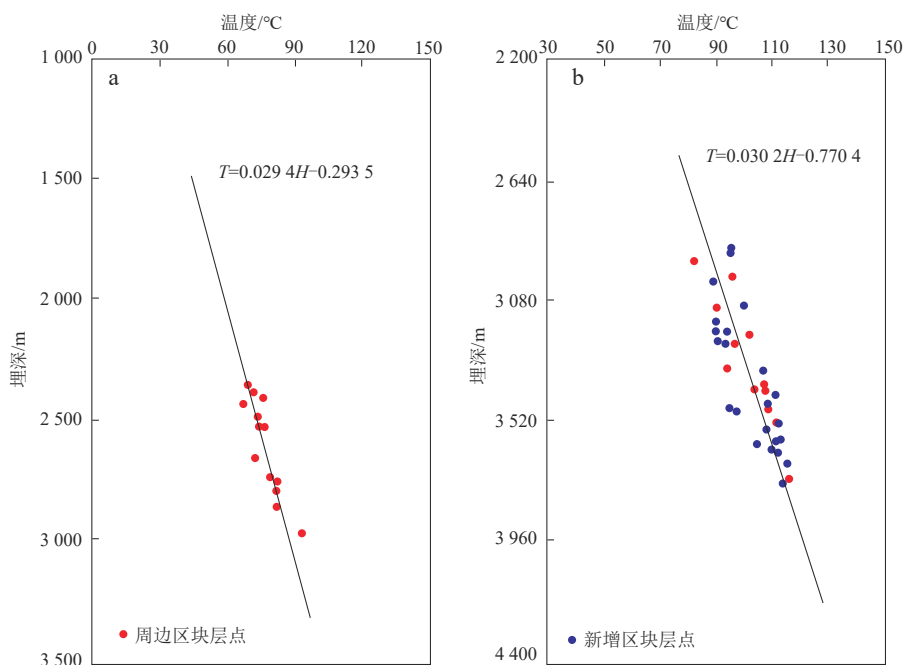


图12 鄂尔多斯盆地本溪组煤岩气藏(a)与苏里格气田盒8段、山1段致密砂岩气藏(b)实测温度与埋深关系

Fig. 12 Measured temperature vs. depth plots for coal-rock gas reservoirs in the Benxi Formation (a) and the tight-sand gas reservoirs in the He 8 and Shan 1 members of the Sulige gas field (b), Ordos Basin

表4 鄂尔多斯盆地东缘8#煤岩煤岩气与苏里格气田致密砂岩气组分对比

Table 4 Comparison of gas composition between deep coal-rock gas in the No. 8 coal seam of the Benxi Formation and tight-sand gas in the Sulige gas field along the eastern margin of the Ordos Basin						
层位	天然气主要组分含量/%				H ₂ S 含量/(g/m ³)	天然气相对密度
	CH ₄	C ₂ H ₆	N ₂	CO ₂		
8#煤岩	95.17~98.34	0.03~1.72	0.05~3.28	0.52~1.21	0.007~0.013	0.6039~0.6310
	(96.92)	(0.61)	(1.47)	(0.85)	(0.010)	(0.6135)
盒8段	92.59~98.56	0.42~5.50	0~2.65	0~2.39	0	0.5617~0.6061
	(95.73)	(2.35)	(0.34)	(0.59)		(0.5811)
山1段	91.93~98.50	0.06~6.22	0~4.32	0~2.56	0	0.5530~0.5983
	(94.77)	(2.68)	(1.06)	(0.79)		(0.5807)

注:表中数据为“最小值~最大值(平均值)”。

里格盒8段和山1段气藏CH₄平均含量为94.77%~95.73%,煤岩气藏CH₄含量略高于致密砂岩气藏;深层煤岩气局部微含硫,而致密砂岩气不含硫。

3.5 地层水性质

3.5.1 煤岩气地层水性质

由于煤岩气开采使用大规模体积压裂技术,因此采出水具有分阶段的特征:初期大量产液阶段,单井日产液量200~480 m³;中、后期稳定产液阶段,单井日产液量5~20 m³,部分井日产液量小于1 m³。通过对盆地纳林河—米脂区块8#煤岩气6口井的6个地层水样品进行分析化验,显示地层水矿化度41.60~89.80 g/L,平均值为62.20 g/L,水型为CaCl₂型(表5)。区块内已有排采井水样分析结果表明,地层水矿化度高,水动力条件弱,封闭条件较好,未受地表水和大气淡水影响。

3.5.2 致密砂岩气地层水性质

苏里格气田盒8段地层水矿化度21.50~50.30 g/L,平均值为33.90 g/L,水型为CaCl₂型;本溪组砂岩地层水矿化度值为17.90~32.34 g/L,平均值为13.20 g/L,

水型为CaCl₂型(表5),反映地层水封闭条件较好,未受地表水和大气淡水影响。

煤岩气藏和致密砂岩气藏相比,具有开采初期出大液,随后逐渐稳定出少量液的特征,而致密砂岩气藏局部出水,且出液相对稳定,同时两者的地层水型均为高矿化度CaCl₂型,表明地层水封闭条件较好^[48],未受地表水和大气淡水的影响,明显与浅层煤层气藏不同。

3.6 产能特征

3.6.1 煤岩气产能特征

长庆油田煤岩气目前有排采井18口,试气单井井口产量(3.2~24.6)×10⁴ m³/d,平均产量10.0×10⁴ m³/d。目前13口井连续排采3个月以上,均按控压方式生产,有5口井日产气量达5.0×10⁴ m³以上,4口井累产超千万立方米,稳产效果好。其中M172H井于2023年7月29日开始出气,试气日产气量13.60×10⁴ m³,初期套压15.15 MPa,日产气量7.55×10⁴ m³,配产6.00×10⁴ m³/d进行生产,套压11.90 MPa,日产气量和油套压非常稳定,累产已超1500×10⁴ m³,计算单井最终可采气量(EUR)为7870×10⁴ m³(表6)。

表5 鄂尔多斯盆地东缘8#煤岩煤岩气与苏里格气田致密砂岩气地层水性质对比

Table 5 Comparison of formation water properties between deep coal-rock gas reservoirs in the No. 8 coal seam of the Benxi Formation and tight-sand gas reservoirs in the Sulige gas field along the eastern margin of the Ordos Basin									
层位	取值	地层水离子浓度/(mg/L)						总矿化度	水型
		K ⁺ +Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻		
8#煤岩	范围值	8 964~1 8261	3 880~15 407	589~905	23 642~53 648	2 325~4 649	234~505	41 600~89 800	CaCl ₂ 型
	平均值	(12 072)	(10 259)	(652)	(36 031)	(3 272)	(360)	(62 200)	
盒8段	范围值	2 544~9 619	2 883~8 946	94~2 345	11 973~27 452	238~8 842	114~530	21 500~50 300	CaCl ₂ 型
	平均值	(6 284)	(5 421)	(565)	(17 123)	(2 102)	(330)	(33 900)	
本溪组砂岩	范围值	3 452~54 442	2 910~63 912	196~12 155	1 030~199 123	143~16 676	468~1 230	17 900~323 400	CaCl ₂ 型
	平均值	(20 361)	(25 936)	(2 591)	(80 029)	(3 914)	(621)	(132 000)	

注:表中数据为“最小值~最大值(平均值)”。

表6 鄂尔多斯盆地东缘8[#]煤岩煤岩气与苏里格气田致密砂岩气水平井产能特征对比

Table 6 Comparison of production performance of horizontal wells between deep coal-rock gas reservoirs in the No. 8 coal seam of the Benxi Formation and tight-sand gas reservoirs in the Sulige gas field along the eastern margin of the Ordos Basin

层位	试气井口产量/(10 ⁴ m ³ /d)	稳定日产量/(10 ⁴ m ³)	压降速率/(MPa/d)	单井EUR/(10 ⁴ m ³)
8 [#] 煤岩	3.2~24.6 (10.0)	1.0~7.5 (4.3)	0.003~0.018 (0.009)	3 100~7 960 (5 580)
盒8段	2.0~50.0 (9.8)	0.8~6.5 (4.0)	0.002~0.032 (0.021)	2 100~7 420 (5 800)

注:表中数据为“最小值~最大值(平均值)”。

3.6.2 致密砂岩气产能特征

按照苏里格气田气井产能评价思路,将气井分为3类进行评价,气井类型的划分依据主要是气层厚度和试气无阻流量,其中无阻流量大于 10×10^4 m³/d的为Ⅰ类井,无阻流量 $(4 \sim 10) \times 10^4$ m³/d的为Ⅱ类井,无阻流量小于 4×10^4 m³/d的为Ⅲ类井^[49]。以南一区为例,投产井中Ⅰ类井占投产总井数的26.5%,Ⅱ类井占投产总井数的43.8%,Ⅲ类井占投产总井数的29.7%,平均日产气量 0.9×10^4 m,水平井平均单井EUR为 $5 800 \times 10^4$ m³(表6)。

煤岩气试气产量高,生产阶段控压生产情况下,生产稳定,稳产阶段压降速率0.009 MPa/d,低于苏里格致密砂岩气稳产阶段压降速率0.021 MPa/d,与致密砂岩气相比深层煤岩气低压稳产时间更长,单井EUR与致密砂岩气藏相当。

4 结论与建议

鄂尔多斯盆地埋深超过2 000 m的煤岩气资源量超过 20×10^{12} m³,资源潜力巨大,煤层气公司已建成 15×10^8 m³/a的产能,实现效益开发,长庆油田已落实万亿立方米储量规模,进入规模建产阶段,煤岩气呈现出蓬勃发展的局面,勘探开发前景广阔。

本溪组8[#]煤岩是盆地主力煤岩,厚度大、分布稳定,是盆地煤岩气的主要勘探目标。其宏观煤岩类型以光亮煤和半亮煤为主,具有原生的煤体结构和镜质组的显微组分,结合其较低煤体挥发分含量、灰分和水分含量等工业组分,证明其作为煤岩气生成与储集的良好条件。

在煤岩气成藏方面,研究表明该盆地深层煤岩气储层具备孔隙-裂隙双重结构特征,微孔与宏孔的“哑铃状”分布促进了游离气与吸附气的共存。煤岩不仅含气量高,且源内原位聚集特征明显,上覆岩层的多样组合提供了良好的封闭条件,确保了煤岩气

的有效保存。

通过系统对比煤岩气藏和以苏里格为代表的致密砂岩气藏的类型、压力、温度、气体组分、地层水性质和产能特征等主要气藏特征,可得出煤岩气藏具有正常的温-压系统,表现为高压力和高温度的特点;气体组分中CH₄含量在96%以上,为干气气藏;产出水矿化度高,水型为CaCl₂型,表明其水源为深层地层水且未受地表水和大气淡水的影响;与致密砂岩气相比深层煤岩气低压稳产时间更长,单井EUR与致密砂岩气藏相当。

煤岩气作为一种新型非常规气藏,其气藏特征又与致密砂岩气藏存在不同之处。煤岩气检测出少量的H₂S,为微含硫气藏,但不排除后期H₂S含量的增加;煤岩气产水量呈“初期高、下降快”特征,生产初期出液量大(200~480 m³),后期出液量小(1~20 m³),气藏特征的不同导致在煤岩气的生产工艺上需考虑H₂S的处理,也需考虑前、后期出液量巨大差异下水的处理工艺,这将会造成生产成本的增加,降低开采效益;但煤岩气与致密砂岩气的主要气藏特征也具有相似性,可以采用致密气的开采工艺进行生产,并接入目前苏里格气田成熟的天然气开发管网,这样能够相应的降低开采成本,且可实现快速大规模开发建产,为保障国家能源安全提供最现实的战略接替资源。

参 考 文 献

- [1] 师庆民,耿旭虎,王双明,等. 基于煤体真密度和自然伽马响应规律的富油煤判识[J]. 煤田地质与勘探, 2024, 52(7): 85-96.
SHI Qingmin, GENG Xuhu, WANG Shuangming, et al. Identification of tar-rich coal based on the true density and natural gamma ray response of coals [J]. Coal Geology & Exploration, 2024, 52(7): 85-96.
- [2] 徐浩. 鄂尔多斯盆地煤系矿产资源赋存规律的构造控制研究[D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2017.
XU Hao. Occurrence characteristics and tectonic controls of coal series mineral resources in Ordos Basin [D]. Beijing: China University of Mining and Technology (Beijing), 2017.

- [3] 孙斌, 孙粉锦, 田文广, 等. 鄂尔多斯盆地乌审旗地区煤层气富集主控因素及其勘探方向[J]. 天然气工业, 2011, 31(2): 34-38.
SUN Bin, SUN Fenjin, TIAN Wenguang, et al. Controlling factors of coalbed methane enrichment in the Wushenqi area, Ordos Basin[J]. Natural Gas Industry, 2011, 31(2): 34-38.
- [4] 付金华, 范立勇, 刘新社, 等. 鄂尔多斯盆地天然气勘探新进展、前景展望和对策措施[J]. 中国石油勘探, 2019, 24(4): 418-430.
FU Jinhua, FAN Liyong, LIU Xinshe, et al. New progresses, prospects and countermeasures of natural gas exploration in the Ordos Basin [J]. China Petroleum Exploration, 2019, 24(4): 418-430.
- [5] 杨华, 魏新善. 鄂尔多斯盆地苏里格地区天然气勘探新进展[J]. 天然气工业, 2007, 27(12): 6-11.
YANG Hua, WEI Xinshan. New progress achieved by natural gas exploration in Sulige area [J]. Natural Gas Industry, 2007, 27(12): 6-11.
- [6] 官伟, 刘池洋, 李涵, 等. 鄂尔多斯盆地苏里格气田东南区气藏凝析油产出规律[J]. 新疆石油地质, 2022, 43(1): 52-58.
GUAN Wei, LIU Chiyang, LI Han, et al. Production Behaviors of Condensate Oil From Gas Reservoirs in Southeastern Sulige Gas Field, Ordos Basin [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2022, 43(1): 52-58.
- [7] 马新华. 鄂尔多斯盆地天然气勘探开发形势分析[J]. 石油勘探与开发, 2005, 32(4): 50-53.
MA Xinhua. Natural gas exploration and development situation in Ordos Basin, NW China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2005, 32(4): 50-53.
- [8] 宋换新, 王天明, 文志刚, 等. 鄂尔多斯盆地东缘柳林—子洲地区本溪组富有机质泥页岩发育影响因素与发育模式[J]. 地球科学与环境学报, 2023, 45(2): 294-305.
SONG Huanxin, WANG Tianming, WEN Zhigang, et al. Influencing factors and development pattern of organic-rich shale in Benxi Formation of Liulin-Zizhou area, the eastern Ordos Basin, China [J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2023, 45(2): 294-305.
- [9] 马硕鹏, 何文渊. 鄂尔多斯盆地天然气勘探领域分析[J]. 天然气工业, 2006, 26(8): 5-7.
MA Shuopeng, HE Wenyuan. Major frontiers of gas exploration in the Ordos Basin [J]. Natural Gas Industry, 2006, 26(8): 5-7.
- [10] 李春光. 鄂尔多斯盆地赋存特大型古生界天然气田的地质依据[J]. 海相油气地质, 2009, 14(3): 19-30.
LI Chunguang. Geology condition analysis of a huge-scaled Paleozoic gas field hosted in Ordos Basin [J]. Marine Origin Petroleum Geology, 2009, 14(3): 19-30.
- [11] 单俊峰, 吴炳伟, 金科, 等. 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[J]. 特种油气藏, 2022, 29(6): 29-38.
SHAN Junfeng, WU Bingwei, JIN Ke, et al. Characteristics of Upper Paleozoic Reservoirs and Their Influence on Natural Gas Accumulation in Yichuan-Huanglong Area, Ordos Basin [J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2022, 29(6): 29-38.
- [12] 何江川, 余浩杰, 何光怀, 等. 鄂尔多斯盆地长庆气区天然气开发前景[J]. 天然气工业, 2021, 41(8): 23-33.
HE Jiangchuan, YU Haojie, HE Guanghuai, et al. Natural gas development prospect in Changqing gas province of the Ordos Basin [J]. Natural Gas Industry, 2021, 41(8): 23-33.
- [13] 牛小兵, 赵伟波, 史云鹤, 等. 鄂尔多斯盆地本溪组天然气成藏条件及勘探潜力[J]. 石油学报, 2023, 44(8): 1240-1257.
NIU Xiaobing, ZHAO Weibo, SHI Yunhe, et al. Natural gas accumulation conditions and exploration potential of Benxi Formation in Ordos Basin [J]. Acta Petrolei Sinica, 2023, 44(8): 1240-1257.
- [14] 陈晶, 黄文辉, 伊硕. 鄂尔多斯盆地南部煤系地层砂岩储层特征及其影响因素[J]. 大庆石油地质与开发, 2022, 41(4): 31-43.
CHEN Jing, HUANG Wenhui, YI Shuo, et al. Characteristics of Sandstone Reservoirs in the Southern Ordos Basin Coal-Measure Strata and Their Influencing Factors [J]. Daqing Petroleum Geology and Development, 2022, 41(4): 31-43.
- [15] 刘圣志, 李景明, 孙粉锦, 等. 鄂尔多斯盆地苏里格气田成藏机理研究[J]. 天然气工业, 2005, 25(3): 4-6, 191.
LIU Shengzhi, LI Jingming, SUN Fenjin, et al. Reservoiring mechanism of Sulige gas field in Ordos basin [J]. Natural Gas Industry, 2005, 25(3): 4-6, 191.
- [16] 李曙光, 王红娜, 徐博瑞, 等. 大宁—吉县区块深层煤层气井酸化压裂产气效果影响因素分析[J]. 煤田地质与勘探, 2022, 50(3): 165-172.
LI Shuguang, WANG Hongna, XU Borui, et al. Influencing factors on gas production effect of acid fractured CBM Wells in deep coal seam of Daning-Jixian Block [J]. Coal Geology & Exploration, 2022, 50(3): 165-172.
- [17] 王在明, 陈金霞, 沈园园, 等. JN1H井煤层气长水平段钻井井壁稳定技术[J]. 钻井液与完井液, 2023, 40(3): 356-362.
WANG Zaiming, CHEN Jinxia, SHEN Yuanyuan, et al. Borehole wall stabilization technology for drilling the long horizontal section coal rock gas Well JN1H [J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 2023, 40(3): 356-362.
- [18] 余琪祥, 罗宇, 曹倩, 等. 准噶尔盆地东北缘深层煤层气勘探前景[J]. 天然气地球科学, 2023, 34(5): 888-899.
YU Qixiang, LUO Yu, CAO Qian, et al. Exploration prospect of deep coalbed methane in the northeastern margin of Junggar Basin [J]. Natural Gas Geoscience, 2023, 34(5): 888-899.
- [19] 周德华, 陈刚, 陈贞龙, 等. 中国深层煤层气勘探开发进展、关键评价参数与前景展望[J]. 天然气工业, 2022, 42(6): 43-51.
ZHOU Dehua, CHEN Gang, CHEN Zhenlong, et al. Exploration and development progress, key evaluation parameters and prospect of deep CBM in China [J]. Natural Gas Industry, 2022, 42(6): 43-51.
- [20] 叶建平, 侯淦译, 张守仁. “十三五”期间我国煤层气勘探开发

- 进展及下一步勘探方向[J]. 煤田地质与勘探, 2022, 50(3): 15-22.
- YE Jianping, HOU Songyi, ZHANG Shouren. Progress of coalbed methane exploration and development in China during the 13th Five-Year Plan period and the next exploration direction[J]. Coal Geology & Exploration, 2022, 50(3): 15-22.
- [21] 李辛子, 王运海, 姜昭琛, 等. 深部煤层气勘探开发进展与研究[J]. 煤炭学报, 2016, 41(1): 24-31.
- LI Xinzi, WANG Yunhai, JIANG Zhaochen, et al. Progress and study on exploration and production for deep coalbed methane[J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(1): 24-31.
- [22] 赵喆, 徐旺林, 赵振宇, 等. 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, 2024, 51(2): 234-247, 259.
- ZHAO Zhe, XU Wanglin, ZHAO Zhenyu, et al. Geological characteristics and exploration breakthroughs of coal rock gas in Carboniferous Benxi Formation, Ordos Basin, NW China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2024, 51(2): 234-247, 259.
- [23] 李国欣, 张水昌, 何海清, 等. 煤岩气: 概念、内涵与分类标准[J]. 石油勘探与开发, 2024, 51(4): 783-795.
- LI Guoxin, ZHANG Shuichang, HE Haiqing, et al. Coal-rock gas: Concept, connotation and classification criteria [J]. Petroleum Exploration and Development, 2024, 51(4): 783-795.
- [24] 朱静, 朱亚军, 辛红刚, 等. 鄂尔多斯盆地延长组长9油层组沉积特征[J]. 西北大学学报(自然科学版), 2013, 43(1): 93-100.
- ZHU Jing, ZHU Yajun, XIN Honggang, et al. The sedimentation during Chang 9 oil formation in Yanchang Formation, Ordos Basin [J]. Journal of Northwest University (Natural Science Edition), 2013, 43(1): 93-100.
- [25] 杨华, 张文正. 论鄂尔多斯盆地长7段优质油源岩在低渗透油气成藏富集中的主导作用: 地质地球化学特征[J]. 地球化学, 2005, 34(2): 147-154.
- YANG Hua, ZHANG Wenzheng. Leading effect of the seventh member high-quality source rock of Yanchang Formation in Ordos Basin during the enrichment of low-penetrating oil-gas accumulation: Geology and geochemistry [J]. Geochimica, 2005, 34(2): 147-154.
- [26] 张文正, 杨华, 李剑锋, 等. 论鄂尔多斯盆地长7段优质油源岩在低渗透油气成藏富集中的主导作用——强生排烃特征及机理分析[J]. 石油勘探与开发, 2006, 33(3): 289-293.
- ZHANG Wenzheng, YANG Hua, LI Jianfeng, et al. Leading effect of high-class source rock of Chang 7 in Ordos Basin on enrichment of low permeability oil-gas accumulation-hydrocarbon generation and expulsion mechanism [J]. Petroleum Exploration and Development, 2006, 33(3): 289-293.
- [27] 范玉海, 屈红军, 王辉, 等. 鄂尔多斯盆地西部延长组下组合异常压力与油气分布[J]. 新疆石油地质, 2013, 34(1): 14-16.
- FAN Yuhai, QU Hongjun, WANG Hui, et al. Abnormal pressure of lower assemblage of Yanchang Formation and its hydrocarbon distribution in western Ordos Basin [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2013, 34(1): 14-16.
- [28] 马启富, 陈斯忠, 张启明, 等. 超压盆地与油气分布[M]. 北京: 地质出版社, 2000.
- MA Qifu, CHEN Sizhong, ZHANG Qiming, et al. Overpressure basin and oil and gas distribution [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2000.
- [29] 赵欣, 姜波, 张尚锐, 等. 鄂尔多斯盆地东缘三区块煤层气产能主控因素及开发策略[J]. 石油学报, 2017, 38(11): 1310-1319.
- ZHAO Xin, JIANG Bo, ZHANG Shangkun, et al. Main controlling factors of productivity and development strategy of CBM wells in Block 3 on the eastern margin of Ordos Basin [J]. Acta Petrolei Sinica, 2017, 38(11): 1310-1319.
- [30] 李勇, 汤达祯, 牛鑫磊. 鄂尔多斯盆地东缘可容纳空间变化控制的C-P煤系沉积特征[J]. 煤炭学报, 2017, 42(7): 1828-1838.
- LI Yong, TANG Dazhen, NIU Xinlei. Sedimentary features of C-P coal bearing strata controlled by variation of accommodation spaces in east margin of Ordos Basin [J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(7): 1828-1838.
- [31] 张晓星. 鄂尔多斯盆地上石炭统本溪组源-汇分析及构造古地理意义[D]. 成都: 成都理工大学, 2020.
- ZHANG Xiaoxing. Source-sink analysis and tectonic paleogeographic significance of Benxi Formation in the southern Ordos Basin [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2020.
- [32] 侯云东, 陈安清, 赵伟波, 等. 鄂尔多斯盆地本溪组潮汐-三角洲复合砂体沉积环境[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2018, 45(4): 393-401.
- HOU Yundong, CHEN Anqing, ZHAO Weibo, et al. Analysis on the depositional environment of Carboniferous Benxi Formation tidal-delta sand body complex, Ordos Basin, China [J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 2018, 45(4): 393-401.
- [33] 张力文, 吴陈君, 黄道军, 等. 鄂尔多斯盆地东部石炭系本溪组泥页岩地球化学特征及沉积环境[J]. 天然气地球科学, 2022, 33(9): 1485-1498.
- ZHANG Liwen, WU Chenjun, HUANG Daojun, et al. Geochemical characteristics and sedimentary environment of Carboniferous Benxi Formation in eastern Ordos Basin [J]. Natural Gas Geoscience, 2022, 33(9): 1485-1498.
- [34] 刘新昕. 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, 2019.
- LIU Xinxin. Study on the sedimentary environment of Upper Carboniferous Benxi Formation of eastern Ordos Basin, China [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2019.
- [35] 何登发, 包洪平, 开百泽, 等. 鄂尔多斯盆地及其邻区关键构造变革期次及其特征[J]. 石油学报, 2021, 42(10): 1255-1269.
- HE Dengfa, BAO Hongping, KAI Baize, et al. Critical tectonic modification periods and its geologic features of Ordos Basin and

- adjacent area[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2021, 42(10): 1255–1269.
- [36] 江同文, 熊先钺, 金亦秋. 深部煤层气地质特征与开发对策[J]. *石油学报*, 2023, 44(11): 1918–1930.
- JIANG Tongwen, XIONG Xianyue, JIN Yiqiu. Geological characteristics and development countermeasures of deep coalbed methane[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2023, 44(11): 1918–1930.
- [37] GOU Qiyang, XU Shang, HAO Fang, et al. Full-scale pores and micro-fractures characterization using FE-SEM, gas adsorption, nano-CT and micro-CT: A case study of the Silurian Longmaxi Formation shale in the Fuling area, Sichuan Basin, China[J]. *Fuel*, 2019, 253: 167–179.
- [38] 张永胜. 山西煤层气产业发展的风险识别与防控研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2022.
- ZHANG Yongsheng. Study on risk identification and prevention and control of coalbed methane industry development in Shanxi [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2022.
- [39] 刘广景, 陈彦丽, 胡皓, 等. 高阶煤吸附能力与其微观组分含量关系探究——以沁水盆地F区块3煤层为例[J]. *天然气勘探与开发*, 2022, 45(4): 128–133.
- LIU Guangjing, CHEN Yanli, HU Hao, et al. Relation of adsorption capacity in high-rank coal to maceral content: An example from No. 3 coal seam, F block, Qinshui Basin[J]. *Natural Gas Exploration and Development*, 2022, 45(4): 128–133.
- [40] 刘畅, 张道旻, 李超, 等. 鄂尔多斯盆地临兴区块上古生界致密砂岩气藏成藏条件及主控因素[J]. *石油与天然气地质*, 2021, 42(5): 1146–1158.
- LIU Chang, ZHANG Daomin, LI Chao, et al. Upper Paleozoic tight gas sandstone reservoirs and main controls, Linxing block, Ordos Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2021, 42(5): 1146–1158.
- [41] 李剑, 张春林, 姜福杰, 等. 鄂尔多斯盆地上石炭统本溪组致密气富集主控因素[J]. *天然气工业*, 2021, 41(4): 30–40.
- LI Jian, ZHANG Chunlin, JIANG Fujie, et al. Main factors controlling the enrichment of Upper Carboniferous Benxi Formation tight gas in the Ordos Basin[J]. *Natural Gas Industry*, 2021, 41(4): 30–40.
- [42] 肖子亢, 刘宝平, 高小平, 等. 鄂尔多斯盆地东南部上古生界致密砂岩储层特征及主控因素分析[J]. *科技通报*, 2017, 33(8): 48–56.
- XIAO Zikang, LIU Baoping, GAO Xiaoping, et al. Analyses on characteristics and main controlling factors of tight sandstone reservoir on the Upper Paleozoic in southeastern Ordos Basin[J]. *Bulletin of Science and Technology*, 2017, 33(8): 48–56.
- [43] 张海涛, 时卓, 任战利, 等. 鄂尔多斯盆地苏里格气田盒8气藏含水特征及气水分布主控因素分析[J]. *现代地质*, 2011, 25(5): 931–937.
- ZHANG Haitao, SHI Zhuo, REN Zhanli, et al. Characteristics of water bearing-formation and gas-water distribution control factors in gas reservoir He 8 of Sulige Gasfield, Ordos Basin [J]. *Geoscience*, 2011, 25(5): 931–937.
- [44] 李建奇, 杨显贵. 苏里格气田36–11井区气藏地质特征研究[J]. *石油天然气学报*, 2009, 31(4): 62–65, 423.
- LI Jianqi, YANG Xiangui. Geological characteristics of gas reservoirs in wellblock 36–11 of Sulige Gas Field [J]. *Journal of Oil and Gas Technology*, 2009, 31(4): 62–65, 423.
- [45] 肖明国, 孙鹏杰. 下黄岩煤层气开发有利地质条件及合理井网密度分析[J]. *中国煤炭地质*, 2024, 36(2): 13–18, 42.
- XIAO Mingguo, SUN Pengjie. Analysis of favorable geological conditions and reasonable well pattern density of coalbed methane development in Xiahuangyan [J]. *Coal Geology of China*, 2024, 36(2): 13–18, 42.
- [46] 康永尚, 闫霞, 皇甫玉慧, 等. 深部超饱和煤层气藏概念及主要特点[J]. *石油学报*, 2023, 44(11): 1781–1790.
- KANG Yongshang, YAN Xia, HUANGFU Yuhui, et al. Concept and main characteristics of deep oversaturated coalbed methane reservoir [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2023, 44(11): 1781–1790.
- [47] 陈刚, 李五忠. 鄂尔多斯盆地深部煤层气吸附能力的影响因素及规律[J]. *天然气工业*, 2011, 31(10): 47–49, 118.
- CHEN Gang, LI Wuzhong. Influencing factors and patterns of CBM adsorption capacity in the deep Ordos Basin [J]. *Natural Gas Industry*, 2011, 31(10): 47–49, 118.
- [48] LI Xianqing, HOU Dujie, TANG Youjun, et al. Molecular geochemical evidence for the origin of natural gas from dissolved hydrocarbon in Ordovician formation waters in central Ordos Basin [J]. *Chinese Journal of Geochemistry*, 2003, 22(3): 193–202.
- [49] 薛媛, 张波, 靳锁宝, 等. 苏里格气田气井生产动态特征研究[J]. *石油化工应用*, 2013, 32(5): 23–25, 29.
- XUE Yuan, ZHANG Bo, JIN Suobao, et al. Research of dynamic characteristics of gas well production in Sulige Gas Field [J]. *Petrochemical Industry Application*, 2013, 32(5): 23–25, 29.

(编辑 刘格云)