

鄂尔多斯盆地中、东部石炭系本溪组煤储层纵向非均质性特征及成因

——以M172井为例

牛小兵^{1,2}, 张辉^{1,3}, 王怀厂^{1,3}, 虎建玲^{1,3}, 吴陈君⁴, 赵伟波^{1,3}, 潘博^{1,3}

(1. 低渗透油气田勘探开发国家工程实验室, 陕西 西安 710018; 2. 中国石油长庆油田分公司, 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. 长江大学资源与环境学院, 湖北 武汉 430100)

摘要:鄂尔多斯盆地石炭系本溪组8#煤储层厚度大、分布范围广、发育稳定,是该区深层煤岩气有利勘探层段。通过对盆地中、东部重点井煤岩样品开展宏观煤岩特征、煤岩性质、储层特征以及煤岩含气性等方面的测试分析,研究了本溪组8#煤储层非均质性特征及成因。研究表明:①煤岩性质纵向发育存在明显的非均质性特征,下段主要发育半亮煤,灰分产率高,惰质组相对较发育,表明该段煤储层形成于偏氧化的成煤环境。中、上段发育光亮煤和半亮煤,灰分产率低,镜质组含量较高,反映了陆源输入较少的还原性成煤环境;②本溪组8#煤储层煤岩沉积环境变化控制了煤岩性质和储层发育特征。储层非均质性受到陆源矿物输入充填原生孔隙以及高含量镜质组生烃阶段产生大量气孔的双重影响。③上段由于沉积环境稳定,成煤条件好,灰分产率较低,煤储层孔隙和裂隙受碎屑矿物充填影响较小,煤岩储集物性更好,有利于气体的吸附和保存。中、上段镜质组含量高、生气能力强,具有更好的煤岩气物质条件,使得煤岩含气量更高,是鄂尔多斯盆地本溪组8#煤储层天然气勘探开发的有利层段。

关键词:工业组分;成煤环境;储层非均质性;煤岩气;本溪组;石炭系;鄂尔多斯盆地

中图分类号:TE122.2

文献标识码:A

Characteristics and genesis of vertical heterogeneity in a coal seam of the Carboniferous Benxi Formation, eastern Ordos Basin: A case study of well M172

NIU Xiaobing^{1,2}, ZHANG Hui^{1,3}, WANG Huaichang^{1,3}, HU Jianling^{1,3}, WU Chenjun⁴, ZHAO Weibo^{1,3}, PAN Bo^{1,3}

(1. National Engineering Laboratory for Exploration and Development of Low-Permeability Oil & Gas Fields, Xi'an, Shaanxi 710018, China; 2. 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. College of Resources and Environment, Yangtze University, Wuhan, Hubei 430100, China)

Abstract: The No. 8 coal seam of the Carboniferous Benxi Formation in the Ordos Basin exhibits great thickness and extensive, continuous distribution, establishing itself as a favorable interval for the exploration of deep coal-rock gas in this region. In this study, we examine the characteristics and genesis of the vertical heterogeneity in the No. 8 coal seam by conducting tests and analysis of the macroscopic characteristics, properties, reservoir characteristics, and gas content of coal samples collected from key well M172 in the eastern Ordos Basin. The results indicate that the No. 8 coal seam exhibits pronounced vertical heterogeneity with dominated semi-bright coals, high ash content and high inertinite content in the lower section, indicating a slightly oxidizing coal-forming environment. In contrast, its middle and upper parts contain bright and semi-bright coals and feature low ash content and high vitrinite content, reflecting a reducing coal-forming environment with limited terrestrial input. The coal rock properties and reservoir development characteristics of the No. 8 coal seam are controlled by changes in the sedimentary environment. The reservoir heterogeneity, to be specific, is influenced by both the input of terrigenous minerals to fill primary pores and the

收稿日期:2024-09-15;修回日期:2024-10-20。

第一作者简介:牛小兵(1978—),男,教授级高级工程师,油气勘探管理与科研。E-mail:nxb_cq@petrochina.com.cn。

通信作者简介:赵伟波(1980—),男,高级工程师,天然气勘探开发。E-mail:zhaowb_cq@petrochina.com.cn。

基金项目:中国石油攻关性应用性科技专项(2023ZZ18-02)。

formation of abundant pores during hydrocarbon generation with high vitrinite content. For the sake of the stable sedimentary environment, the upper section of the No. 8 coal seam exhibits favorable coal-forming conditions and low ash content. Furthermore, the pores and fractures of the coal reservoirs in this part are minimally filled with detrital minerals, resulting in improvement in reservoir properties and gas adsorption and preservation. In contrast, the middle and upper sections demonstrate high vitrinite content and a significant gas generation capacity, providing more favorable material conditions for the generation of coal-rock gas and resulting in higher coal-rock gas content. Therefore, the middle and upper sections of the No. 8 coal seam represent favorable intervals for natural gas exploration and production in the Ordos Basin.

Key words: proximate analysis-derived coal elemental composition, coal-forming environment, reservoir heterogeneity, coal-rock gas, Benxi Formation, Carboniferous, Ordos Basin

引用格式:牛小兵,张辉,王怀厂,等.鄂尔多斯盆地中、东部石炭系本溪组煤储层纵向非均质性特征及成因——以M172井为例[J].石油与天然气地质,2024,45(6):1577-1589. DOI:10.11743/ogg20240606.

NIU Xiaobing, ZHANG Hui, WANG Huaichang, et al. Characteristics and genesis of vertical heterogeneity in a coal seam of the Carboniferous Benxi Formation, eastern Ordos Basin: A case study of well M172 [J]. Oil & Gas Geology, 2024, 45 (6) : 1577-1589. DOI: 10.11743/ogg20240606.

鄂尔多斯盆地是中国最大的巨型含煤盆地之一,盆内形成于加里东—海西构造运动过程中的石炭系—二叠系含煤岩系是最主要的3套含煤岩系之一^[1]。以往针对鄂尔多斯盆地石炭系—二叠系含煤岩系的研究主要从烃源岩的形成及演化的角度,聚焦煤岩相特征^[2-3]、聚煤规律^[4-8]以及生烃潜力特征^[9-11]等方面。近年来鄂尔多斯盆地古生界石炭系本溪组深部煤岩气勘探取得了较大的突破,如NL1H井和JN1H井等均取得了较高的工业气流,本溪组深部煤岩气具有储层裂隙密度高、游离气含量高和气测全烃含量高特征^[12],展示了本溪组深部煤岩气良好的资源勘探潜力。

煤储层特征易受多期构造运动影响,成煤环境和孔隙、裂隙发育特征具有一定的差异,进而影响煤储层中气体赋存状态及富集保存条件,因此煤储层的非均质性特征是影响煤岩气勘探开发的重要因素^[13]。前人研究表明,微观上影响储层垂向非均质性的差异主要是煤岩性质和煤岩孔隙、裂隙系统的差异。郑欢等^[14]对山西组煤储层的研究发现,镜质组含量越高,裂隙越发育,灰分产率越高,煤储层含气量越低。姚艳斌等^[15]发现煤岩显微组分在垂向上的差异会导致微裂隙发育的各向异性,从而影响煤储层渗透率的空间变化。Zhao等^[16]和Liu等^[17]认为煤岩宏观类型与物性呈一定的相关性,光亮煤向暗淡煤过渡时,其灰分与密度增加,镜质组含量下降,孔隙度和渗透率降低,煤岩非均质性减弱。鄂尔多斯盆地大宁—吉县地区8#煤储层微观孔隙研究表明微孔提供了绝大多数的孔隙体积^[18],并且由于受到多种地质因素的耦合影响,储层非均质性较强。总之,煤岩性质和微观孔隙特征对煤储层非均质性以及煤岩含气性具有重要的作用。

鄂尔多斯盆地中、东部是华北地块石炭系本溪组煤岩的主力产煤区之一,虽然前人对该区块各个含煤地层做了较多系统的理论研究^[19-24],明确了本溪组煤岩具有高有机质丰度和高生烃潜力等特征^[25]。当前鄂尔多斯盆地深部煤岩气的研究主要是集中于平面上沉积环境演变、成藏条件、富集规律和有利区带等方面^[26-30],缺乏针对本溪组8#煤储层性质及储层垂向非均质性分布特征的系统研究,对本溪组有利煤储层发育层段及煤岩气有利目标层的预测造成了制约。本文以鄂尔多斯盆地中、东部的典型煤岩气勘探井M172井的石炭系本溪组8#煤储层为研究对象,系统开展煤岩性质(显微组分和工业组分含量)、储层性质(孔、渗及孔隙分布特征)以及煤岩含气性等的测试分析,对研究区煤储层的非均质性展开系统的研究,明确本溪组煤储层有利发育层段,为后续本溪组煤岩气勘探开发提供一定的理论依据。

1 地质背景

鄂尔多斯盆地是一个经历了稳定沉降、拗陷迁移和后期扭动的长期稳定发育的多旋回叠合克拉通盆地,面积约 $25\times 10^4\text{ km}^2$ 。研究区处于鄂尔多斯盆地东部,构造上位于伊陕斜坡构造带(图1),总体构造稳定,属于走向NNE、向NW缓倾的单斜构造,区内断层和断裂稀少。研究区古生界含煤层系主要发育有石炭系本溪组、二叠系太原组以及二叠系山西组。其中本溪组8#煤储层和山西组5#煤储层为研究区两套主力产气煤层^[31]。研究区本溪组8#煤储层底部发育厚层晋祠砂岩、吴家峪灰岩以及招贤页岩,由于区域上沉积环境

变化大,不同地区岩性组合存在差异。在本溪组晋祠段晚期,海平面快速下降,形成了北高南低的古地貌格局,并出现短期的沉积间断;后期随着海平面缓慢上升,研究区潮坪发育,滨海沼泽区植物繁茂,沉积形成了稳定的煤系地层。进入太原组沉积时期,发生大规模海侵,整个鄂尔多斯盆地东部发育5~8 m厚的太原组灰岩,覆盖在本溪组8#煤储层之上,部分地区在煤层和灰岩之间发育砂岩夹层。

2 样品与实验测试

本次研究的M172井钻遇本溪组8#煤储层厚度约9.55 m,埋深为2 424.35~2 433.9 m。8#煤储层底部

发育晋祠段泥岩,顶部为太原组砂岩。8#煤储层主要发育半亮煤和光亮煤,8#煤储层下段以半亮煤为主,上段主要发育光亮煤。本次共采集M172井岩心样品14件,其中煤岩样品13件,底板泥岩样品1件。通过煤岩显微组分及工业组分测试分析8#煤储层性质,利用CO₂吸附、N₂低温吸附以及高压压汞技术定量表征煤储层特征,并结合扫描电镜技术进行微观孔隙发育特征观察。煤岩工业组分分析遵照《煤的工业分析仪器法》(GB/T 30732—2014)执行。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DM 4500P偏光显微镜统计显微煤岩组分,并进行最大油浸镜质体反射率(R_o)测定。通过氦气孔隙度测定和覆压孔隙渗透率测试方法表征煤储层物性特征。全孔隙表征方法

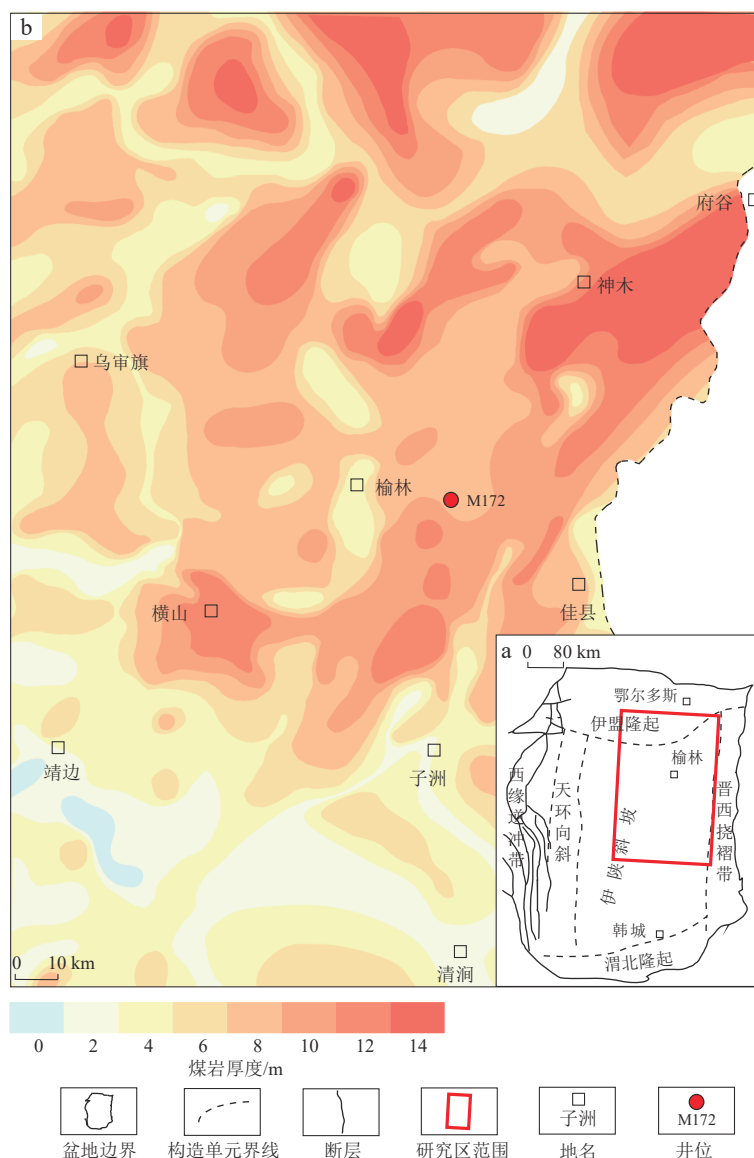


图1 鄂尔多斯盆地中、东部构造位置(a)及本溪组8#煤储层厚度分布(b)

Fig. 1 Structural location (a) and isopach (b) of the No. 8 coal seam of the Benxi Formation, central-eastern Ordos Basin

是通过CO₂吸附、N₂低温吸附和高压压汞技术来定量分析煤储层中的微孔(孔径<2 nm)、介孔(孔径2~50 nm)和宏孔(孔径>50 nm)的分布。通过FEI Heilos 650F扫描电子显微镜对煤储层微观特征进行镜下鉴定。

3 8#煤层煤岩性质

3.1 宏观煤岩特征

在研究井M172井石炭系本溪组8#煤储层中,煤岩的纵向宏观特征表现出较为明显的非均质性(图2,图3),总体上表现为下段发育厚层半亮煤,上段发育光亮煤的特征。其中,下段(埋深2 429~2 435 m)半亮煤局部发育割理,裂隙发育程度总体较低,并夹薄层泥质条带,部分半亮煤层段中夹层发育光亮煤薄层,单层厚度一般在0.2 m左右,光亮煤段面割理较为发育。煤层中、上段(埋深2 425~2 429 m)以发育光亮煤和半亮煤为主,光亮煤单层厚度较大,可达0.6 m,该层段割理较为发育。

3.2 煤岩工业组分

煤的工业组分分析内容主要包含了固定碳、水分、灰分和挥发分等。灰分是煤中可燃质完全燃烧,在一

定温度下矿物质产生分解和化合等复杂反应后剩下的残渣,主要由硅、铝、铁等多种元素的氧化物与盐类组成,在泥炭沼泽沉淀或迁移中受水体氧化还原条件、酸碱度、水动力条件及盐度等因素的影响,在一定程度上能反映成煤环境的变化。煤中的灰分主要来源于煤中的内部矿物质,包括原生矿物质和次生矿物质两类^[32]。其中原生矿物质主要是成煤植物在生长过程中通过植物根部吸收的溶于水的矿物质,这部分矿物质含量极少,一般为1%~2%。次生矿物质中的同生矿物质是煤中灰分的主要来源,在泥炭堆积时期,通过风和流水的搬运作用将碎屑矿物质带到泥炭沼泽中,与植物同时堆积到地下,由于不同时期、不同聚煤环境形成的同生矿物的数量和种类具有差异,导致灰分产率具有一定的差异性,因此灰分的变化与沉积期的古地理环境有一定联系。本溪组8#煤储层样品灰分产率介于11.04%~42.17%,平均值为21.47%。由图3可以发现,从下至上灰分产率逐渐减少,且呈现两端高、中间低的趋势,下段灰分产率较高,而中、上段灰分产率较少。主要原因是本溪组8#煤储层处于海退—海进成煤过程,在下段和顶部主要以氧化环境为主,一定强度的水动力条件带来陆源碎屑物质的补充,导致下段和顶部灰分产率较高;而中、上段主要以还原环境为主,成煤环境稳定,水体滞留水动力弱,陆源矿物质输

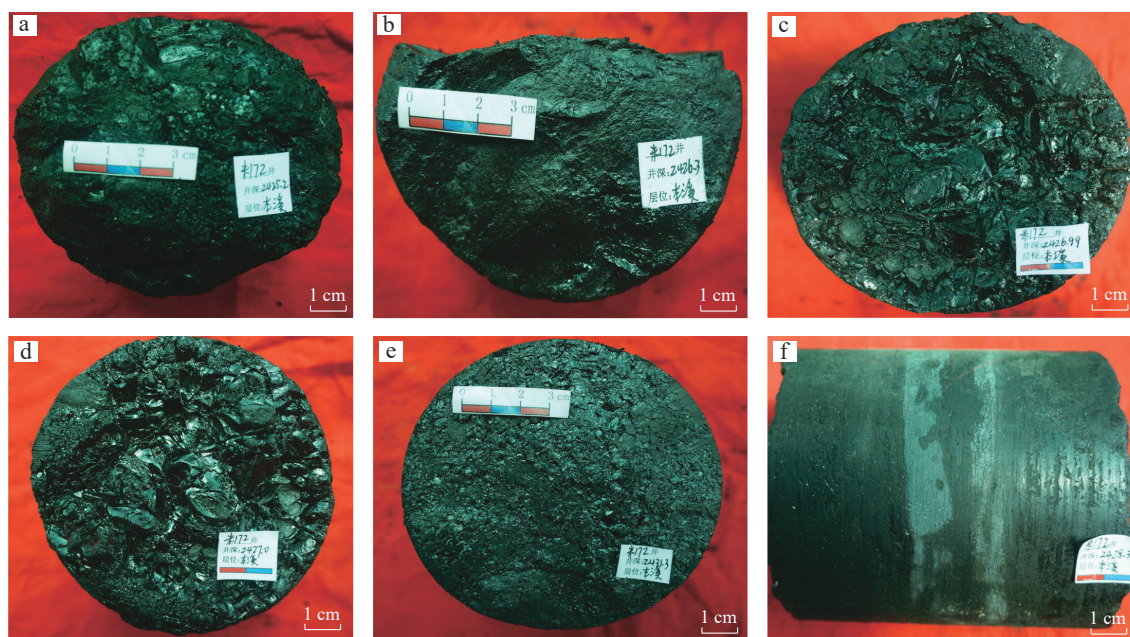


图2 鄂尔多斯盆地中、东部M172井本溪组8#煤储层岩心样品宏观特征照片

Fig. 2 Photos of cores showing the macroscopic characteristics of the No. 8 coal seam of the Benxi Formation in well M172, central-eastern Ordos Basin

a. 半亮煤,埋深2 425.2 m; b. 半亮煤,埋深2 426.3 m; c. 光亮煤,埋深2 426.9 m; d. 光亮煤,埋深2 427.0 m; e. 半亮煤,埋深2 431.3 m; f. 煤层夹泥质条带,埋深2 428.4 m

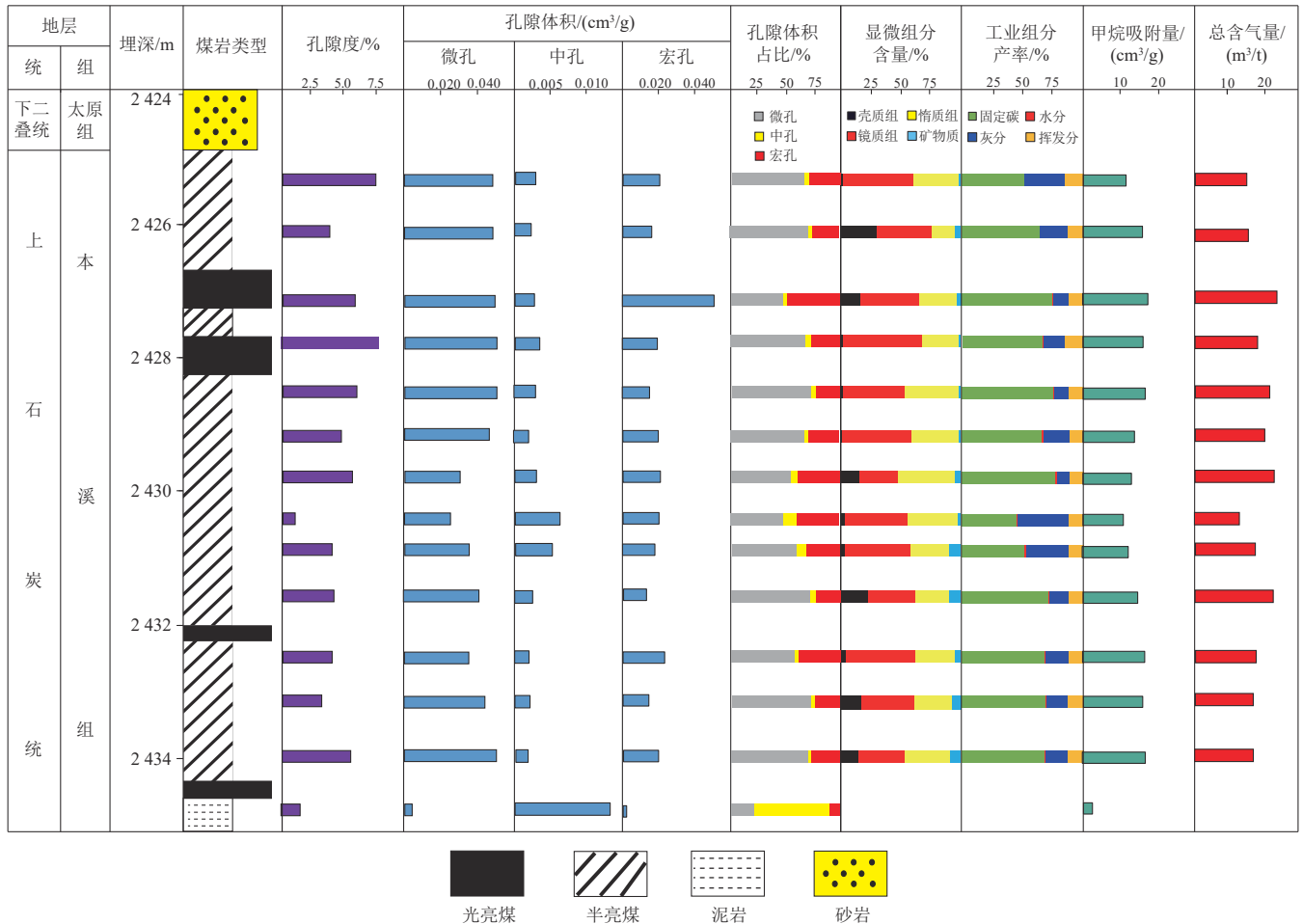


图3 鄂尔多斯盆地中、东部M172井煤岩性质及储层孔隙参数综合柱状图

Fig. 3 Column showing the properties and pore parameters of coals in well M172, central-eastern Ordos Basin

入较少。水分产率介于0.48%~1.09%,平均值为0.77%。挥发分产率介于11.54%~15.57%,平均值为12.70%(图3)。研究区8#煤储层总体上属于中-低灰分的煤岩,固定碳和挥发分产率较高。

3.3 煤岩显微组分

煤岩显微组分是指构成煤的基础有机组成单元,由植物的遗体变化而成,通常在光学显微镜下才能识别。有机显微组分可分为镜质组、壳质组以及惰质组三大组。每种组分有其特有的形态和结构,通常可以由显微组分的颜色、突起能力、反射能力以及结构和形态对其加以区分和鉴别。本溪组8#煤储层的显微组分以镜质组为主,惰质组次之。镜质组含量主要分布于38.0%~66.7%,平均含量为42.8%,惰质组含量分布于31.0%~47.7%,平均含量为35.2%(图3)。煤岩显微组分是成煤环境指示的良好指标参数,镜质组一般是植物残骸在潮湿的还原性水体环境中经凝胶化作用形成,而惰质组反映了干燥的氧化水体环境中的

丝炭化作用过程。M172井本溪组8#煤储层显微镜下观察结果(图4)表明:下段半亮煤惰质体相对较发育,与基质镜质体和黏土矿物以胶结的方式出现(图4g—i),惰质体中常见受矿物充填的胞腔孔隙,指示了该成煤时期沉积环境偏氧化;上段光亮煤和半亮煤(图4c—f)主要发育条带状基质镜质体和均质镜质体,可见裂隙明显发育,矿物发育较低,反映了整体还原性的水体环境,地下水动力条件弱,陆源输入相对更少,灰分产率低(图3),顶部半亮煤特征与下段半亮煤特征类似,惰质体和灰分较高,反映了沉积环境从光亮煤的还原环境向氧化环境转变的趋势。8#煤储层顶部半亮煤显微组分镜质体含量降低,同时胶结粗粒体和矿物含量增加,反映了该时期成煤环境的还原性减弱。

3.4 煤岩热演化程度

热演化程度是煤岩生烃阶段和产气潜力评价的重要指标,M172井本溪组煤岩热演化程度(镜质体反射率 R_o)分布于1.87%~1.96%,平均值为1.89%。煤

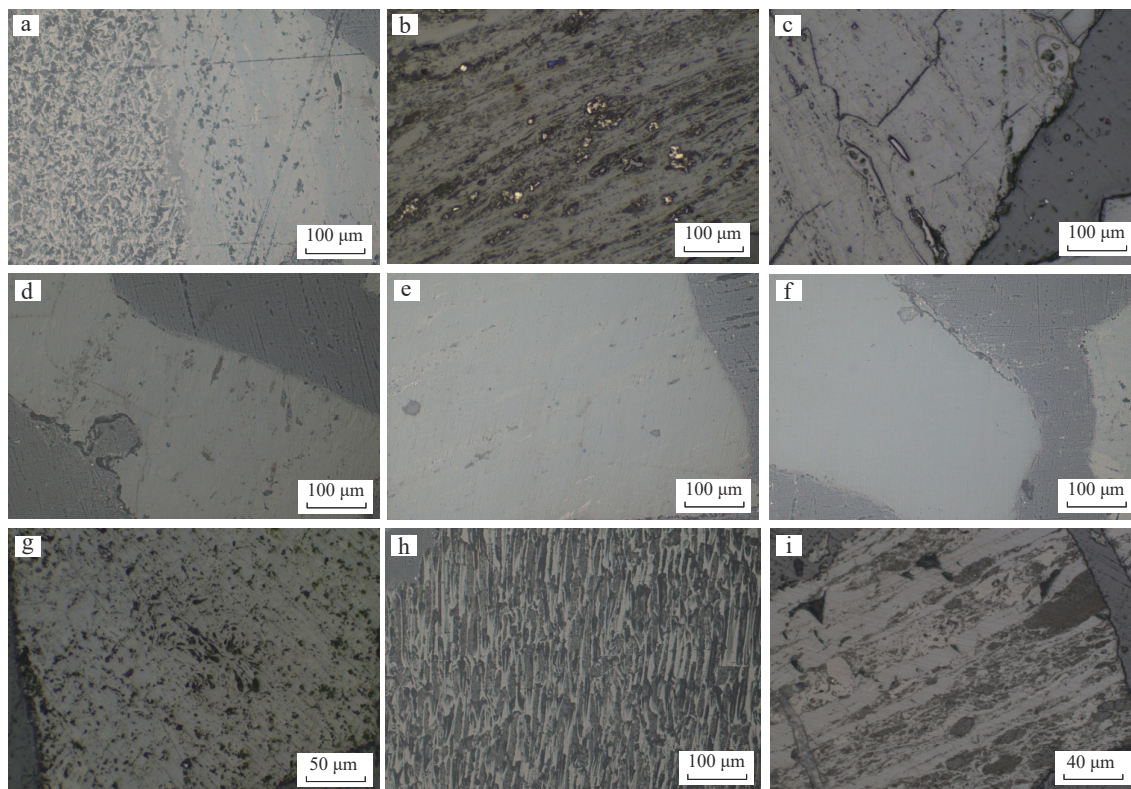


图4 鄂尔多斯盆地中、东部M172井本溪组8#煤储层煤岩样品显微组分特征显微照片

Fig. 4 Micrographs showing the characteristics of macerals in the No. 8 coal seam of the Benxi Formation, central-eastern Ordos Basin

a. 半亮煤,丝质体和基质镜质体,埋深2 425.45 m;b. 半亮煤,基质镜质体胶结粗粒体和矿物,埋深2 426.22 m;c. 光亮煤,基质镜质体均质镜质体呈条带状分布,埋深2 427.27 m;d. 光亮煤,基质镜质体均质镜质体呈条带状分布,埋深2 427.89 m;e. 半亮煤,基质镜质体,埋深2 428.65 m;f. 半亮煤,基质镜质体均质镜质体呈条带状分布,埋深2 429.29 m;g. 半亮煤,基质镜质体胶结丝质体、半丝质体、粗粒体、微粒体、惰屑体和黏土矿物,埋深2 429.90 m;h. 半亮煤,基质镜质体胶结丝质体、半丝质体、粗粒体、微粒体、惰屑体和黏土矿物,埋深2 430.55 m;i. 半亮煤,基质镜质体胶结丝质体、粗粒体、微粒体和树脂体,埋深2 434.08 m

成因气主要生气阶段的 R_o 分布在0.60%~4.00%,热演化早期 R_o 在0.70%附近时,生气量仅占热成因气总量的10%,而当 R_o 达到1.6%时,生气量占比可达80%^[33]。研究井本溪组煤岩正处于热成因气大量生成阶段,由于煤变质过程中生气和聚气作用形成大量的气孔,为煤岩气生成和保存提供了良好的热演化条件。

4 8#煤层储层非均质性特征及成因

4.1 煤储层非均质性特征

孔隙度是深部煤储层评价的重要指标,M172井8#煤储层整体孔隙度较高,孔隙度分布在1.01%~8.09%,平均值为4.98%。垂向上孔隙发育特征呈非均质性分布,存在明显差异性,下段半亮煤孔隙度相对较低,中、上段光亮煤孔隙度逐渐增高(图3)。煤岩中孔隙孔径范围涵盖了从微孔到宏孔的各种孔

隙类型,呈现出广泛且多样的分布,通过 CO_2 吸附、 N_2 低温吸附以及压汞法对M172井本溪组8#煤储层孔隙特征进行全孔隙类型定量表征(图5)。依据IUPAC 2015年的分类标准,将煤岩孔隙分为微孔(孔径<2 nm)、介孔(孔径2~50 nm)和宏孔(孔径>50 nm)3类。从图5a可以看出,中、上段光亮煤的 CO_2 吸附量明显高于其他煤样,反映了光亮煤较强的微孔吸附能力。从储层特征柱状图上(图3)可以看出,8#煤储层的微孔孔隙体积表现出由下向上逐渐增加的趋势,并且在中、上段光亮煤层段孔隙体积达到最大,表明上部光亮煤层对于气体的富集能力更强,能够提供更多的储集空间。8#煤储层的 N_2 吸附量相较于底板泥岩样品总体较低,说明煤岩中介孔较少,以微孔和宏孔为主。 N_2 吸附/脱附曲线随着相对压力的加大上升非常缓慢,在相对压力接近1时陡然升高,且脱附曲线未出现滞后环,此类曲线反映了不开放、连通性较差的孔隙类型(图5b)。

全孔隙表征结果表明(图6),M172井本溪组8#煤

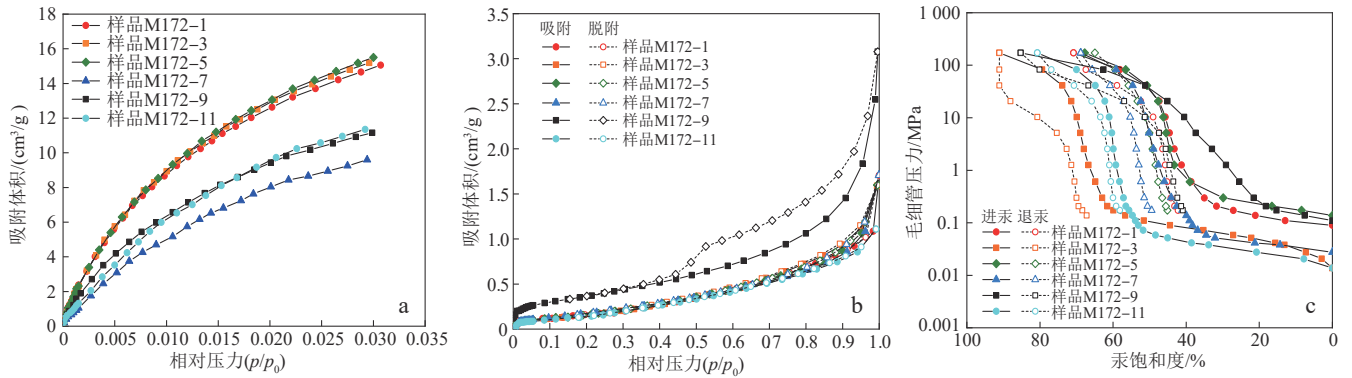


图5 鄂尔多斯盆地中、东部M172井本溪组8#煤储层煤岩样品CO₂吸附曲线(a)、N₂低温吸附-脱附曲线(b)及高压压汞曲线(c)
Fig. 5 CO₂ adsorption isotherms (a), low-temperature N₂ adsorption isotherms (b), and high-pressure mercury injection (HPMI) curves (c) for coal samples from the No. 8 coal seam of the Carboniferous Benxi Formation in well M172, central-eastern Ordos Basin
(p 为实际分压; p_0 为饱和蒸汽压。)

储层的孔隙体积主要集中在微孔,在大约0.5 nm孔径处所对应的孔隙体积最大。此外,宏孔的比例相对较少,而介孔则几乎没有发育。说明煤岩孔径分布为微孔>宏孔>介孔,这与煤层底板泥岩以中孔为主、微孔和宏孔欠发育的特征明显不同。全孔径孔隙体积分布

特征指示了8#煤储层下段整体孔隙欠发育(图3),微孔和宏孔发育程度均不如中、上段光亮煤和半亮煤样品,这与孔隙度分布规律一致。

采用高分辨率的扫描电子显微镜进一步观察煤岩微观孔隙、裂隙发育特征(图7)。8#煤储层上段光亮煤

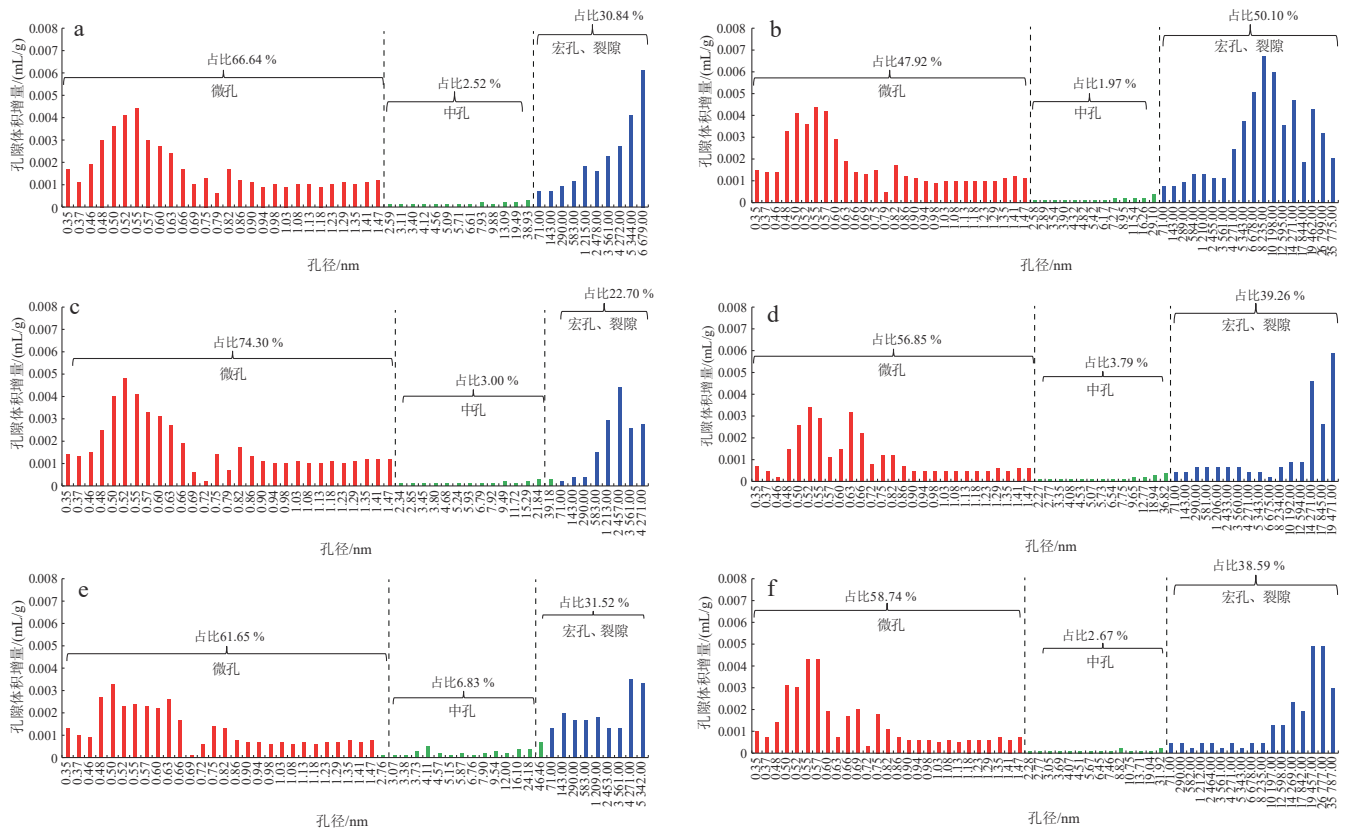


图6 鄂尔多斯盆地中、东部M172井本溪组8#煤储层全孔隙分布

Fig. 6 Distributions of full-scale pores in coal samples from the No. 8 coal seam of the Carboniferous Benxi Formation in well M172, central-eastern Ordos Basin

a. 半亮煤,埋深2 425.45 m; b. 光亮煤,埋深2 427.27 m; c. 半亮煤,埋深2 428.65 m; d. 半亮煤,埋深2 429.90 m; e. 半亮煤,埋深2 431.01 m; f. 半亮煤,埋深2 432.6 m

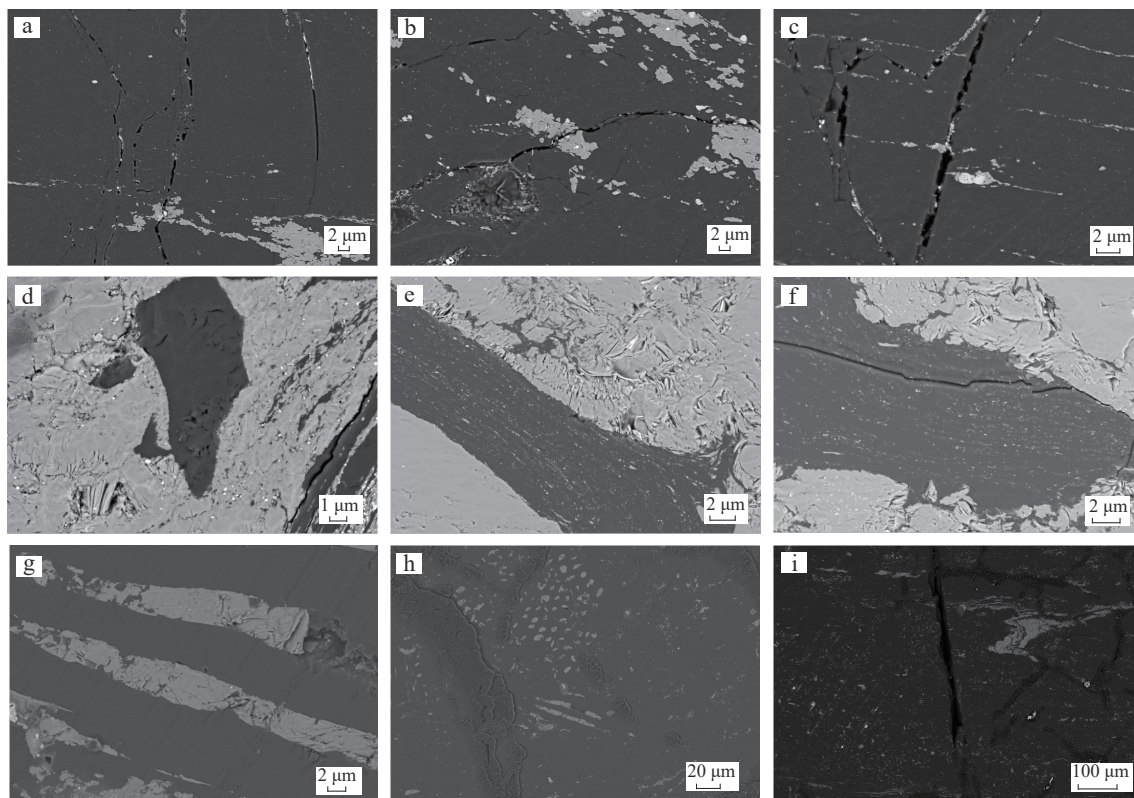


图7 鄂尔多斯盆地中、东部M172井本溪组8#煤储层煤岩样品扫描电镜特征照片

Fig. 7 Scanning electron microscope (SEM) images of coal samples from the No. 8 coal seam of the Carboniferous Benxi Formation in well M172, central-eastern Ordos Basin

a—c. 光亮煤, 裂隙极为发育, 部分裂隙充填了矿物, 埋深2 427.27 m; d—f. 半亮煤, 有机质成块状或条状分布, 黏土矿物较为发育, 埋深2 430.55 m; g—i. 半亮煤, 裂隙发育一般, 矿物成条带状或颗粒状分布, 埋深2 434.08 m

裂缝十分发育(图7a—c), 为煤岩气提供了良好的储集空间和运移通道。下段灰分较高的半亮煤样品裂缝多发育在黏土矿物内, 粒间孔隙和粒内孔隙发育(图7d—f), 有机质含量较多, 多呈块状, 内部微裂缝和孔隙含量较少, 还可见少量黏土矿物的胶结作用。底部煤岩样品, 矿物呈块状和分散状分布, 矿物内部裂缝较为发育, 发育少量有机质胞腔孔(图7g—i), 总体孔隙和裂隙发育程度与中、上段的光亮煤相比较低。综上所述, 8#煤储层上段的煤岩孔隙和裂隙发育较好, 有利于煤岩气的储集, 而中、下段煤岩孔隙和裂隙发育差于上段, 造成其储集空间及渗透性能较差, 这与孔隙定量表征结果一致。

4.2 煤储层非均质性分形表征

由于煤岩中的 N_2 吸附量较小, 孔隙主体以微孔和宏孔为主, 因此主要针对压汞法与 CO_2 吸附法得到的微孔和宏孔分布的非均质性进行讨论^[34-36]。从表1可以看出, 研究区样品的宏孔分形维数在2.535 2~2.768 0, 微孔的分形维数在2.181 0~2.376 4。可以

明显地看出, 煤岩宏孔的孔隙结构较微孔明显复杂, 说明孔隙的孔径越小, 其孔隙结构越简单, 分形维数越小。

孔隙度和渗透率是反应煤储层物性的重要指标, 分形维数能够一定程度上反应煤岩的储层物性非均质性特征^[37-38]。宏孔分形维数与孔隙度和渗透率呈现出明显的正相关关系, 而微孔的分形维数与孔隙度呈现明显的正相关关系, 与渗透率呈弱相关或无相关性(图8)。宏孔作为煤岩中气体扩散和渗流的通道, 对煤岩渗透率具有一定的贡献, 随着分形维数的增加, 宏孔孔隙结构更为复杂, 导致多种孔隙共存, 使得孔隙之间的连通性逐渐增加, 导致渗透率增加。微孔中主要赋存的吸附气体, 孔隙结构较为简单, 对于渗透率的影响较小。孔隙度主要是与孔隙的连通性有关, 更复杂的孔隙结构表现为微孔和中孔相互联通, 进而形成更多宏孔, 进而形成大孔和宏孔, 能够贡献一定的孔隙度。煤储层内部发育大量的微孔, 当微孔数量多时连通性较好, 孔隙度较高。然而, 随着微孔数量的增加, 孔隙结构变得更加复杂, 分形维数相应增加。

表1 鄂尔多斯盆地中、东部M172井本溪组煤储层分形维数计算结果

Table 1 Calculation results of the fractal dimensions of pores in the Carboniferous coal reservoirs in well M172, central-eastern Ordos Basin

样品编号	埋深/m	宏孔分形维数	R^2 (宏孔)	微孔分形维数	R^2 (微孔)
M172-1	2 425.45	2.642 2	0.862 4	2.361 7	0.962 1
M172-2	2 426.22	2.704 9	0.865 9	2.301 0	0.9594
M172-3	2 427.27	2.630 7	0.869 7	2.307 9	0.954 3
M172-4	2 427.89	2.692 6	0.871 4	2.376 4	0.961 2
M172-5	2 428.65	2.671 6	0.896 9	2.317 8	0.956 1
M172-6	2 429.29	2.591 6	0.940 4	2.217 1	0.940 7
M172-7	2 429.90	2.752 4	0.851 4	2.223 2	0.978 6
M172-8	2 430.55	2.565 6	0.984 0	2.218 2	0.944 6
M172-9	2 431.01	2.667 2	0.964 6	2.272 9	0.957 0
M172-10	2 431.69	2.625 0	0.909 7	2.203 7	0.934 8
M172-11	2 432.60	2.691 2	0.860 5	2.215 3	0.963 0
M172-12	2 433.25	2.768 0	0.758 2	2.181 0	0.924 8
M172-13	2 434.08	2.733 1	0.757 5	2.321 8	0.952 4
M172-14	2 434.90	2.535 2	0.986 6	2.201 7	0.968 2

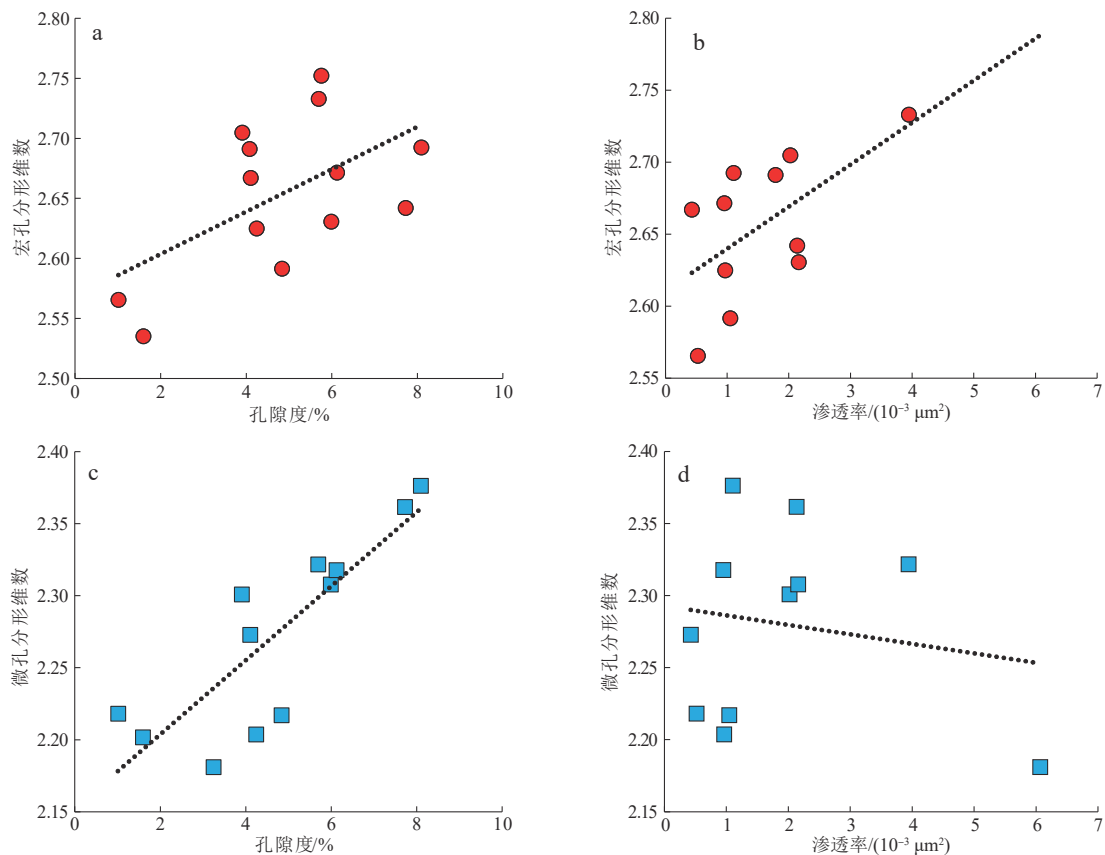
注: R^2 为相关系数。

图8 鄂尔多斯盆地中、东部M172井本溪组煤岩分形维数与孔隙度(a、c)和渗透率(b、d)相关关系

Fig. 8 Correlations of the fractal dimensions of pores with porosity (a, c) and permeability (b, d) for coals of the Carboniferous Benxi Formation in well M172, central-eastern Ordos Basin

4.3 煤储层非均质性特征成因

本溪组8#煤储层孔隙发育特征与工业组分含量特

征在纵向上存在较为明显的非均质性,下段半亮煤整体孔隙度相对较低,工业组分含量中灰分产率相对较高,而中、上段光亮煤和半亮煤孔隙度相对较高,且对

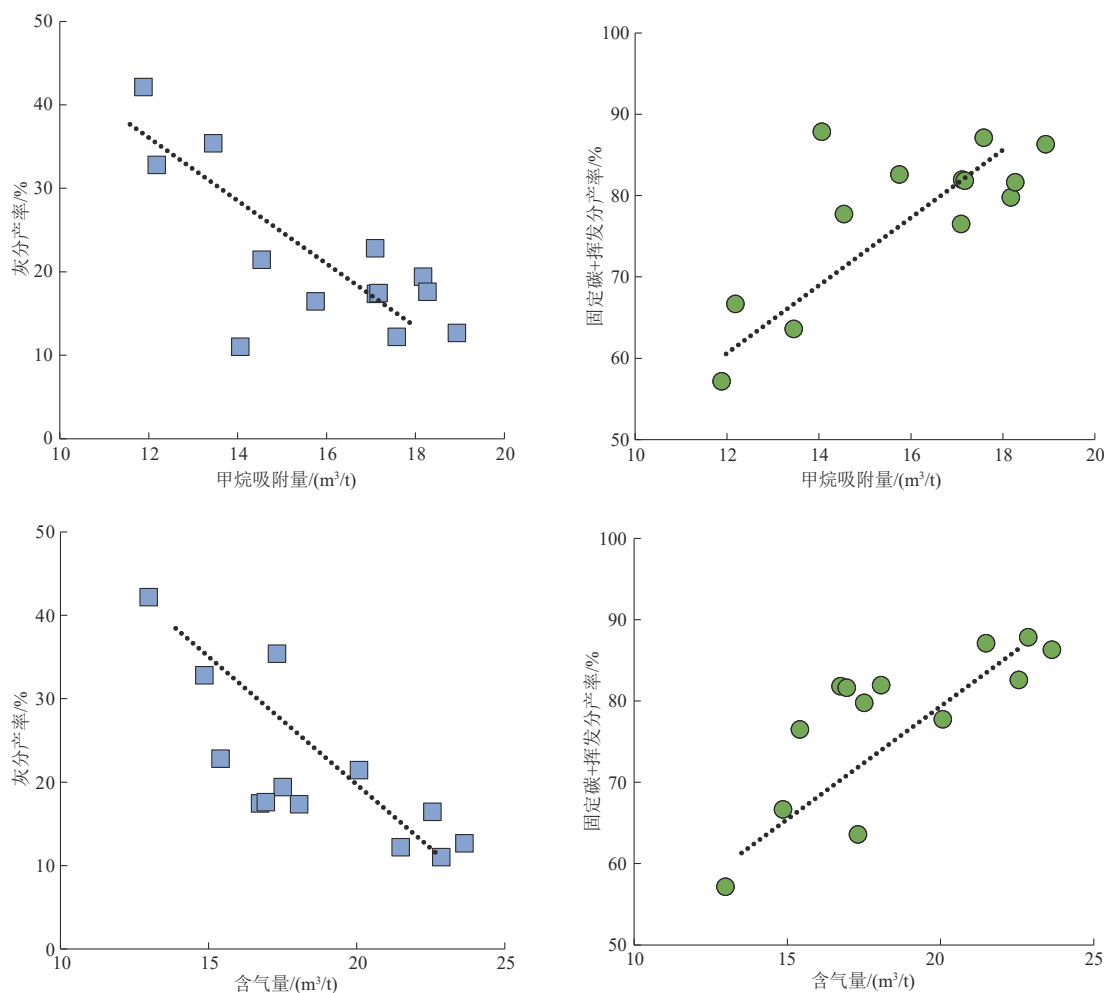


图9 鄂尔多斯盆地中、东部M172井本溪组煤岩甲烷吸附量(a,b)和含气量(c,d)与灰分及有机质(固定碳+挥发分)产率相关关系
Fig. 9 Correlations of methane adsorption capacity (a,b) and gas content (c,d) with ash content and organic matter (fixed carbon and volatile constituents) for coals of the Carboniferous Benxi Formation in well M172, central-eastern Ordos Basin

应较高的固定碳含量和较低的灰分产率。纵向非均质性特征表明(图3):灰分含量较高、固定碳含量较低的煤岩样品孔隙度较低。这一特征表明8#煤储层孔隙发育特征受陆源矿物输入的影响,较高的矿物输入易导致原生孔隙和裂隙遭受充填从而使得煤岩整体孔隙度降低。综合上述8#煤储层工业组分含量分析结果,8#煤储层中、上段光亮煤和半亮煤灰分产率相对较低,孔隙和裂隙更为发育,为优质储层发育层段。而下段相对高灰分半亮煤由于受陆源矿物充填的影响会导致孔隙充填,影响煤岩气的储集和保存。通过扫描电子显微镜观察同样也证实了下段半亮煤原生植物胞腔孔隙受碎屑矿物充填的影响(图7g—i)。

研究区主要煤储层镜质组含量变化较大,从32.00%~66.67%均有分布,8#煤储层平均镜质组含量为49.74%。煤岩的显微组分含量对煤中孔隙的分布特征有密切关系,不同的煤岩组分孔隙发育程度和孔隙

类型也不尽相同。其中,镜质组是热成因气孔的主要贡献者,煤岩在高演化阶段大量产气,镜质组中广泛发育气孔及气孔群,本溪组8#煤储层上段整体富含镜质组,经历了生烃热作用后,扫描电镜照片显示气孔广泛发育。而惰质组中则以中孔与宏孔居多,从而导致煤岩样品的比表面积偏小。壳质组中能够保存的植物胞腔数量很少,并且易被矿物质充填,所以孔隙数量极少,导致壳质组中各孔径段孔隙都很少发育,对煤样孔容影响不大。

综上所述,石炭系本溪组的煤岩沉积环境差异控制了煤岩性质和储层发育的非均质性(图3),储层非均质性发育特征受到陆源矿物输入充填原生孔隙以及高含量镜质组生烃阶段产生的大量气孔的双重影响,总体表现为中、上段光亮煤灰分产率低、镜质组含量高和储集物性好。在本溪组8#煤储层沉积早期,惰质组发育、灰分产率高的半亮煤沉积,指示了该沉积时期的偏氧化环境,同时具有一定强度的水动力条件,储

层物性特征相对较差;在8#煤储层上段镜质组大量发育,指示了沉积水体更强的还原性,该沉积时期水动力极弱,煤岩灰分产率较低,原生孔隙受碎屑矿物的充填影响较小,同时大量的镜质组在后期煤变质过程中产生大量的气孔,8#煤储层上段孔隙度和渗透率较高,为有利储层。因此,受沉积环境影响的煤岩性质变化是导致本溪组8#煤储层垂向非均质性分布的主要原因。

5 本溪组煤岩含气性特征及有利层段

前人研究结果表明^[39-40],含气量与解吸量是煤岩气勘探过程中需要评估的重要指标,其中,含气量的高低可以影响煤岩气的开采和利用,解吸量则反映煤岩气储量和气体释放能力,影响煤岩气井的产能。甲烷吸附量可以反映煤储层的最大吸附能力,甲烷吸附量越大,煤储层的吸附能力越强,含气量越多。甲烷吸附实验结果表明(图3),研究区煤岩具有较强的吸附能力,兰氏体积分布在16.00~22.77 cm³/g,平均值为20.47 cm³/g(图3)。

本溪组8#煤储层甲烷吸附量和总含气量与灰分产率均呈较好的负相关性,而与有机质(固定碳+挥发分)产率呈较好的正相关性(图9)。中、上段光亮煤和半亮煤含气量分布在15.4~23.63 cm³/g,平均值为19.48 cm³/g,该层段煤岩镜质组含量高(图9),热演化产气过程形成大量的气孔群,储层孔隙体积和比表面积大,有利于甲烷气体的吸附,同时煤岩孔隙和裂隙发育,受矿物充填的影响较小,为游离态煤岩气富集提供了良好的储集空间;而下段半亮煤由于陆源矿物输入更高,灰分含量高,造成原生孔隙遭受填充,储集空间显著减小,同时降低有效吸附面积,抑制煤岩对甲烷的吸附(图9),本层段半亮煤整体非均质性较强,含气性变化较大,含气量分布在12.97~22.55 cm³/g,平均值为17.33 cm³/g。综上所述,本地区中、上段由于沉积环境稳定,成煤条件好,灰分产率较低,煤储层孔隙和裂隙受碎屑矿物充填影响较小,煤岩储集物性更好,有利于气体的吸附和保存,同时中、上段镜质组含量高、生气能力强,具有更好的煤岩气物质条件,使得其含气量更高,是鄂尔多斯盆地本溪组8#煤层天然气勘探开发的有利层段。

6 结论

1) 鄂尔多斯盆地宏观煤岩类型以光亮煤和半亮煤为主,煤岩性质纵向发育特征存在较为明显的非均

质性,下段灰分产率高,惰质组相对较发育,反映了偏氧化的成煤环境,中、上段灰分产率低,镜质组含量较高,反映了陆源输入较少的还原性成煤环境。

2) 煤岩孔隙特征存在明显的纵向非均质性,下段灰分产率相对更高,原生孔隙受矿物充填的影响较为显著。中、上段的镜质组含量较高,煤岩类型为光亮煤和半亮煤,灰分产率较低,原生孔隙基本为不充填或半充填,更高的镜质组经热演化产气形成大量的热成因气孔及气孔群,使得中、上段煤岩的孔隙度和孔隙体积高于下段煤岩。

3) 综合分析认为本溪组8#煤层储层的中、上段光亮煤和半亮煤灰分产率低、镜质组含量高、孔隙发育更好、含气量更高,有利于煤岩气的富集和保存,是鄂尔多斯盆地本溪组8#煤层储层天然气勘探开发的有利层段。

参 考 文 献

- [1] 王双明. 鄂尔多斯盆地叠合演化及构造对成煤作用的控制[J]. 地学前缘, 2017, 24(2): 54-63.
WANG Shuangming. Ordos Basin superposed evolution and structural controls of coal forming activities [J]. Earth Science Frontiers, 2017, 24(2): 54-63.
- [2] 段飘飘, 李彦恒, 石志祥, 等. 准格尔煤田串草圪旦煤矿4#煤层相研究[J]. 河北工程大学学报(自然科学版), 2014, 31(3): 86-89, 103.
DUAN Piaopiao, LI Yanheng, SHI Zhixiang, et al. Coal facies of the No. 4 seam from Chuancaogedan Mine, southern Jungur coalfield, Inner Mongolia [J]. Journal of Hebei University of Engineering (Natural Science Edition), 2014, 31(3): 86-89, 103.
- [3] 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 Ordos Basin [J]. China Coalbed Methane, 2014, 11(2): 25-29.
- [4] 鲁静, 邵龙义, 孙斌, 等. 鄂尔多斯盆地东缘石炭-二叠纪煤系层序-古地理与聚煤作用[J]. 煤炭学报, 2012, 37(5): 747-754.
LU Jing, SHAO Longyi, SUN Bin, et al. Sequence-paleogeography and coal accumulation of Carboniferous-Permian coal measures in the Eastern Ordos Basin [J]. Journal of China Coal Society, 2012, 37(5): 747-754.
- [5] 展翅飞, 黄光辉, 展宏图, 等. 鄂尔多斯盆地东部上古生界煤系环境研究[J]. 长江大学学报(自科版), 2014, 11(2): 24-26.
ZHAN Chifei, HUANG Guanghui, ZHAN Hongtu, et al. Research of Upper Paleozoic coal measure environment of eastern Ordos Basin [J]. Journal of Yangtze University (Natural Science Edition), 2014, 11(2): 24-26.
- [6] 李增学, 韩美莲, 魏久传, 等. 鄂尔多斯盆地上古生界高分辨率层序划分与煤聚积规律分析[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2014, 38(1): 1-6.

- 学版), 2008, 32(1): 5-12.
- LI Zengxue, HAN Meilian, WEI Jiuchuan, et al. Analysis of high-resolution sequence stratigraphy and coal accumulation law of Upper Paleozoic Erathem Ordos Basin [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2008, 32(1): 5-12.
- [7] 王路. 沁水盆地中乡井田15号煤煤岩特征与控煤因素分析[J]. 山西煤炭, 2015, 35(6): 72-74.
- WANG Lu. Coal petrology characteristics and coal control factors in No. 15 coal seam in Zhongxiang coal field of Qinshui Basin [J]. Shanxi Coal, 2015, 35(6): 72-74.
- [8] 赵俊斌, 唐书恒, 孙振飞, 等. 鄂尔多斯盆地东缘兴县地区山西组高分辨率层序地层与聚煤规律[J]. 中国煤炭地质, 2015, 27(4): 1-7.
- ZHAO Junbin, TANG Shuheng, SUN Zhenfei, et al. Shanxi formation high-resolution sequence stratigraphy and coal accumulation pattern in Xingxian area, Ordos Basin eastern margin [J]. Coal Geology of China, 2015, 27(4): 1-7.
- [9] 秦国红, 邓丽君, 刘亢, 等. 鄂尔多斯盆地西缘煤中稀土元素特征[J]. 煤田地质与勘探, 2016, 44(6): 8-14.
- QIN Guohong, DENG Lijun, LIU Kang, et al. Characteristic of rare earth elements in coal in western margin of Ordos Basin [J]. Coal Geology & Exploration, 2016, 44(6): 8-14.
- [10] 吕文生. 山西河东煤田乡宁矿区2号煤稀土元素地球化学特征[J]. 华北国土资源, 2018(4): 18-21, 24.
- LYU Wensheng. Geochemical characteristics of rare earth elements No. 2 coal in Xiangning mine, Hedong coalfield, Shanxi Province [J]. Huabei Land and Resources, 2018(4): 18-21, 24.
- [11] 林龙斌. 河东煤田北部主采煤中稀土元素地球化学特征[J]. 中国煤炭地质, 2018, 30(11): 18-23.
- LIN Longbin. REE geochemical features of main mineable coal seams in Northern Hedong coalfield [J]. Coal Geology of China, 2018, 30(11): 18-23.
- [12] 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.
- [13] 张洪盼, 明玉坤, 孙建孟, 等. 煤层气储层径向非均质性评价及其应用[J]. 煤田地质与勘探, 2017, 45(6): 169-175, 181.
- ZHANG Hongpan, MING Yukun, SUN Jianmeng, et al. Radial heterogeneity evaluation of coalbed methane reservoirs and its application [J]. Coal Geology & Exploration, 2017, 45(6): 169-175, 181.
- [14] 郑欢, 许晓宏, 王则, 等. 延川南区块煤层气储层垂向非均质性特征及意义[J]. 新疆地质, 2019, 37(4): 555-559.
- ZHENG Huan, XU Xiaohong, WANG Ze, et al. The features and meanings of vertical heterogeneity of coalbed methane reservoir in Yanchuannan block [J]. Xinjiang Geology, 2019, 37(4): 555-559.
- [15] 姚艳斌, 刘大锰, 汤达祯, 等. 沁水盆地煤储层微裂隙发育的煤岩学控制机理[J]. 中国矿业大学学报, 2010, 39(1): 6-13.
- YAO Yanbin, LIU Dameng, TANG Dazhen, et al. Influence and control of coal petrological composition on the development of microfracture of coal reservoir in the Qinshui Basin [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2010, 39(1): 6-13.
- [16] ZHAO Junlong, XU Hao, TANG Dazhen, et al. Coal seam porosity and fracture heterogeneity of macrolithotypes in the Hancheng Block, eastern margin, Ordos Basin, China [J]. International Journal of Coal Geology, 2016, 159: 18-29.
- [17] LIU Yulong, XU Hao, TANG Dazhen, et al. Coalbed methane production of a heterogeneous reservoir in the Ordos Basin, China [J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2020, 82: 103502.
- [18] 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.
- [19] 罗昌图. 鄂尔多斯盆地东部石炭二叠纪煤系煤化作用特征及其影响因素[J]. 煤田地质与勘探, 1988, 16(4): 22-28.
- LUO Changtu. Coalification characteristics and influent factors of Permo-Carboniferous coal measures in eastern Ordos Basin [J]. Coal Geology & Exploration, 1988, 16(4): 22-28.
- [20] 陈钟惠, 张年茂, 张守良, 等. 鄂尔多斯盆地东缘晚古生代含煤岩系沉积体系和聚煤作用的时空演化[J]. 地球科学, 1989, 14(4): 357-366.
- CHEN Zhonghui, ZHANG Nianmao, ZHANG Shouliang, et al. The time and spatial evolution of sedimentary systems and coal-accumulating centre in Late Palaeozoic coal-bearing measures on the eastern margin of Ordos Basin [J]. Earth Science, 1989, 14(4): 357-366.
- [21] 汤达祯, 林善园, 王激流, 等. 鄂尔多斯盆地东缘晚古生代煤的生烃反应动力学特征[J]. 石油实验地质, 1999, 21(4): 328-335.
- TANG Dazhen, LIN Shanyuan, WANG Jiliu, et al. Kinetic characteristics of hydrocarbon generation on the Paleozoic coal in the east margin of the Ordos Basin [J]. Petroleum Geology & Experiment, 1999, 21(4): 328-335.
- [22] 杨明慧, 刘池洋, 兰朝利, 等. 鄂尔多斯盆地东北缘晚古生代陆表海含煤岩系层序地层研究[J]. 沉积学报, 2008, 26(6): 1005-1013.
- YANG Minghui, LIU Chiyang, LAN Chaoli, et al. Sequence stratigraphy of Late Paleozoic coal-bearing measures in northeastern Ordos Basin [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2008, 26(6): 1005-1013.
- [23] 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.
- [24] 苗霖田, 夏玉成, 吕婷婷, 等. 鄂尔多斯盆地麟游区煤层赋存特征及控制机理研究[J]. *煤炭科学技术*, 2018, 46(11): 163-171.
- MIAO Lintian, XIA Yucheng, LYU Tingting, et al. Study on coal seam occurrence features and control mechanism in Linyou area of Ordos Basin[J]. *Coal Science and Technology*, 2018, 46(11): 163-171.
- [25] 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 Wei, 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.
- [26] 章新文, 王勇, 金芸芸, 等. 鄂尔多斯盆地南部旬-宜探区深部煤层气成藏条件与勘探潜力[J]. *石油地质与工程*, 2024, 38(2): 77-81.
- ZHANG Xinwen, WANG Yong, JIN Yunyun, et al. Reservoir-forming conditions and exploration potential of deep coalbed methane in Xun-Yi exploration area, southern Ordos Basin[J]. *Petroleum Geology and Engineering*, 2024, 38(2): 77-81.
- [27] 郭广山, 徐凤银, 刘丽芳, 等. 鄂尔多斯盆地府谷地区深部煤层气富集成藏规律及有利区评价[J]. *煤田地质与勘探*, 2024, 52(2): 81-91.
- GUO Guangshan, XU Fengyin, LIU Lifang, et al. Enrichment and accumulation patterns and favorable area evaluation of deep coalbed methane in the Fugu area, Ordos Basin[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2024, 52(2): 81-91.
- [28] 熊先钺, 闫霞, 徐凤银, 等. 深部煤层气多要素耦合控制机理、解吸规律与开发效果剖析[J]. *石油学报*, 2023, 44(11): 1812-1826, 1853.
- XIONG Xianyue, YAN Xia, XU Fengyin, et al. Analysis of multi-factor coupling control mechanism, desorption law and development effect of deep coalbed methane[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2023, 44(11): 1812-1826, 1853.
- [29] 杨勇, 雷卞军, 冯永玖, 等. 鄂尔多斯盆地子洲及邻区山西组二段高分辨率层序地层和煤沉积模式[J]. *石油与天然气地质*, 2013, 34(1): 58-67.
- YANG Yong, LEI Bianjun, FENG Yongjiu, et al. High-resolution sequence stratigraphy and coal sedimentary modes of Member 2 of Shanxi Formation in Zizhou and its adjacent areas, the Ordos Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2013, 34(1): 58-67.
- [30] 伊伟. 鄂尔多斯盆地韩城矿区中煤阶煤层气成藏模式[J]. *新疆石油地质*, 2017, 38(2): 165-170.
- YI Wei. Accumulation pattern of medium rank coalbed methane in Hancheng mining area, Ordos Basin[J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 2017, 38(2): 165-170.
- [31] 王双明. 鄂尔多斯盆地构造演化和构造控煤作用[J]. *地质通报*, 2011, 30(4): 544-552.
- WANG Shuangming. Ordos Basin tectonic evolution and structural control of coal[J]. *Geological Bulletin of China*, 2011, 30(4): 544-552.
- [32] 杨孟达. 煤矿地质学[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2000.
- YANG Mengda. Coal mining geology[M]. Beijing: China Coal Industry Publishing House, 2000.
- [33] WAPLES D W, MARZI R W. The universality of the relationship between vitrinite reflectance and transformation ratio[J]. *Organic Geochemistry*, 1998, 28(6): 383-388.
- [34] 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 Petrolei Sinica*, 2023, 44(11): 1854-1866, 1902.
- [35] 周三栋, 刘大锰, 蔡益栋, 等. 低阶煤吸附孔特征及分形表征[J]. *石油与天然气地质*, 2018, 39(2): 373-383.
- ZHOU Sandong, LIU Dameng, CAI Yidong, et al. Characterization and fractal nature of adsorption pores in low rank coal[J]. *Oil & Gas Geology*, 2018, 39(2): 373-383.
- [36] 贾腾飞, 王猛, 高星月, 等. 低阶煤储层孔隙结构特征及分形模型评价[J]. *天然气地球科学*, 2021, 32(3): 423-436.
- JIA Tengfei, WANG Meng, GAO Xingyue, et al. Pore structure characteristics of low-rank coal reservoirs and evaluation of fractal models[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2021, 32(3): 423-436.
- [37] 张雷, 边利恒, 侯伟, 等. 深部煤储层孔隙结构特征及其勘探意义——以鄂尔多斯盆地东缘大宁—吉县区块为例[J]. *石油学报*, 2023, 44(11): 1867-1878.
- ZHANG Lei, BIAN Liheng, HOU Wei, et al. Pore structure characteristics and exploration significance of deep coal reservoirs: A case study of Daning-Jixian block in the eastern margin of Ordos Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2023, 44(11): 1867-1878.
- [38] 孙璐, 周国晓, 荆雪媛, 等. 鄂尔多斯盆地中东部本溪组深部煤岩分形特征与成储机理[J]. *西安石油大学学报(自然科学版)*, 2024, 39(3): 1-11.
- SUN Lu, ZHOU Guoxiao, JING Xueyuan, et al. Research on fractal characteristics and reservoir forming mechanism of deep coal rock in Benxi Formation, central-eastern Ordos Basin[J]. *Journal of Xi'an Shiyou University (Natural Science Edition)*, 2024, 39(3): 1-11.
- [39] LI Zhongbei, REN Ting, LI Xiangchun, et al. Multi-scale pore fractal characteristics of differently ranked coal and its impact on gas adsorption[J]. *International Journal of Mining Science and Technology*, 2023, 33(4): 389-401.
- [40] 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.