石油与天然气地质
第45卷 第6期 OIL & GAS GEOLOGY 2024年12月
文章编号:0253-9985(2024)06-1628-12 doi:10.11743/ogg20240610

鄂尔多斯盆地东北部斜坡区深层煤层气地质特征与勘探潜力

赵石虎[1,2,3,4],刘曾勤[1,2,3,4],申宝剑[1,2,3,4],罗 兵[1,2,3,4,5],陈 刚[1,2,3,4],陈新军[1,2,3,4],
张嘉琪[1,2,3,4],万俊雨[6],刘子驿[6],刘友祥[6]

(1. 页岩油气富集机理与高效开发全国重点实验室,北京 102206;2. 中国石化 页岩油气勘探开发重点实验室,北京 102206;3. 中国石化 深层煤层气勘探开发重点实验室,北京 102206;4. 中国石化 石油勘探开发研究院,北京 102206;5. 中国石化 江汉油田分公司勘探开发研究院,湖北 武汉 430223;6. 中国石化 石油勘探开发研究院 无锡石油地质研究所,江苏 无锡 214162)

摘要:近年来,鄂尔多斯盆地北部大牛地地区深层煤层气勘探取得重大突破。利用区域地质资料、岩心观察、显微组分分析、扫描电镜、工业分析、压汞测试、低温液氮吸附、二氧化碳吸附、甲烷等温吸附以及现场含量测试等多种技术多段,研究大牛地地区深部煤层的空间展布、煤岩煤质、储集性和含气性等地质特征,以明确该区深层煤层气勘探潜力。结果表明,大牛地地区主力煤储层太原组8#煤层:①全区稳定分布,厚度2~14 m,镜质体反射率(R_o)1.7%,上部层段发育光亮-半亮煤,灰分较低,煤质条件较好,具备煤层气富集的物质基础。②微孔和宏孔都较发育,以微孔为主,占比为67.5%,低灰光亮-半亮煤的总孔容、孔隙比表面积、微孔占比及孔隙度较大。③顶板发育厚层灰岩与暗色泥岩,构造简单,地层含水量低,属于干煤含气系统,总含气量20.3~47.1 m^3/t,游离气占比33.2%~66.2%,煤储层具有吸附气-游离气双富特征。④含气面积2 003 km^2,资源量5 422×10^8 m^3,资源丰度2.71×10^8 m^3/km^2。鄂尔多斯盆地北部深部煤层具有有利煤层气地质特征,是重要的勘探开发目的层。

关键词:等温吸附;游离气量;宏观煤岩类型;勘探潜力;深层煤层气;大牛地地区;鄂尔多斯盆地
中图分类号:TE122.3 **文献标识码**:A

Geological characteristics and exploration potential of deep coalbed methane in the slope area of the northeastern Ordos Basin

ZHAO Shihu[1,2,3,4], LIU Zengqin[1,2,3,4], SHEN Baojian[1,2,3,4], LUO Bing[1,2,3,4,5], CHEN Gang[1,2,3,4], CHEN Xinjun[1,2,3,4], ZHANG Jiaqi[1,2,3,4], WAN Junyu[6], LIU Ziyi[6], LIU Youxiang[6]

(1. *State Key Laboratory of Shale Oil and Gas Enrichment Mechanisms and Effective Development*, *Beijing* 102206, *China*; 2. *Key Laboratory of Shale Oil/Gas Exploration and Production Technology*, *SINOPEC*, *Beijing* 102206, *China*; 3. *Key Laboratory of Deep Coalbed Methane Exploration and Development*, *SINOPEC*, *Beijing* 102206, *China*; 4. *Petroleum Exploration and Production Research Institute*, *SINOPEC*, *Beijing* 102206, *China*; 5. *Exploration and Development Research Institute*, *Jianghan Oilfield Branch Company*, *SINOPEC*, *Wuhan*, *Hubei* 430223, *China*; 6. *Wuxi Institute of Petroleum Geology*, *Petroleum Exploration and Production Research Institute*, *SINOPEC*, *Wuxi*, *Jiangsu* 214162, *China*)

Abstract: In recent years, significant breakthroughs have been achieved in the exploration of deep coalbed methane (CBM) in the Daniudi area, northern Ordos Basin. This study aims to determine the potential for deep CBM exploration in this area. Based on regional geology and data derived from core and maceral observations, scanning electron microscopy (SEM) image analysis, proximate analysis, mercury injection capillary pressure (MICP) analysis, low-temperature liquid-nitrogen adsorption measurements, and CO_2 adsorption and methane isothermal adsorption experiments, along with on-site gas content tests, we delve into the geological characteristics of deep coal seams in the Daniudi area in terms of their spatial distribution, lithotypes, coal quality, reservoir properties, and gas-bearing

收稿日期:2024-09-13;**修回日期**:2024-10-16。
第一作者简介:赵石虎(1992—),男,博士研究生,非常规油气研究。**E-mail**: zhaoshh0310.syky@sinopec.com。
通信作者简介:刘曾勤(1985—),男,博士研究生,非常规油气研究。**E-mail**: liuzengqin.syky@sinopec.com。
基金项目:中国石化科技部项目(P23206,P21086-5,P23230);中国石化油田部先导项目(YTBXD-FCZY-2024-1-06-003)。

properties. The No. 8 coal seam of the Taiyuan Formation is identified as the dominant coal reservoir in the Daniudi area. The results indicate that this coal seam is consistently distributed throughout the Daniudi area, with a thickness ranging from 2 to 14 m and vitrinite reflectance (R_o) of 1.7 %. Bright to semi-bright coals occur in the upper part of the coal seam as featuring low ash content, indicating high coal quality and providing a material basis for CBM accumulation. The No. 8 coal seam shows well-developed micropores and macropores, with micropores being predominant, accounting for 67.5 %. The bright to semi-bright coals with low ash content therein display high total pore volume, specific surface area of pores, micropore proportion, and porosity. The roof of the coal seam contains thickly laminated limestones and dark mudstones, as characterized by simple structure and low formation water content, suggesting a dry-coal gas-bearing system. With total gas content ranging from 20.3 to 47.1 m³/t and free gas proportion from 33.2 % to 66.2 %, the No. 8 coal seam is rich in both adsorbed and free gases. This coal seam manifests a gas-bearing area of 2 003 km², CBM resources of 5 422 × 10^8 m³, and CBM resource abundance of 2.71 × 10^8 m³/km². These findings indicate that deep coals in the Ordos Basin are characterized by favorable geological condition for CBM generation, representing a significant exploration and development target.

Key words: isothermal adsorption, free gas content, macrolithotype of coals, exploration potential, deep coalbed methane (CBM), Daniudi area, Ordos Basin

引用格式:赵石虎,刘曾勤,申宝剑,等. 鄂尔多斯盆地东北部斜坡区深层煤层气地质特征与勘探潜力[J]. 石油与天然气地质,2024,45(6):1628-1639. DOI:10.11743/ogg20240610.

ZHAO Shihu, LIU Zengqin, SHEN Baojian, et al. Geological characteristics and exploration potential of deep coalbed methane in the slope area of the northeastern Ordos Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2024, 45(6): 1628-1639. DOI: 10.11743/ogg20240610.

中国深层煤层气(埋深>1 500 m)[1-3]资源丰富,地质资源量约为50.18 × 10^{12} m³,占全国煤层气资源总量的70.90 %[4-6],具备形成年产千亿立方米级天然气产业的资源基础[7-8]。前人研究表明,深层煤层气具有储层压力高、含水饱和度低、含气量高和存在游离气等特点[9-11],经有效压裂改造后,排、采见气时间短,产气峰值高,稳产时间长,产水量小[12-14],目前已在准噶尔盆地东部、鄂尔多斯盆地东缘及四川盆地东南部实现了勘探突破[15-19],其中鄂尔多斯盆地石炭系太原组8#煤层具有分布广、厚度大和镜质组含量高的特征,是中国深层煤层气勘探的主要目的层[2, 20]。近年来,针对该主力层系的煤层气勘探工作取得了一系列重大进展,鄂尔多斯盆地大宁—吉县、临兴—神府、纳林河—米脂北等区块探明地质储量达千亿立方米[21-23],并在大宁—吉县区块实现规模效益开发[10, 24-25],太原组8#煤层作为主力产气层显示出巨大的勘探潜力。近年来,鄂尔多斯盆地北部大牛地地区逐步推进深部煤层气勘探开发工作,部署多口煤层气井,其中水平井Y1HF井在太原组深层8#煤层试获日产煤层气峰值10.4 × 10^4 m³,年产煤层气2 300.0×10^4 m³,显示该区深层煤层气勘探开发前景广阔。

然而,大牛地地区太原组8#煤层与大宁—吉县区块在沉积背景与演化过程上存在显著差异,决定了二者的煤层气勘探潜力有所不同[26-27]。因此,进一步研究太原组8#煤层的成藏地质特征对于明确大牛地地区深层煤层气勘探潜力具有十分重要的意义。在前人研究的基础上,利用岩心观察与分析化验资料,开展该区太原组8#煤层煤岩煤质、储集性与含气性特征研究,评价勘探开发潜力,为鄂尔多斯盆地北部深部煤层气勘探开发提供参考。

1 研究区地质概况

大牛地地区位于鄂尔多斯盆地伊陕斜坡东北部(图1a),区内自下而上发育上石炭统太原组和下二叠统山西组含煤地层[26]。其中太原组一段(太一段)发育8#—10#煤层,太二段发育6#-7#煤层,山西组一段(山一段)发育3#—5#煤层,山二段发育1#-2#煤层[26]。其中,主力煤层太原组8#煤层位于太一段顶部,为太一段与太二段的标志层(图1c),其顶板主要发育灰岩与泥岩,底板发育泥岩及泥质粉砂岩,属于海-陆过渡相潮坪-潟湖聚煤沉积体系。

2 煤层分布与煤质特征

2.1 煤层分布特征

大牛地地区8#煤层全区分布稳定,厚度主要介于2 ~ 14 m,平均厚度6 m(图1 b)。研究区中部发育北东向薄煤层,厚度小于4 m,西南及东南地区煤层厚度较

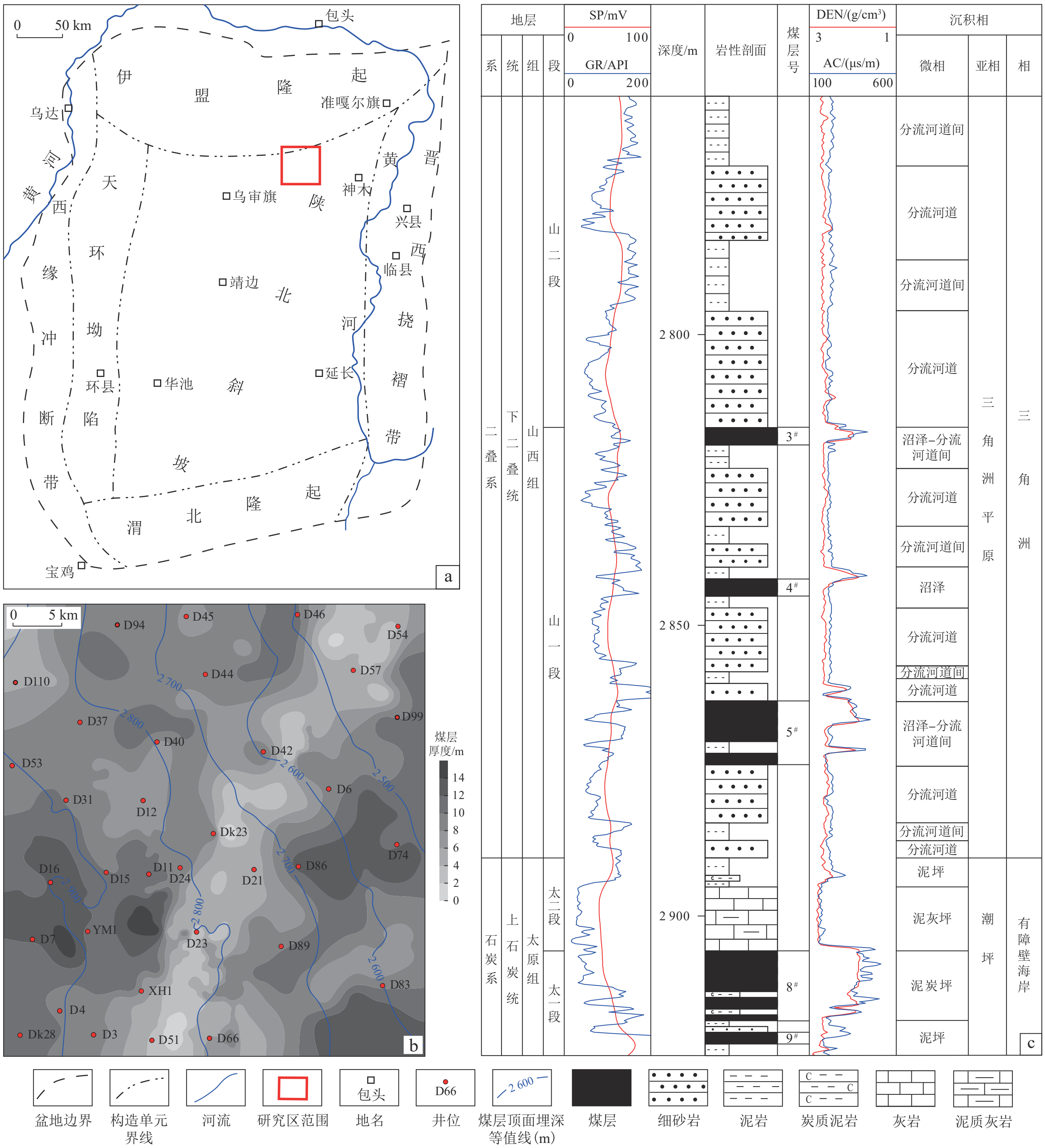

图1 鄂尔多斯盆地大牛地地区太原组8#煤层分布

Fig. 1 Distribution of the No. 8 coal seam of the Taiyuan Formation in the Daniudi area, Ordos Basin

a. 研究区构造位置;b. 8#煤层厚度与顶面埋深等值线图;c. 研究区太原组-山西组煤系地层综合柱状图

大,超过10 m,为水平井成井与大规模体积压裂改造提供了良好的基础条件。此外,8#煤层顶面埋深介于2 500 ~ 2 900 m,平均埋深2 700 m(图1b);整体为西南倾平缓单斜构造,倾角小于2°,构造简单,有利于煤层气保存。

2.2 煤岩学特征

大牛地地区8#煤层煤岩学特征主要包括宏观和显微煤岩组分发育特征,反映煤层生烃的物质基础。根据《宏观煤岩类型分类方案》(GB/T 18023—2000),结

合煤心肉眼观测与全直径CT扫描，揭示研究区8#煤层宏观煤岩类型发育特征。结果表明(图2)，8#煤层发育半亮型、光亮型、半暗型及暗淡型4种宏观煤岩类型，垂向展布复杂，非均质性较强，其中，下部主要发育半暗型、暗淡型煤岩和炭质页岩夹矸，中部主要发育半暗型和半亮型煤岩，上部优势煤岩类型为半亮型和光亮型。整体来看，由底至顶煤岩类型由半暗煤和暗淡煤逐渐向半亮煤和光亮煤过渡，光亮程度与生烃条件逐渐变好。

根据《煤的显微组分组和矿物测定方法》(GB/T

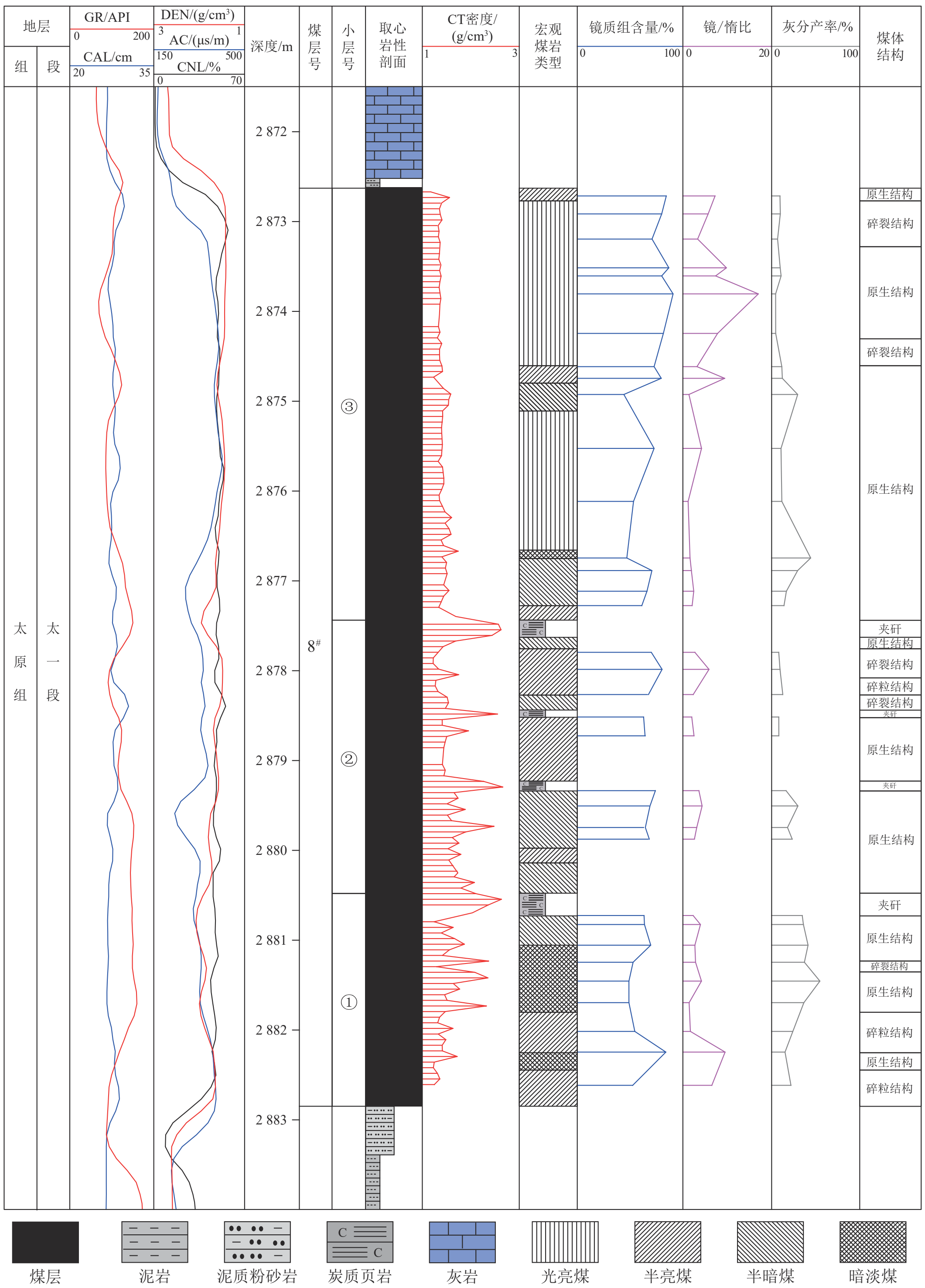

图2　鄂尔多斯盆地大牛地地区太原组8#煤层宏观煤岩类型及煤质垂向展布

Fig. 2　Vertical distribution of the coal macrolithotypes and quality of the No. 8 coal seam of the Taiyuan Formation in the Daniudi area, Ordos Basin

8899—2013），利用光学显微镜对粉煤光片中的显微组分进行观测，查明8#煤层显微煤岩特征。结果显示，该煤层显微组分主要为镜质组（V），油浸反射光下呈深灰色，含量为44.0％～88.8％，平均值为68.1％，其中均质镜质体主要呈条带状产出，发育微裂缝（图3a—c）；惰质组（I）成分次之，油浸反射光下呈灰白色，具中-高程度突起，含量为5.2％～44.8％，平均值为21.3％，其中丝质体植物胞腔完整，呈椭圆状，排列整齐（图3d，e），半丝质体胞腔破碎，排列不规则（图3c—e）；矿物组分含量2.0％～39.6％，平均值为8.6％，可见黏土矿物（油浸反射光下呈灰黑色）充填于胞腔中（图3d），或胶结于基质镜质体中（图3a，c，e）；另外，由于演化程度较高（镜质体反射率R_o=1.7％），未见壳质组分布。

8#煤层显微组分垂向分布特征（图2）表明，煤层下部镜质组含量相对较低，镜/惰比（V/I）较小，由下至上，镜质组含量与镜/惰比逐渐增大，反映了8#煤层沉积过程泥炭沼泽覆水深度具有逐渐增加的趋势，宏观煤岩类型由半暗煤-暗淡煤逐渐向光亮煤-半亮煤过渡。

2.3 煤质特征

基于《煤的工业分析方法——仪器法》（GB/T 30732—2014），开展煤的工业分析测试，结果显示研究区8#煤层工业组分以固定碳为主，灰分产率次之，空气干燥基固定碳、挥发分和全水分含量以及灰分产率分别为42.7％～82.5％，11.7％～18.6％，0.4％～0.8％和3.9％～44.0％，平均值分别为67.5％，14.1％，0.6％和17.9％，属于中-高固定碳、低挥发分和特低全水分含量，以及低-中灰分产率煤。挥发分与全水分含量垂向变化较小，固定碳含量与灰分产率垂向变化大，非均质性较强，其中煤层上部固定碳含量高且灰分产率低，中部固定碳含量与灰分产率中等，下部固定碳含量较低而灰分产率较高，煤质由底至顶逐渐变好（图2）。进一步分析发现，工业组分与宏观煤岩类型相关性较高，随着灰分产率升高以及固定碳含量减少，煤岩光泽减弱，宏观煤岩类型向半暗煤-暗淡煤过渡（图4a，b），表明研究区8#煤层的宏观煤岩类型主要受灰分影响，惰质组的作用相对较小（图4c）。

3 煤层储集性能

3.1 储集空间类型

岩心观察与扫描电镜分析显示，研究区8#煤层储集空间主要为裂隙和基质孔隙。裂隙包括内生割理和外生微裂隙2类，其中岩心尺度割理主要发育于镜煤条带中（图5a—c），割理线密度1.2～2.2条/cm，镜下尺度割理主要存在于均质镜质体条带中（图5d—f），多尺度观测结果显示裂隙部分为黏土矿物和碳酸盐矿物充填

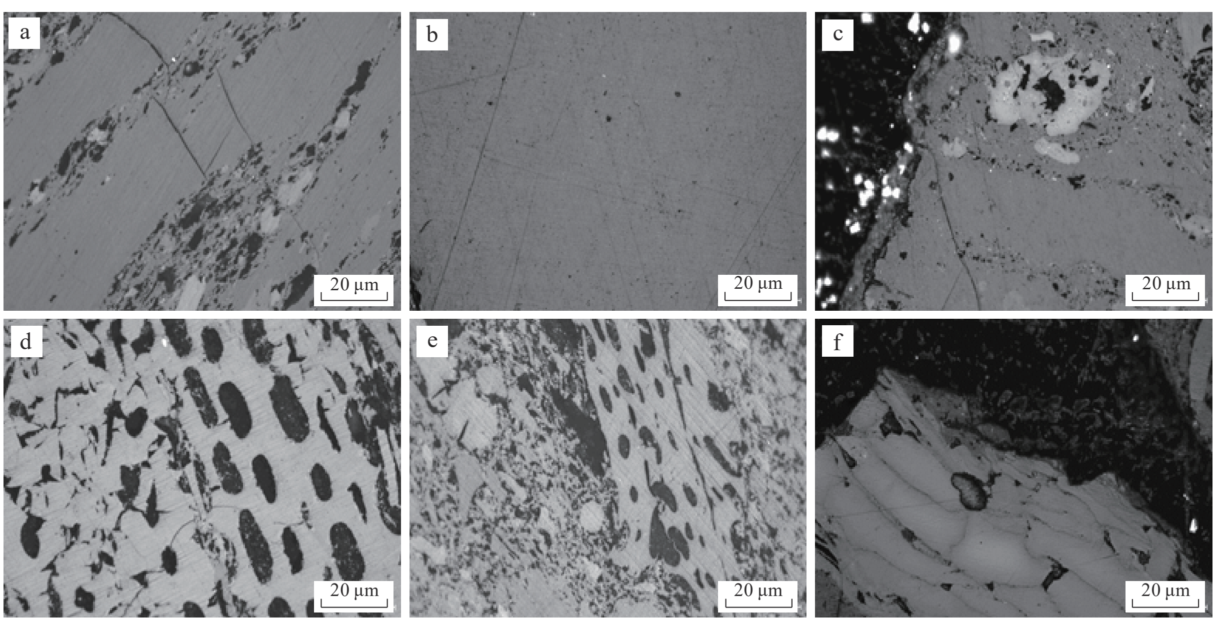

图3 鄂尔多斯盆地大牛地地区8#煤层Y1井显微组分镜下特征照片（反射光）

Fig. 3 Photomicrographs of macerals in the No. 8 coal seam in well Y1 in the Daniudi area, Ordos Basin (taken under reflected light)

a. 均质镜质体条带与基质镜质体，埋深2 874.93 m；b. 均质镜质体，埋深2 877.80 m；c. 均质镜质体条带与基质镜质体，埋深2 872.92 m；d. 丝质体与半丝质体，埋深2 876.89 m；e. 丝质体、半丝质体与基质镜质体，埋深2 880.83 m；f. 粗粒体，埋深2 872.72 m

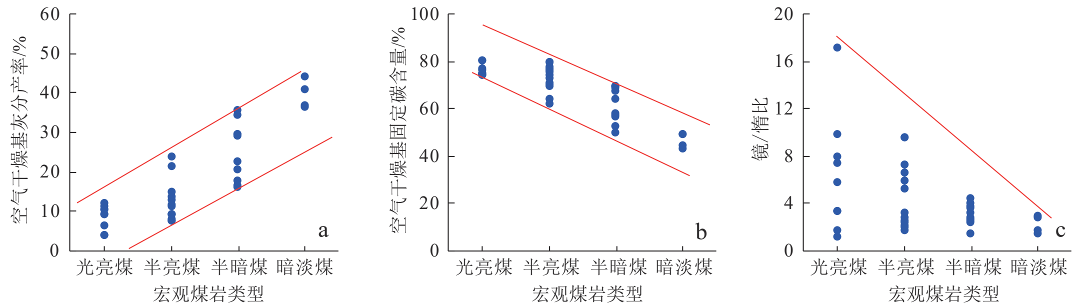

图4　鄂尔多斯盆地大牛地地区8#煤层宏观煤岩类型与煤质参数相关关系

Fig. 4　Relationships between the macrolithotypes and coal-quality parameters of the No. 8 coal seam of the Taiyuan Formation in the Daniudi area, Ordos Basin

a. 宏观煤岩类型与空气干燥基灰分产率关系;b. 宏观煤岩类型与空气干燥基固定碳含量关系;c. 宏观煤岩类型与镜/惰比关系

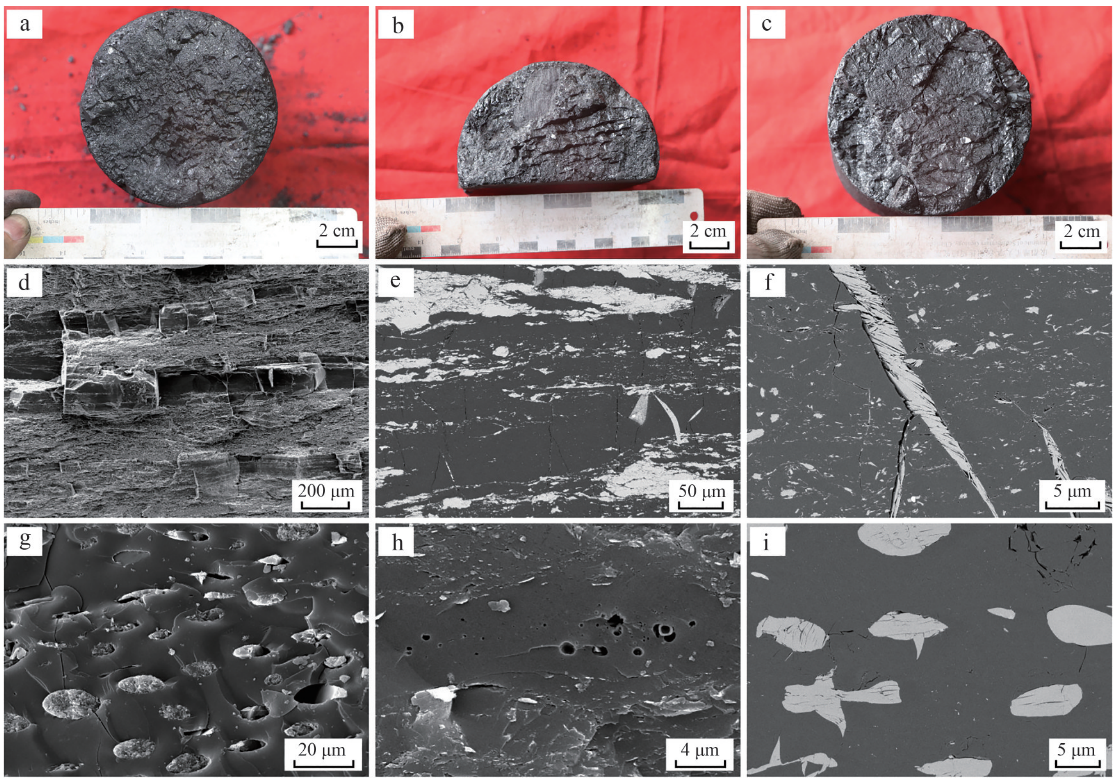

图5　鄂尔多斯盆地大牛地地区8#煤层Y1井典型储集空间岩心与镜下特征照片

Fig. 5　Core photos and photomicrographs of typical storage spaces in the No. 8 coal seam in well Y1 in the Daniudi area, Ordos Basin

a. 发育两组割理,埋深2 876.18 m,岩心;b. 主要发育一组割理,埋深2 875.65 m,岩心;c. 微裂隙,埋深2 875.52 m,岩心;d. 割理发育于均质镜质体条带,埋深2 885.19 m,扫描电镜;e. 割理发育于均质镜质体条带,埋深2 874.93 m,扫描电镜;f. 微裂隙与矿物晶间孔,埋深2 872.92 m,扫描电镜;g. 植物组织孔,埋深2 876.89 m,扫描电镜;h. 有机质气孔,埋深2 872.72 m,扫描电镜;i. 矿物晶间孔,埋深2 881.70 m,扫描电镜

(图5c, e, f);基质孔隙主要包括植物组织孔、有机质气孔、粒间孔与矿物晶间孔,其中植物组织孔呈椭圆状均匀排列,孔径大小5 ~ 20 μm (图5g, i),部分为黏土矿物充填,形成矿物晶间孔(图5i),有机质气孔呈蜂窝状分布,孔径范围10 ~ 100 nm(图5h)。

3.2　孔隙结构与孔隙度

煤是具有复杂孔隙结构的多孔介质,孔径大小及孔隙分布影响煤层气吸附、解吸、扩散与渗流[28-29]。目前孔隙结构研究方法主要包括流体注入法[30-32](压汞法、氮气吸附、二氧化碳吸附和核磁共振)和扫描法[33-34](光学显微镜、扫描电镜、原子力显微镜及CT扫描)。二者相比,流体注入法的定量表征能力更强,但不同流体注入法测量范围有限,因此本次研究利用低温CO_2吸附-低温N_2吸附-高压压汞多尺度孔隙联合表征方法,揭示研究区8#煤层的孔隙结构特征。如图6

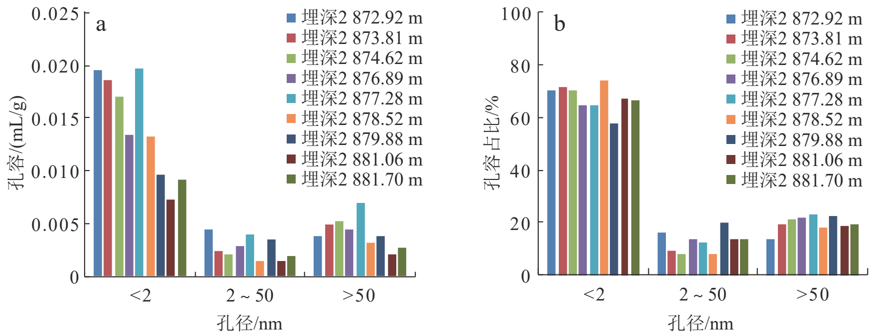

图6 基于多尺度联合表征的鄂尔多斯盆地大牛地地区太原组8#煤层孔隙结构分布

Fig. 6 Pore structure distributions of the No. 8 coal seam of the Taiyuan Formation in the Daniudi area, Ordos Basin derived using multi-scale combined characterization

所示，8#煤层主要发育微孔（孔径<2 nm），孔容为0.007～0.020 mL/g，占比57.6 %～73.9 %，平均值为67.5 %；宏孔（孔径>50 nm）次之，孔容为0.002～0.007 mL/g，占比13.8 %～22.8 %，平均值为19.7 %；介孔（孔径2～50 nm）发育最少，孔容为0.001～0.004 mL/g，占比8.2 %～20.2 %，平均值为12.8 %。表明8#煤层具有微孔和宏孔双发育的特征，与鄂尔多斯盆地其他地区8#煤层孔隙结构具有相似性[20]。

研究区8#煤样割理裂隙发育，柱塞样品钻取困难，本次研究利用氦气法对柱塞样品与不规则样品的孔隙度进行测试。8#煤层孔隙度主要分布于2.5 %～7.2 %，平均值为5.1 %，其中，基于不规则样品的测试结果略低于柱塞样品（图7），主要因为不规则样品测试结果反映的是煤基质物性特征，难以反映裂缝对物性的贡献。此外，随着埋深增加，孔隙度变化不大（图7），反映了一定埋深下，孔隙度已趋于稳定，深部具有一定的保孔能力。

进一步分析表明，煤岩煤质参数影响煤层的储集性能，较低的灰分产率、较高的镜质组含量、光亮煤-半亮煤的总孔容与孔隙比表面积更大且孔隙度更高

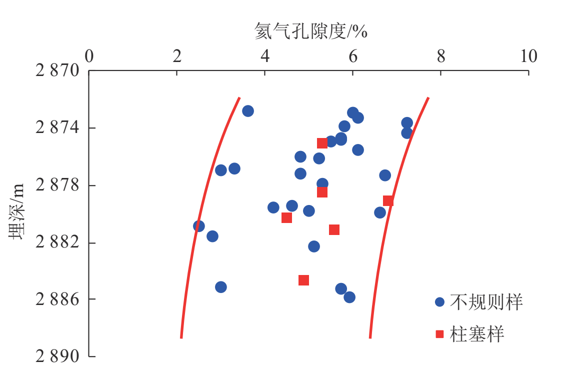

图7 鄂尔多斯盆地大牛地地区8#煤层孔隙度随埋深变化

Fig. 7 Burial depth vs. porosity of the No. 8 coal seam of the Taiyuan Formation in the Daniudi area, Ordos Basin

（图8a—i），这是因为煤储层孔隙主要为有机质孔，高灰分的半暗煤-暗淡煤中部分有机质孔被矿物充填，孔隙减小，扫描电镜结果（图5g，i）同样表明，半暗煤-暗淡煤中大量的植物组织孔被黏土矿物充填，使得储集性变差。此外，煤岩煤质影响煤储层的孔径分布，随着光泽强度增加、镜质组含量上升以及灰分产率减少，微孔占比提高（图8j—l），表明矿物对微孔影响更强烈，8#煤层具有很好的源-储耦合关系。

4 煤层含气性特征

依据煤的《高压等温吸附试验方法——重量法》（NB/T 10888—2021）与《煤层气含量测定——加温解吸法》（GB/T 28753—2012），分别开展地层温度（85 ℃）条件下等温吸附实验与现场含气量测试，揭示8#煤层的含气性特征。其中，8#煤层兰氏体积主要分布在7.8～21.5 m^3/t，平均值为16.2 m^3/t，兰氏压力为2.9～4.8 MPa，平均值为3.7 MPa，兰氏体积相对较高，反映8#煤层具有较强的吸附能力，有利于煤层气富集。另外，煤储层吸附能力与煤质、煤阶及储集参数间具有很好的相关性，随着煤层光泽强度增加、灰分产率减少、总孔容与孔隙比表面积增大，兰氏体积增加，吸附能力增强（图9），说明8#煤层上部的低灰光亮煤-半亮煤更有利于煤层气富集，是勘探开发的有利层段。

此外，研究区8#煤层含气量为20.3～47.1 m^3/t，平均值为30.4 m^3/t，与大宁—吉县地区相当[2, 10]。利用现场含气量与地层条件下理论吸附气量的差值，对煤层中游离气量进行初步估算。结果显示，游离气含量为8.3～29.1 m^3/t，平均值为15.9 m^3/t，游离气占比33.2 %～66.2 %，平均值为51.7 %（图10），反映了8#煤层具有吸附气-游离气双富特征。

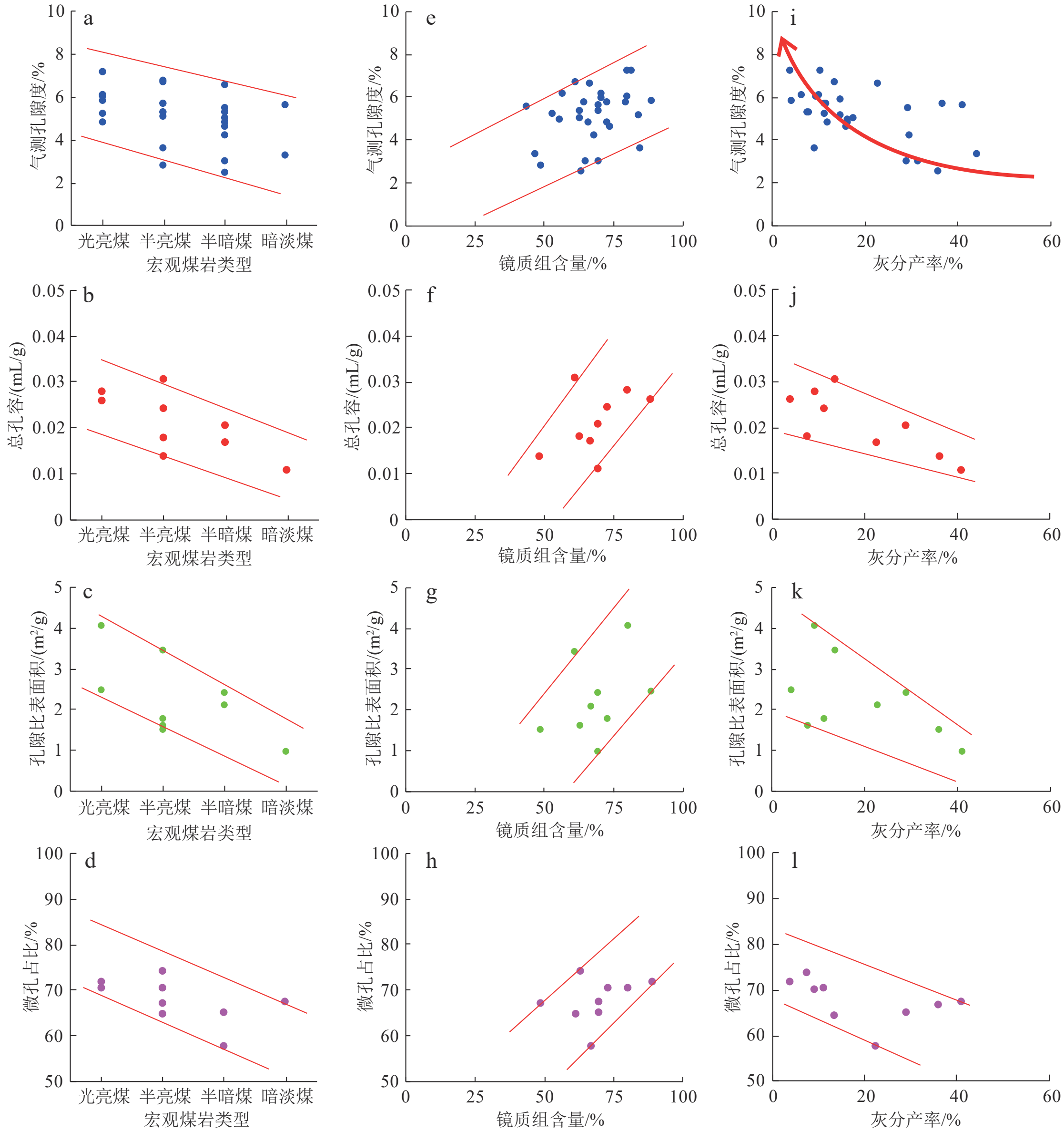

图 8　鄂尔多斯盆地大牛地地区 8#煤储层储集性参数随宏观煤岩类型(a—d)和煤质(e—l)变化

Fig. 8　Relationships of the reservoir property parameters with the coal macrolithotypes (a—d) and quality (e—l) of the No. 8 coal seam of the Taiyuan Formation in the Daniudi area, Ordos Basin

a—d. 宏观煤岩类型与气测孔隙度、总孔容、孔隙比表面积及微孔占比的关系;e—h. 镜质组含量与气测孔隙度、总孔容、孔隙比表面积及微孔占比的关系;i—l. 灰分产率与气测孔隙度、总孔容、孔隙比表面积及微孔占比的关系

5　勘探潜力

深层煤层气富集受沉积与构造等因素的综合控制[35-37],大牛地地区太原组煤层形成于海-陆过渡相潮坪-潟湖沉积体系[26],在稳定缓慢的海侵背景下,可容纳空间与泥炭堆积速率[38]具有很好的匹配关系,形成了具有分布广、厚度大和灰分低等特征的8#煤层。另外,受海-陆过渡相沉积体系影响,该煤层顶板主要发育厚层灰岩与暗色泥岩,封盖条件较好;煤层中游离气含量较高,部分地区处于障壁岛沉积区,煤层厚度小,顶板发育砂岩,封盖性能较差,煤层气易于逸散至上部地层,形成煤系致密砂岩气藏。此外,8#煤层自沉积后经历了近200 Ma的缓慢沉降过程,最大埋深达4 500 m[26],R_o达1.7 %,煤层持续大规模生烃,促进了割理系统的形成以及地层水的排出,白垩纪中期以后,受构造抬升影响,含气系统发生差异演化,抬升幅度越小,越有利于保持干煤含气系统的含气量[39]。大牛地地区地层抬升幅度接近1 500 m[26],远低于盆缘中-浅部煤层气藏的抬升幅度,因此有利于形成吸附气-游离气双富型

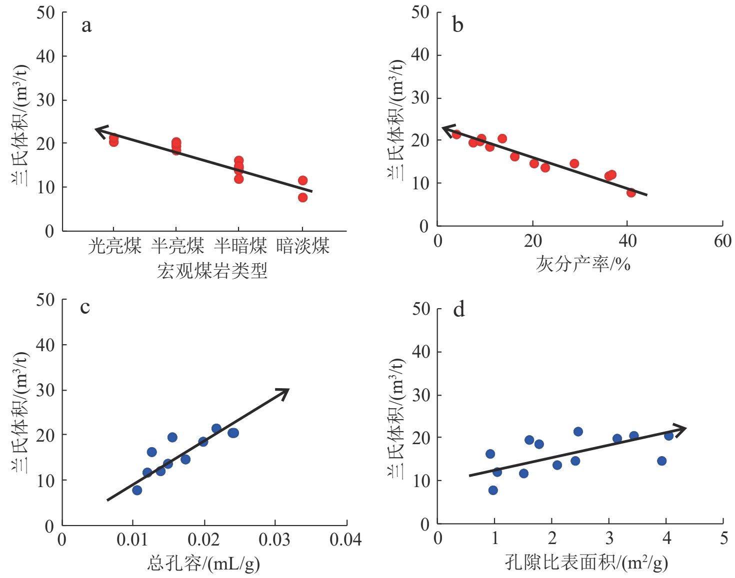

图9 鄂尔多斯盆地大牛地地区8#煤层兰氏体积随宏观煤岩类型(a)、煤质(b)及储集性参数(c,d)变化

Fig. 9 Relationships of the Langmuir volume with the coal macrolithotypes (a), quality (b), and reservoir property parameters (c,d) of the No. 8 coal seam of the Taiyuan Formation in the Daniudi area, Ordos Basin

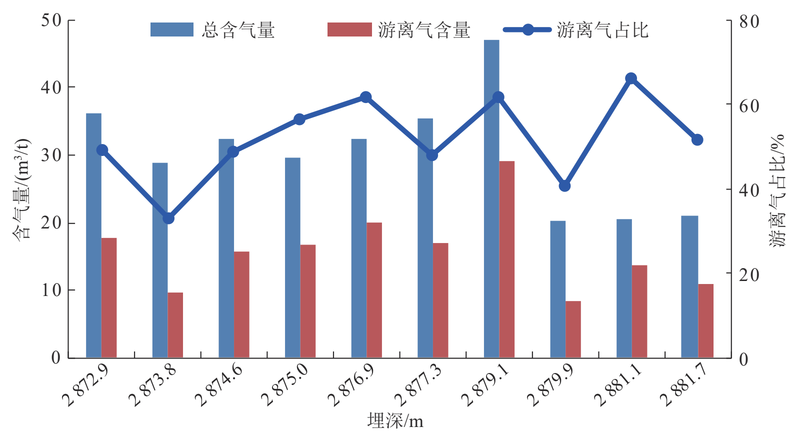

图10 鄂尔多斯盆地大牛地地区8#煤层Y1井游离气含量与占比垂向分布

Fig. 10 Vertical distributions of the free gas content and proportion of the No. 8 coal seam in well Y1 in the Daniudi area, Ordos Basin

深层煤层气藏,其中Y1井的理论吸附气含量平均为14.5 m^3/t,游离气含量平均为15.9 m^3/t,利用水平井与大排量体积压裂技术,放喷阶段即产气,试气峰值日产气量达10.4×10^4 m^3,稳产时间超过400 d,目前日产气量5.1×10^4 m^3,累产气量超过$2\ 300.0\times10^4$ m^3(图11)。

在以上研究基础上,基于研究区8#煤层厚度、密度和含气量等关键参数,采用体积法[40-43]进行资源量估算,得到研究区8#煤层含气面积为2 003 km^2,资源量为$5\ 422\times10^8$ m^3,资源丰度为2.71×10^8 m^3/km^2,显示了大牛地地区深层煤层气具备雄厚的资源基础,勘探潜力巨大,后续需加快区内井组试验,降本增效,实现煤层气效益开发。

6 结论

鄂尔多斯盆地北部大牛地地区深层煤层气勘探取得了单井突破,通过开展大牛地地区太原组8#煤层空间展布、煤岩煤质、储集性和含气性等地质特征研究,明确了其勘探潜力,获得以下几点认识。

1)研究区太原组8#煤层形成于海-陆过渡相潮坪-潟湖沉积体系,在稳定的海侵背景下,可容纳空间与泥炭堆积速率具有很好的匹配关系,煤层具有分布广、厚度大(2 ~ 14 m)和灰分产率低(平均值17.9 %)等特征。煤层上部层段发育光亮煤-半亮煤,煤质条件好,具备煤层气富集的物质基础。

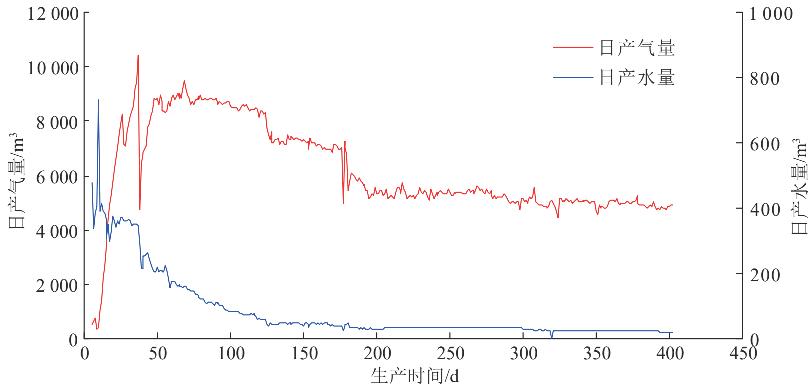

图 11　鄂尔多斯盆地大牛地地区 Y1 井煤层气生产曲线

Fig. 11　Production curves of coalbed methane from well Y1 in the Daniudi area, Ordos Basin

2）生烃演化史与煤岩煤质共同影响 8#煤层储集性特征，自沉积后持续缓慢沉降，最大埋深达到 4 500 m，R_o 达到 1.7 %，经历了持续大规模生烃阶段，形成了微孔（占比 67.5 %）和宏孔（占比 19.7 %）双发育的优势储层；低灰光亮煤-半亮煤的总孔容、孔隙比表面积、微孔占比与孔隙度较大，揭示煤层具有很好的源-储耦合关系。

3）有利的顶板岩性（厚层灰岩与暗色泥岩）与低幅度的构造抬升（地层抬升幅度<1 500 m）促进了研究区吸附气-游离气双富型深层煤层气藏的形成。研究区 8#煤层总含气量高（20.3 ~ 47.1 m^3/t），游离气占比大（33.2 % ~ 66.2 %），经有效压裂改造后，排采见气时间短，产气峰值高，稳产时间长，产水量小。

参 考 文 献

［1］ 郭旭升，胡宗全，李双建，等. 深层—超深层天然气勘探研究进展与展望［J］. 石油科学通报，2023，8（4）：461-474.

GUO Xusheng，HU Zongquan，LI Shuangjian，et al. Progress and prospect of natural gas exploration and research in deep and ultra-deep strata［J］. Petroleum Science Bulletin，2023，8（4）：461-474.

［2］ 徐凤银，王成旺，熊先钺，等. 鄂尔多斯盆地东缘深部煤层气成藏演化规律与勘探开发实践［J］. 石油学报，2023，44（11）：1764-1780.

XU Fengyin，WANG Chengwang，XIONG Xianyue，et al. Evolution law of deep coalbed methane reservoir formation and exploration and development practice in the eastern margin of Ordos Basin［J］. Acta Petrolei Sinica，2023，44（11）：1764-1780.

［3］ 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.

［4］ 张道勇，朱杰，赵先良，等. 全国煤层气资源动态评价与可利用性分析［J］. 煤炭学报，2018，43（6）：1598-1604.

ZHANG Daoyong，ZHU Jie，ZHAO Xianliang，et al. Dynamic assessment of coalbed methane resources and availability in China［J］. Journal of China Coal Society，2018，43（6）：1598-1604.

［5］ 申建，秦勇. 我国主要盆地深部煤层气资源量预测［R］. 徐州：中国矿业大学，2021.

SHEN Jian，QIN Yong. Prediction of deep coalbed methane resources in major basins in China［R］. Xuzhou：China University of Mining and Technology，2021.

［6］ 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.

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

LUO Pingya，ZHU Suyang. Theoretical and technical fundamentals of a 100 billion-cubic-meter-scale large industry of coalbed methane in China［J］. Acta Petrolei Sinica，2023，44（11）：1755-1763.

［8］ 秦勇，申建，史锐. 中国煤系气大产业建设战略价值与战略选择［J］. 煤炭学报，2022，47（1）：371-387.

QIN Yong，SHEN Jian，SHI Rui. Strategic value and choice on construction of large CMG industry in China［J］. Journal of China Coal Society，2022，47（1）：371-387.

［9］ 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.

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.

［10］ 李曙光，王成旺，王红娜，等. 大宁-吉县区块深层煤层气成藏特征及有利区评价［J］. 煤田地质与勘探，2022，50（9）：59-67.

LI Shuguang，WANG Chengwang，WANG Hongna，et al. Reservoir forming characteristics and favorable area evaluation of deep coalbed methane in Daning-Jixian Block［J］. Coal Geology &

Exploration, 2022, 50(9): 59-67.

[11] 李勇, 徐立富, 张守仁, 等. 深煤层含气系统差异及开发对策[J]. 煤炭学报, 2023, 48(2): 900-917.
LI Yong, XU Lifu, ZHANG Shouren, et al. Gas bearing system difference in deep coal seams and corresponded development strategy [J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48 (2): 900-917.

[12] 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.

[13] 聂志宏, 时小松, 孙伟, 等. 大宁-吉县区块深层煤层气生产特征与开发技术对策[J]. 煤田地质与勘探, 2022, 50(3): 193-200.
NIE Zhihong, SHI Xiaosong, SUN Wei, et al. Production characteristics of deep coalbed methane gas reservoirs in Daning-Jixian Block and its development technology countermeasures[J]. Coal Geology & Exploration, 2022, 50(3): 193-200.

[14] 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.

[15] 郭涛, 金晓波, 武迪迪, 等. 川东南南川区块龙潭组深部煤层气成藏特征及勘探前景[J]. 煤田地质与勘探, 2024, 52(4): 60-67.
GUO Tao, JIN Xiaobo, WU Didi, et al. Accumulation characteristics and exploration prospects of deep coalbed methane in the Longtan Formation of the Nanchuan block on the southeastern margin of the Sichuan Basin [J]. Coal Geology & Exploration, 2024, 52(4): 60-67.

[16] 孙斌, 杨敏芳, 杨青, 等. 准噶尔盆地深部煤层气赋存状态分析[J]. 煤炭学报, 2017, 42(增刊1): 195-202.
SUN Bin, YANG Minfang, YANG Qing, et al. Analysis on occurrence state of deep coalbed methane in Junggar Basin [J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(S1): 195-202.

[17] 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 Ordos Basin[J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(1): 528-544.

[18] 杨帆, 李斌, 王昆剑, 等. 深部煤层气水平井大规模极限体积压裂技术——以鄂尔多斯盆地东缘临兴区块为例[J]. 石油勘探与开发, 2024, 51(2): 389-398.
YANG Fan, LI Bin, WANG Kunjian, et al. Extreme massive hydraulic fracturing in deep coalbed methane horizontal wells: A case study of the Linxing Block, eastern Ordos Basin, NW China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2024, 51 (2): 389-398.

[19] 吴裕根, 门相勇, 娄钰. 我国"十四五"煤层气勘探开发新进展与前景展望[J]. 中国石油勘探, 2024, 29(1): 1-13.
WU Yugen, MEN Xiangyong, LOU Yu. New progress and prospect of coalbed methane exploration and development in China during the 14th Five-Year Plan period [J]. China Petroleum Exploration, 2024, 29(1): 1-13.

[20] 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.

[21] 徐凤银, 闫霞, 李曙光, 等. 鄂尔多斯盆地东缘深部(层)煤层气勘探开发理论技术难点与对策[J]. 煤田地质与勘探, 2023, 51(1): 115-130.
XU Fengyin, YAN Xia, LI Shuguang, et al. Theoretical and technological difficulties and countermeasures of deep CBM exploration and development in the eastern edge of Ordos Basin [J]. Coal Geology & Exploration, 2023, 51(1): 115-130.

[22] 朱光辉, 季洪泉, 米洪刚, 等. 神府深部煤层气大气田的发现与启示[J]. 煤田地质与勘探, 2024, 52(8): 12-21.
ZHU Guanghui, JI Hongquan, MI Hongga, et al. Discovery of a large gas field of deep coalbed methane in the Shenfu block and its implications [J]. Coal Geology & Exploration, 2024, 52 (8): 12-21.

[23] 国家能源局. 2023年全国油气勘探开发十大标志性成果[EB/OL]. (2024-01-09). http://www. nea. gov. cn/2024-01/09/c_1310759352. htm.
National Energy Administration. Top ten iconic achievements of national oil and gas exploration and development in 2023 [EB/OL]. (2024-01-09). http://www. nea. gov. cn/2024-01/09/c_1310759352. htm.

[24] 闫霞, 熊先钺, 李曙光, 等. 深部煤层气水平井各段产出贡献及其主控因素——以鄂尔多斯盆地东缘大宁—吉县区块为例[J/OL]. 天然气工业: 1-13[网络访问日期缺失]. http://kns. cnki. net/kcms/detail/51. 1179. TE. 20240416. 1430. 002. html.
YAN Xia, XIONG Xianyue, LI Shuguang, et al. Production contributions of deep CBM horizontal well sections and their controlling factors: A case study of Daning-Jixian area, eastern Ordos Basin[J/OL]. Natural Gas Industry: 1-13[网络访问日期缺失]. http://kns. cnki. net/kcms/detail/51. 1179. TE. 20240416. 1430. 002. html.

[25] 王成旺, 刘新伟, 李曙光, 等. 大宁—吉县区块深部煤层气富集主控因素分析及地质工程甜点区评价[J]. 西安石油大学学报(自然科学版), 2024, 39(4): 1-9.
WANG Chengwang, LIU Xinwei, LI Shuguang, et al. Analysis of main controlling factors of deep coalbed methane enrichment and evaluation of geological and engineering sweet areas in Daning-Jixian Block [J]. Journal of Xi'an Shiyou University (Natural Science Edition), 2024, 39(4): 1-9.

[26] 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.
[27] 杨智, 何生, 邹才能, 等. 鄂尔多斯盆地北部大牛地气田成岩成藏耦合关系[J]. 石油学报, 2010, 31(3): 373-378, 385.
YANG Zhi, HE Sheng, ZOU Caineng, et al. Coupling relationship between reservoir diagenesis and natural gas accumulation of Daniudi Gas Field in North Ordos Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2010, 31(3): 373-378, 385.
[28] 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.
[29] 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 proes in coal reservoir and its research significance[J]. Journal of China Coal Society, 2001, 26(1): 40-44.
[30] LI Jijun, YIN Jianxin, ZHANG Yanian, et al. A comparison of experimental methods for describing shale pore features—A case study in the Bohai Bay Basin of eastern China[J]. International Journal of Coal Geology, 2015, 152(Part B): 39-49.
[31] LI Yong, TANG Dazhen, ELSWORTH D, et al. Characterization of coalbed methane reservoirs at multiple length scales: A cross-section from southeastern Ordos Basin, China[J]. Energy & Fuels, 2014, 28(9): 5587-5595.
[32] WANG Shaoqing, LIU Shimin, SUN Yibo, et al. Investigation of coal components of Late Permian different ranks bark coal using AFM and micro-FTIR[J]. Fuel, 2017, 187: 51-57.
[33] 陈立超, 张典坤, 吕帅锋, 等. 海/陆相页岩微观力学性质压痕测试研究[J]. 油气地质与采收率, 2022, 29(6): 31-38.
CHEN Lichao, ZHANG Diankun, LYU Shuaifeng, et al. Micromechanical characteristics of marine/continental shale based on indentation test [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2022, 29(6): 31-38.
[34] GOLUBEV Y A, KOVALEVA O V, YUSHKIN N P. Observations and morphological analysis of supermolecular structure of natural bitumens by atomic force microscopy [J]. Fuel, 2008, 87(1): 32-38.
[35] 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.
[36] 闫霞, 徐凤银, 聂志宏, 等. 深部微构造特征及其对煤层气高产“甜点区”的控制——以鄂尔多斯盆地东缘大吉地区为例[J]. 煤炭学报, 2021, 46(8): 2426-2439.
YAN Xia, XU Fengyin, NIE Zhihong, et al. Microstructure characteristics of Daji area in east Ordos Basin and its control over the high yield dessert of CBM[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(8): 2426-2439.
[37] 高玉巧, 李鑫, 何希鹏, 等. 延川南深部煤层气高产主控地质因素研究[J]. 煤田地质与勘探, 2021, 49(2): 21-27.
GAO Yuqiao, LI Xin, HE Xipeng, et al. Study on the main controlling geological factors of high yield deep CBM in southern Yanchuan Block[J]. Coal Geology & Exploration, 2021, 49(2): 21-27.
[38] 刘炳强, 王敏, 王东东, 等. 巨厚煤层物质组成特征与成因机制——以柴北缘鱼卡地区中侏罗统为例[J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(5): 176-190.
LIU Bingqiang, WANG Min, WANG Dongdong, et al. Composition characteristics and genetic mechanism of ultra thick coal seams: A case study of Middle Jurassic in Yuqia area, Northern Qaidam Basin[J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(5): 176-190.
[39] 李勇, 徐立富, 刘宇, 等. 深部煤层气水赋存机制、环境及动态演化[J]. 煤田地质与勘探, 2024, 52(2): 40-51.
LI Yong, XU Lifu, LIU Yu, et al. Occurrence mechanism, environment and dynamic evolution of gas and water in deep coal seams[J]. Coal Geology & Exploration, 2024, 52(2): 40-51.
[40] 张道勇, 朱杰, 赵先良, 等. 全国煤层气资源动态评价与可利用性分析[J]. 煤炭学报, 2018, 43(6): 1598-1604.
ZHANG Daoyong, ZHU Jie, ZHAO Xianliang, et al. Dynamic assessment of coalbed methane resources and availability in China [J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(6): 1598-1604.
[41] 庚勐, 陈浩, 陈艳鹏, 等. 第4轮全国煤层气资源评价方法及结果[J]. 煤炭科学技术, 2018, 46(6): 64-68.
GENG Meng, CHEN Hao, CHEN Yanpeng, et al. Methods and results of the fourth round national CBM resources evaluation[J]. Coal Science and Technology, 2018, 46(6): 64-68.
[42] 李伟, 申建, 李超, 等. 沁水盆地榆社-武乡区块深部煤层气赋存条件及开发甜点预测[J]. 大庆石油地质与开发, 2023, 42(4): 9-19.
LI Wei, SHEN Jian, LI Chao, et al. Occurrence conditions and development sweet spots prediction of deep coalbed methane in Yushe-Wuxiang block of Qinshui Basin[J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2023, 42(4): 9-19.
[43] 李彬, 邱峰, 张晓洲, 等. 二连盆地巴彦宝力格煤田伊敏组低煤阶煤层气成藏条件及有利区预测[J]. 大庆石油地质与开发, 2023, 42(4): 20-29.
LI Bin, QIU Feng, ZHANG Xiaozhou, et al. Accumulation conditions and favorable areas prediction of low-rank CBM in Yimin Formation of Bayanbaolige coalfield in Erlian Basin [J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2023, 42(4): 20-29.

(编辑　张　晟)