

引用格式:王良军,王勇,章新文,等.鄂尔多斯盆地南部聚煤作用控气和煤层气勘探潜力:以旬宜探区石炭系太原组为例[J].油气藏评价与开发,2025,15(2):175-184.

WANG Liangjun, WANG Yong, ZHANG Xinwen, et al. Coal accumulation control on gas and coalbed methane exploration potential in southern Ordos Basin: A case study of Carboniferous Taiyuan Formation in Xunyi exploration area[J]. Petroleum Reservoir Evaluation and Development, 2025, 15(2): 175-184.

DOI: 10.13809/j.cnki.cn32-1825/te.2025.02.002

鄂尔多斯盆地南部聚煤作用控气和煤层气勘探潜力 ——以旬宜探区石炭系太原组为例

王良军¹, 王勇¹, 章新文², 金芸芸², 朱颜², 张高源², 李晖², 李旺举²

(1. 中国石化河南油田分公司, 河南 南阳 473000; 2. 中国石化河南油田分公司勘探开发研究院, 河南 南阳 473000)

摘要:在分析鄂尔多斯盆地南部旬宜探区石炭系太原组成煤环境基础上,结合古地貌分析和沉积相研究,明确了太原组聚煤特征。利用工业分析、扫描电镜、等温吸附等实验分析手段,并且结合测井建模评价的方法,明确了煤层的煤岩和煤质、储集物性、含气性等特征,剖析总结了深层煤层气富集控气要素和成藏特征,从而指出了下一步有利区带。结合煤层气勘探实践,明确了深层煤层气具备良好的勘探前景。研究表明:①旬宜探区石炭系太原组煤层发育受潮坪泥炭坪、泻湖泥炭坪2种成煤环境影响。受成煤环境和沉积古地貌影响,煤层分布具有“西薄东厚”的聚煤特征。②煤岩类型以亮煤—半亮煤为主,煤体结构以原生—碎裂结构为主,发育植物胞腔孔、黄铁矿与黏土矿物晶间孔、割理裂隙等储集空间类型。③煤层含气量介于15.8~25.6 m³/t,含气性中等—较好。煤层气富集受控于成煤环境、构造演化、保存条件等因素。④西北斜坡区具有断层不发育、地层常压、地层水动力弱,煤层埋深大的特点,是深层常压煤层气勘探有利区;东南断坡区具有断层较发育、地层低压、地层水动力较强,煤层埋深中等的特点,是中深层低压煤层气勘探有利区。位于东南断坡区的PZ1井煤层压裂测试获低产气流,展示了鄂尔多斯盆地复杂构造带深层煤层气具有较好的勘探前景。

关键词:鄂尔多斯盆地;旬宜探区;煤层气;聚煤特征;成藏特征;有利区带

中图分类号:TE122

文献标识码:A

Coal accumulation control on gas and coalbed methane exploration potential in southern Ordos Basin: A case study of Carboniferous Taiyuan Formation in Xunyi exploration area

WANG Liangjun¹, WANG Yong¹, ZHANG Xinwen², JIN Yunyun², ZHU Yan², ZHANG Gaoyuan², LI Hui², LI Wangju²

(1. Sinopec Henan Oilfield Company, Nanyang, Henan 473000, China;

2. Exploration and Development Research Institute, Sinopec Henan Oilfield Company, Nanyang, Henan 473000, China)

Abstract: Based on the analysis of the coal-forming environment of the Carboniferous Taiyuan Formation in Xunyi exploration area, southern Ordos Basin, and combined with paleogeomorphological analysis and sedimentary facies research, the coal accumulation characteristics of Taiyuan Formation were identified. By using experimental analysis methods such as industrial analysis, scanning electron microscopy, and isothermal adsorption, along with well-logging modeling evaluation, the characteristics of coal petrology and coal quality, reservoir physical properties, and gas content were investigated. The key controlling factors for deep coalbed methane accumulation and reservoir formation characteristics were analyzed and summarized, identifying favorable zones for further exploration. Integrated with coalbed methane exploration practice, it was confirmed that deep coalbed methane had promising exploration potential. Research showed that: (1) the development of coal seams in the Carboniferous Taiyuan Formation in the Xunyi exploration area was influenced by two coal-forming environments: tidal flat peat bogs and lagoon peat bogs. Due to the influence of coal-forming environments and sedimentary paleogeomorphology, the coal seam distribution exhibited a “thin in the west and thick in the east” coal accumulation pattern. (2) The coal lithotypes were primarily bright coal and semi-bright coal, with the coal body structures mainly characterized by primary and fractured types. The types of reservoir space included plant cell lumen pores, intercrystalline pores of pyrite and clay minerals, and cleat fractures. (3) The gas content of coal seams ranged from 15.8 to 25.6 m³/t, indicating moderate to good gas-bearing properties. The enrichment of coalbed methane was controlled by factors such as the coal-forming

收稿日期:2024-10-21。

第一作者简介:王良军(1972—),男,硕士,正高级工程师,从事油气地质理论与勘探规划部署工作。地址:河南省南阳市宛城区官庄镇河南油田局办公楼,邮政编码:473132。E-mail:wanglj389.hnyt@sinopec.com

通信作者简介:章新文(1984—),男,本科,副研究员,从事非常规油气勘探综合研究工作。地址:河南省南阳市宛城区鼎盛大道河南油田科研办公楼,邮政编码:450000。E-mail:13015509745@163.com

基金项目:中国石化重点科技攻关项目“鄂南旬宜探区深部煤层气勘探潜力评价及关键技术”(P23203)。

environment, tectonic evolution, and preservation conditions. (4) The northwest slope area was characterized by underdeveloped faults, normal formation pressure, weak formation hydrodynamics, and large coal seam burial depth, making it a favorable zone for deep normal-pressure coalbed methane exploration. The southeast fault slope area had relatively developed faults, low formation pressure, strong formation hydrodynamics, and moderate coal seam burial depth, making it a favorable zone for medium-to-deep low-pressure coalbed methane exploration. The PZ1 well, located in the southeast fault slope area, produced a low gas flow during coal seam fracturing tests, demonstrating the promising exploration potential of deep coalbed methane in the structurally complex margin of the Ordos Basin.

Keywords: Ordos Basin; Xunyi exploration area; coalbed methane; coal accumulation characteristics; accumulation characteristics; favorable zone

近年来鄂尔多斯盆地临兴—神府、大宁—吉县、纳林、佳县—神木、大牛地等煤层气勘探取得了突破,展示了石炭系太原组煤层气具有良好的勘探潜力。万永平等^[1]研究表明:鄂尔多斯盆地的煤层气资源,特别是埋深超过2 000 m的深部煤层气资源占同深度范围内中国资源量的32%,勘探开发潜力大;同时,深部煤层气资源还具有煤层厚度大、结构完整、热演化程度高、含气量高和游离气占比高等优势,是未来中国煤层气勘探开发的重点区域^[2-7]。以鄂尔多斯盆地南部旬宜探区为例,通过分析太原组成煤环境与聚煤特征,明确了探区成煤环境与聚煤区,系统研究了煤层的煤岩和煤质、煤储层、含气性等特征,分析了煤层气成藏特征和富集规律,指出了煤层气勘探潜力及有利区。研究成果应用于勘探实践,实施了东南断坡区的PZ1井煤层压裂试气,试获低产气流,对鄂尔多斯盆地盆缘复杂构造带煤层气勘探和研究起到了一定的借鉴作用。

1 地质概况

旬宜探区位于鄂尔多斯盆地南部盆缘复杂构造带,横跨伊陕斜坡与渭北隆起2个二级构造单元^[8-9],区块面积为922.32 km²。钻井揭示区内自下而上发育长城系、寒武系、奥陶系、石炭系、二叠系、三叠系、白垩系、侏罗系和第四系地层。构造呈东南高、西北低的单斜构造,地层倾角介于0.5°~2.0°。根据断裂发育程度与构造样式,从北向南依次划分为西北斜坡区、东南断坡区、南部断褶区3个次一级构造带。发育下古生界海相碳酸盐岩含气系统、上古生界陆源碎屑岩含气系统、中生界陆源碎屑岩含油气系统,纵向上具有“上油下气”的成藏格局。区内钻至古生界的8口探井,均在石炭系太原组钻遇煤层,煤层累计厚度介于4~11 m,煤层的热演化生烃为上古生界成藏提供了丰富的气源条件,也为深部煤层气成藏提供了生烃物质基础。探区石炭系太原组发育2套主力煤层(图1),其中太2段底部发育8号煤层,为鄂尔多斯盆地区域性分布煤层;太1段中部发育10号煤层,该煤层旬宜探区东南部较为发育,在邻区延川南地区也有分布。

2 太原组成煤环境和聚煤特征

2.1 成煤环境

通过煤岩观察、岩性组合序列、有机显微组分和元素分析^[10-13],旬宜探区发育潮坪泥炭坪、潟湖泥炭坪2种成煤环境。潮坪泥炭坪为极潮湿强覆水—潮湿覆水还原环境,水体较浅,煤层单层厚度较厚,灰分含量低;潟湖泥炭坪为极潮湿强覆水强还原环境,水体较深,煤层单层厚度较薄,灰分含量高。

由煤岩观察分析可知:8号煤以亮煤—半亮煤为主,质纯、灰分含量低,割理裂隙发育,见节蕨类木本植物化石(图2a、图2b),反映沉积水体较浅,为潮坪泥炭坪成煤环境;10号煤以半暗—暗淡煤为主,灰分含量中—高,夹矸、黄铁矿发育,质不纯,割理裂隙不发育(图2c、图2d),反映沉积水体较深,强还原环境,为潟湖泥炭坪成煤环境。

由岩性组合序列分析可知:8号煤所处的太2段为泥—煤—泥岩性组合,煤层单层厚度较大,煤层顶板一般为泥岩,泥岩为深灰色—灰黑色,含有粉砂质泥岩,反映水体较为活跃,为潮坪泥炭坪成煤环境;10号煤所处的太1段为泥—煤—泥岩性组合,夹薄层灰岩,煤层单层厚度较薄,植物化石和黄铁矿发育,反映水体较为安静,为潟湖泥炭坪成煤环境。

由有机显微组分分析可知:太原组煤层显微组分以镜质体为主,惰质组次之,无壳质组,其中镜质体中以基质镜质体与团块镜质体居多,惰质组以半丝质体、粗粒体为主。8号煤层显微组分镜质组含量较高,平均77.75%,反映水体较浅,高等植物发育,为潮坪泥炭坪成煤环境;10号煤层显微组分镜质组含量较少,平均55.8%,反映水体较深,高等植物较少,为潟湖泥炭坪成煤环境。

显微组分三角图版和V/V+Ni、V/Cr元素图版表明:太原组煤层沉积水体环境为准厌氧—厌氧、极潮湿强覆水—潮湿覆水沉积环境(图3)。其中10号煤成煤环境水体较深,主要为极潮湿强覆水环境,8号煤成煤环境水体较浅,为极潮湿强覆水—潮湿覆水环境(表1)。

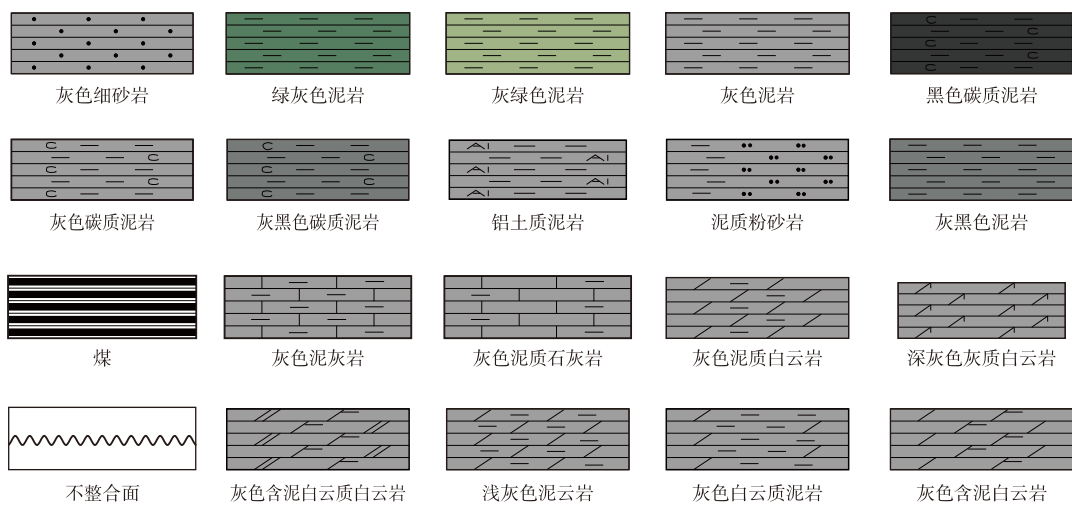
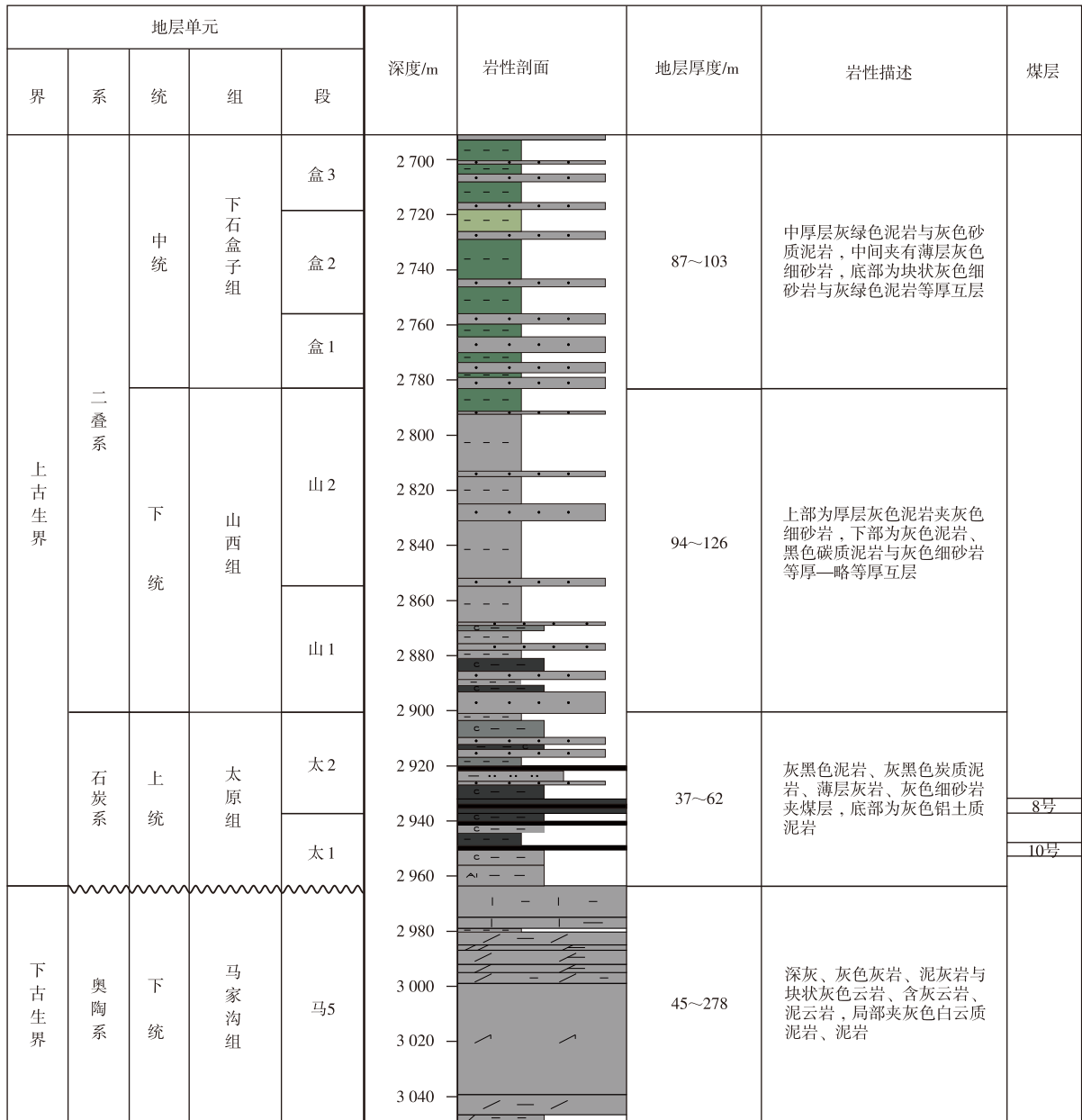
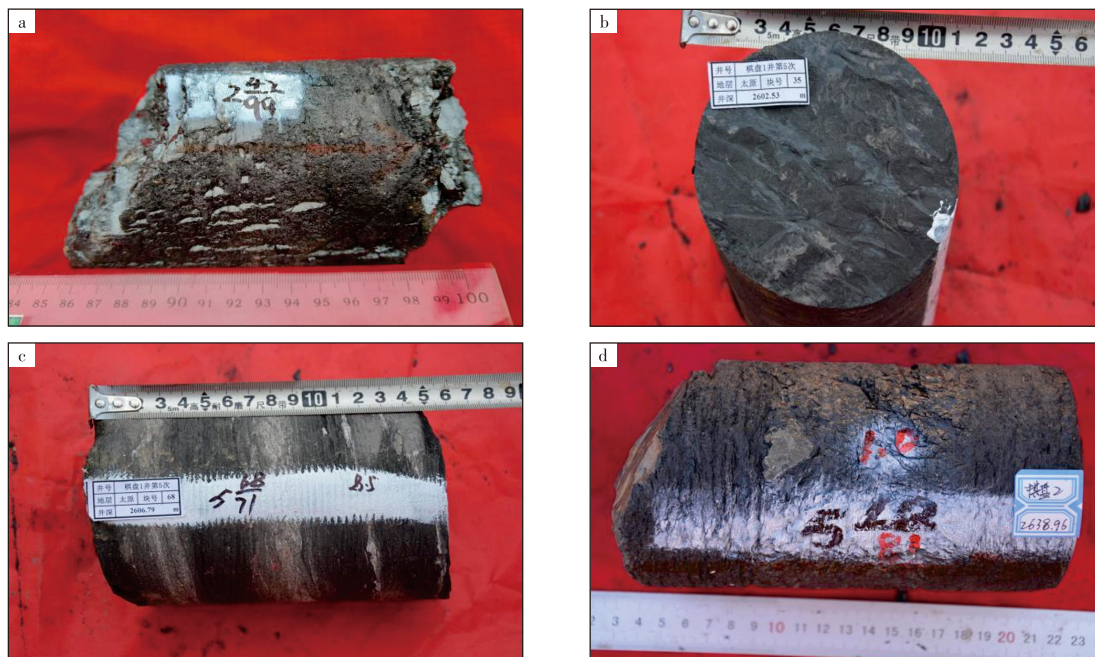


图1 鄂尔多斯盆地南部旬宜探区上古生界地层综合柱状图

Fig. 1 Comprehensive histogram of upper paleozoic strata in Xunyi exploration area, southern Ordos Basin



注: a. PZ1 井深 2 243.45 m, 半亮—光亮煤, 割理裂隙发育, 质纯, 性脆; b. QP1 井深 2 602.53 m, 半亮煤, 节蕨类化石发育; c. QP1 井深 2 606.79 m, 半暗—暗淡煤, 质不纯, 性不脆, 夹矸发育; d. QP2 井深 2 238.96 m, 半暗—暗淡煤, 质不纯, 性不脆, 裂隙较不发育, 黄铁矿发育。

图2 鄂尔多斯盆地南部旬宜探区太原组煤岩岩心

Fig. 2 Coal core of Taiyuan Formation in Xunyi exploration area, southern Ordos Basin

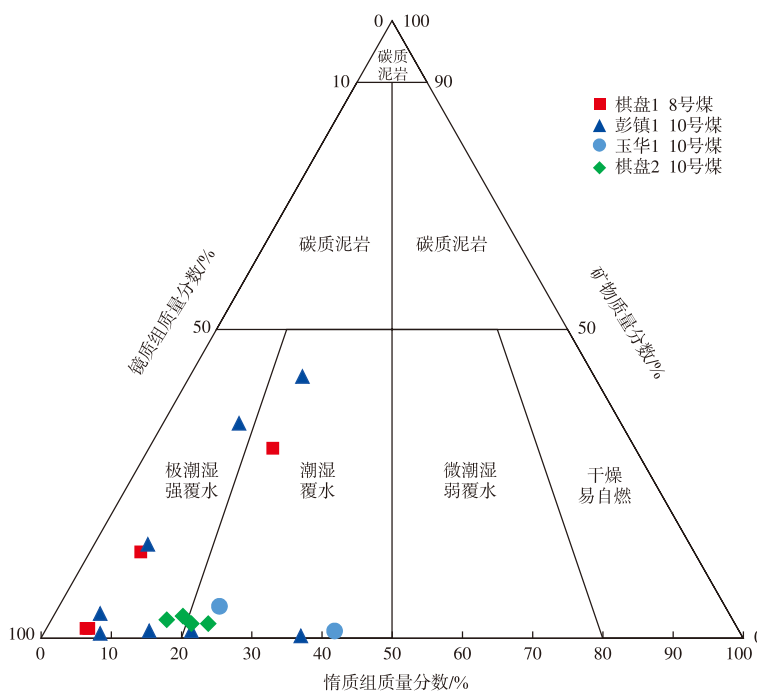


图3 鄂尔多斯盆地南部旬宜探区太原组煤层显微组分三角图版

Fig. 3 Ternary diagram of macerals in Taiyuan Formation coal seam, Xunyi exploration area, southern Ordos Basin

表1 鄂尔多斯盆地南部旬宜探区太原组煤层成煤环境特征要素

Table 1 Characteristics of coal-forming environment for Taiyuan Formation coal seam, Xunyi exploration area, southern Ordos Basin

代表井	典型煤层	成煤环境	成煤植物	古水深	沉积环境	单层厚度和分类	灰分含量(质量分数)/%	垂向序列
XY2井	8号煤层	潮坪泥炭坪	木本植物(节蕨类)	水体较浅	极潮湿强覆水—潮湿覆水、还原环境	1~5 m、中厚煤层	10~30	泥-煤-泥
QP2井	10号煤层	潟湖泥炭坪	草本植物	水体较深	极潮湿强覆水、强还原环境	1~2 m、薄煤层	30~40	砂-煤-泥或泥-煤-砂

2.2 聚煤特征

旬宜探区太原组发育8号、10号2套潮坪-潟湖相主力煤层,煤层的埋深介于2 200~3 600 m,累计厚度介于4~11 m,单层厚度介于2~5 m,横向分布稳定,分布范围广。受沉积时“西高东低”的古地貌控制,煤层分布具有“西薄东厚”沉积特征。

太原组1期,探区东南部处于潮坪泥炭坪与潟湖泥炭坪成煤环境。受成煤环境和沉积古地貌的控制^[14],聚煤中心位于探区东南部潮坪泥炭坪成煤环境控制下YH1—QP1井一带,受潟湖泥炭坪成煤控制下的QP2—PZ1井一带厚度较薄,一般介于1~2 m;探区西部处于泥坪-潮坪泥炭坪相,且沉积时古地貌较高,煤层仅在SL1井、XY2井、L4井一带零星发育;位于太1中段的10号煤层在探区东南部地区较为发育,单层厚度介于2~4 m,厚度中心位于YH1—QP1井一带(图4)。

太原组2期,全区处于潮坪泥炭坪成煤环境。受成煤环境和沉积古地貌的控制,煤层厚度向东逐渐增厚,聚煤中心位于东部的XY2—PZ1井一带;位于在太2段底部

的8号煤层全区稳定分布,由西向东逐渐增厚,单层厚度介于2~5 m,在XY2—PZ1井一带最厚(图5)。

3 太原组煤岩储层特征

3.1 煤岩煤质特征

太原组煤岩有机碳含量一般介于50.4%~93.0%,平均69.65%,有机显微组分以镜质组为主,惰质组次之,无壳质组。其中,镜质组占比为55.80%,惰质组占比为13.75%,有利于煤层生烃。太原组煤层镜质组反射率介于2.05%~2.64%,平均2.34%,属于高阶贫煤—无烟煤。自太原组沉积以后持续生烃至晚侏罗世—早白垩世,生气量较大,生烃条件好。宏观煤岩组分以亮煤为主,镜煤次之,光泽较强,半玻璃光泽;宏观煤岩类型以半亮煤—光亮煤为主。煤体结构以原生—碎裂结构为主,局部发育碎粒—糜棱结构煤。煤层水分占0.77%,挥发分占11.31%,灰分占24.05%,固定碳占63.87%,属于特低水分、低挥发分、中高灰分煤。

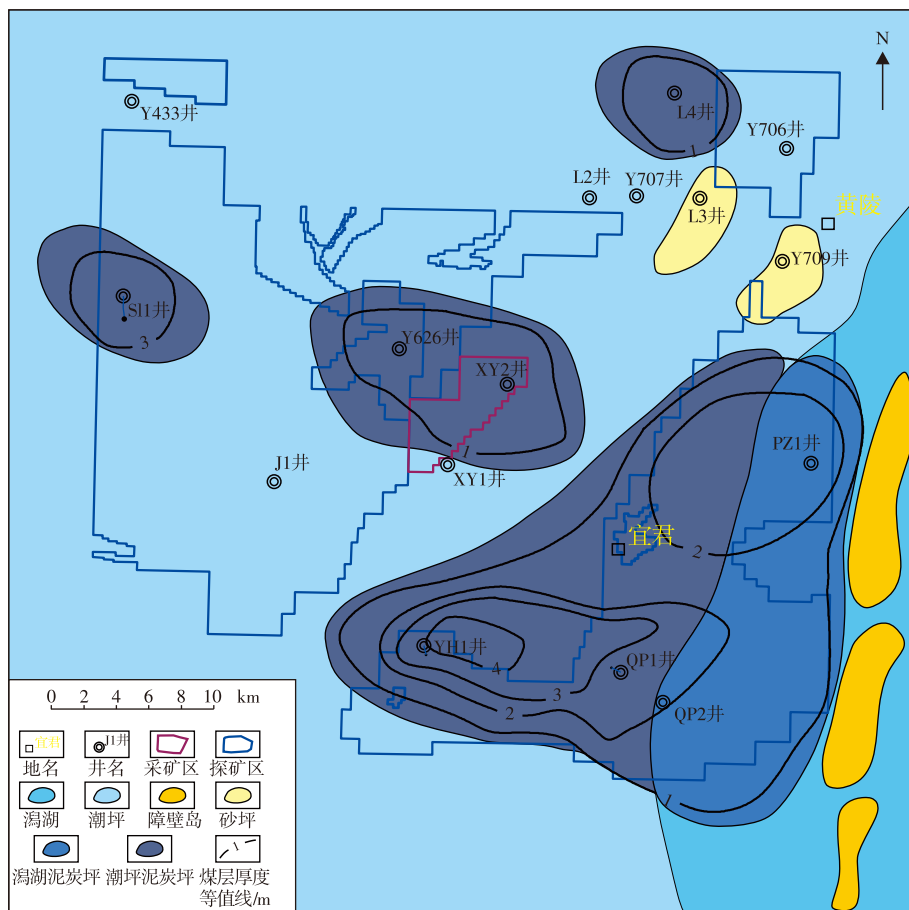


图4 鄂尔多斯盆地南部旬宜探区太原组1期成煤环境与10号煤层厚度叠合图

Fig. 4 Superimposed diagram of phase 1 coal-forming environment and thickness of the 10th coal seam in Taiyuan Formation, Xunyi exploration area, southern Ordos Basin

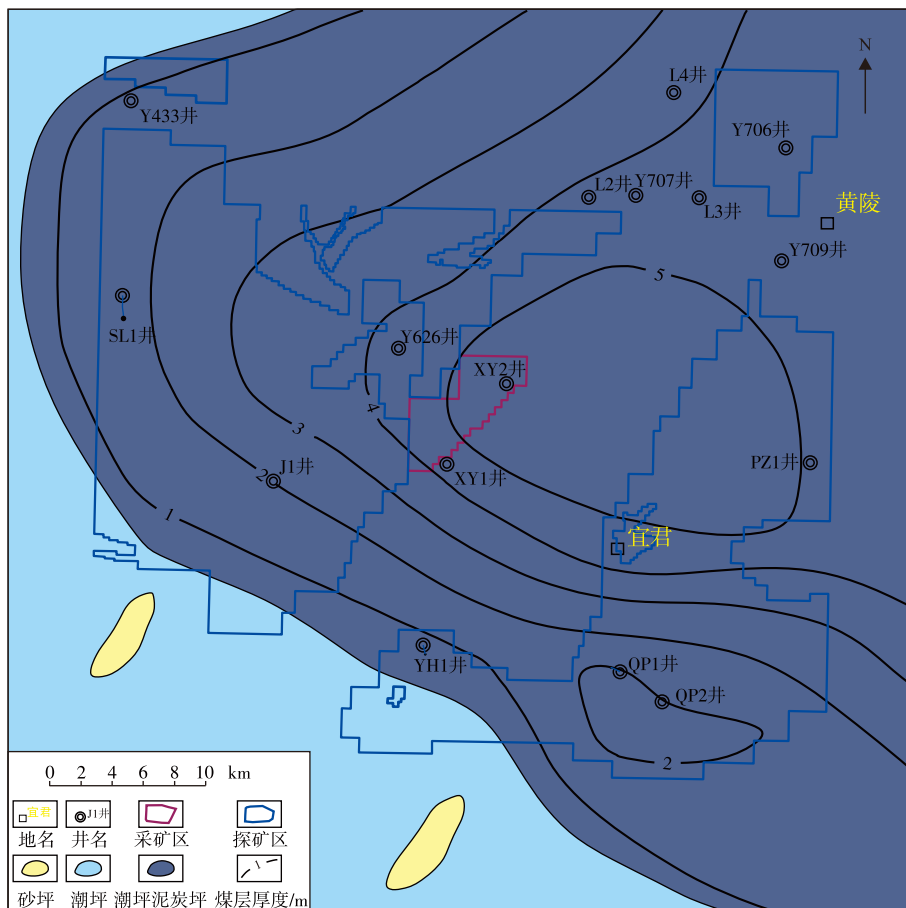


图5 鄂尔多斯盆地南部旬宜探区太原组2期成煤环境与8号煤层厚度叠合图

Fig. 5 Superimposed diagram of phase 2 coal-forming environment and thickness of the 8th coal seam in Taiyuan Formation, Xunyi exploration area, southern Ordos Basin

3.2 煤储层物性

由扫描电镜观察和纳米CT扫描(图6)可见:①煤层发育镜质体植物胞腔孔、黄铁矿晶间孔、黏土矿物晶间孔、割理裂隙等储集空间类型。②煤层裂隙比较发育,以割理裂隙和高角度剪切裂隙为主。割理裂隙密度介于0.4~2.0条/cm,宽度介于0.1~1.0 mm;剪切裂隙密度介于0.6~1.0条/cm,宽度介于0.1~2.0 mm。 N_2 吸附实验表明:煤层孔隙以2~50 nm的介孔为主,微孔和宏孔较少,其中介孔占72.85%,宏孔占15.47%,微孔占11.67%。气体法测定煤层孔隙度介于0.8%~7.6%,平均3.33%;脉冲渗透率介于 $(0.379\sim 0.715)\times 10^{-3} \mu m^2$,平均 $0.547\times 10^{-3} \mu m^2$ 。总体上与鄂尔多斯盆地大宁—吉县、临兴—神府、保德等地区太原组煤层物性相近,储集条件较好。

3.3 煤层含气性

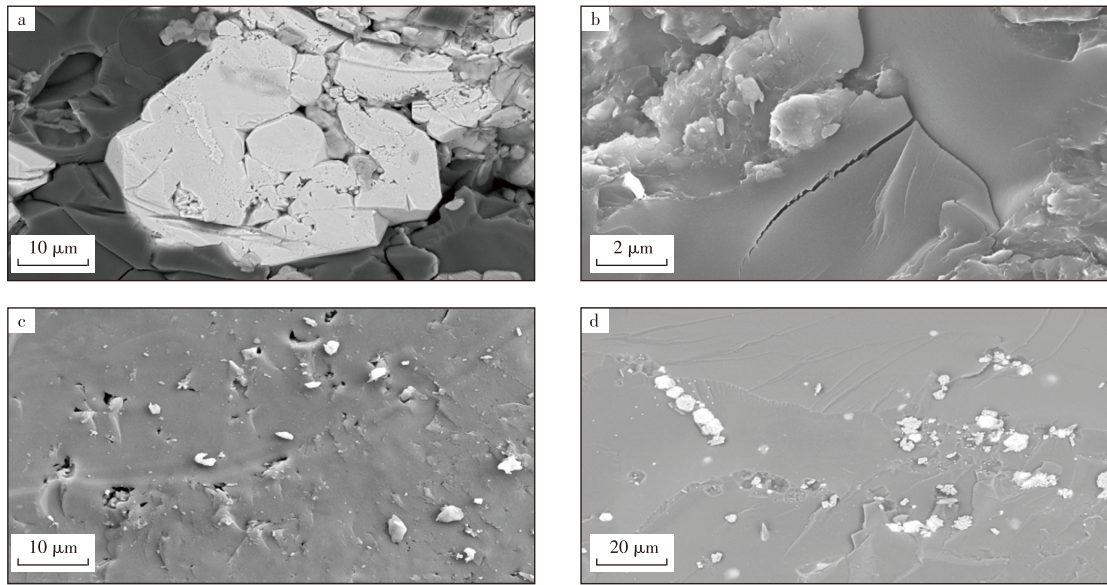
等温吸附实验的结果表明:太原组煤层兰氏体积介于 $3.97\sim 20.49 \text{ m}^3/\text{t}$,平均 $12.78 \text{ m}^3/\text{t}$;兰氏压力介于 $2.70\sim 4.08 \text{ MPa}$,平均 3.90 MPa ,具有较强的吸附能力,煤

层等温吸附能力与煤层总有机碳含量成正比。QP2井现场含气量测试表明:煤层含气量介于 $2.10\sim 11.74 \text{ m}^3/\text{t}$,平均 $6.93 \text{ m}^3/\text{t}$,较大宁—吉县、延川南等地区太原组煤层含气量低,这是由于应用常规钻杆取心,导致优质煤层段尚未钻取,取得的煤心样品灰分含量较高,平均39.53%。钻杆取心煤心上提暴露时间长(大于8 h),游离气部分散失,导致实测总含气量偏低,不能代表真实地层含气性。为准确搞清太原组煤层含气性,基于煤心样品等温吸附兰氏方程求得的吸附气含量与测井参数的相关性分析,建立了旬宜探区太原组吸附气含气量测井解释模型。其数学表达式如下:

$$V_x = 10.17423 + 2.18657 \lg(M_{RT}) - 0.07438M_{GR} - 0.0011M_{AC} \quad (1)$$

式中: V_x 为煤层吸附气,单位 m^3/t ; M_{RT} 为煤层电阻率,单位 $\Omega \cdot \text{m}$; M_{GR} 为煤层伽马,单位API; M_{AC} 为煤层声波时差,单位 $\mu\text{s}/\text{m}$ 。

旬宜探区与大牛地区均位于鄂尔多斯盆地,太原组煤层具有相似的地质特征(表2),因此,借鉴大牛地区



注:a. PZ1井深2 243.24 m,黄铁矿晶间孔;b. PZ1井深2 196.98 m,镜质体表面见微裂隙;c. QP1井深2 598.35 m,镜质体发育胞腔孔;d. PZ1井深2 243.24 m,黄铁矿颗粒铸模孔。

图6 鄂尔多斯盆地南部旬宜探区太原组煤层储集空间类型

Fig. 6 Types of reservoir space of Taiyuan Formation coal seam in Xunyi exploration area, southern Ordos Basin

表2 鄂尔多斯盆地南部旬宜探区与大牛地区块太原组煤层地质参数对比

Table 2 Comparison of geological parameters of Taiyuan Formation coal seam between Xunyi exploration area and Daniudi block, southern Ordos Basin

地层	主力煤层厚度/m	热演化程度/%	埋深/m	煤体结构	等温吸附兰缪尔体积/(m ³ /t)	孔隙度/%	渗透率/10 ⁻³ μm ²	压力系数
旬宜探区太原组	4.06~11.01	2.05~2.64	2 200~3 600	原生一碎裂为主	3.97~20.49	0.80~7.60	0.379 0~0.715 0	0.69~0.99
大牛地区块太原组	5.00~16.00	1.20~2.19	2 400~3 000	原生一碎裂为主	10.13~23.50	0.97~8.97	0.000 2~0.759 0	0.90~1.03

块不同温压下煤层游离气含量模型,建立旬宜探区煤层游离气含量模型,其数学表达式如下:

$$V_y = 0.4849H\alpha_p - 0.1085 \quad (2)$$

式中: V_y 为煤层游离气,单位m³/t; H 为煤层埋深,单位m; α_p 为煤层压力系数。

测井评价显示:旬宜探区太原组的含气量介于15.8~25.6 m³/t,其中游离气介于7.5~13.0 m³/t,游离气占比介于42%~52%,含气性较好,与鄂尔多斯盆地大宁一吉县、延川南等区块煤层含气量相近。

4 成藏特征和富集控气要素

4.1 成藏特征

石炭系太原组煤层具有厚度较大、分布范围广、煤岩类型与煤体结构好、储集空间发育、储集物性较好、含气性较好等特征,具备深部煤层气的成藏有利条件^[15]。太原组煤层自沉积以后,持续生烃至晚侏罗世—早白垩世,生成的烃类在煤层孔隙裂隙中聚集成藏^[16-17],形成自生

自储型煤层气藏。

西北斜坡区的地层常压,保存条件好,表现为“高含气量、高游离气、地层常压”的特征,总含气量介于20~26 m³/t,游离气介于12~13 m³/t,游离气占比介于48%~52%,地层压力系数0.99。东南断坡区断层发育,地层低压,保存条件中等,表现为“低游离气含量、地层低压、低临界解吸压力”的特征,总含气量介于10~20 m³/t,游离气介于7.5~9.5 m³/t,游离气占比介于42%~51%,地层压力系数介于0.675~0.765,临界解吸压力为1.9 MPa。南部断褶区处于渭北隆起,受燕山期由南向北逆冲推覆和挤压抬升影响,地层抬升剥蚀厚度大,煤层埋藏浅,上覆中生界地层被剥蚀殆尽,煤层气保存条件较差,煤层含气量一般介于4~8 m³/t,以吸附气为主,且欠饱和。

4.2 富集控气要素

煤层气富集规律研究表明:旬宜探区煤层气富集受控于成煤环境、构造演化、保存条件等关键因素^[18-21]。在成煤环境方面,潮坪泥炭坪相煤层以亮煤—半亮煤为主,

镜质组含量高,煤层单层厚度大,灰分含量低,含气量高。瀉湖相煤层以暗煤—半暗煤为主,镜质组含量较低,煤层单层厚度小,灰分含量高,含气量中等。构造演化和保存条件方面,探区西北部抬升剥蚀厚度小,断层不发育,地层常压,地层水矿化度高,地层水为封闭滞留区,保存条件好,煤层含气量较高。旬宜探区东南部经历燕山期由南向北逆冲推覆与差异性挤压抬升剥蚀活动,抬升剥蚀厚度大,断层发育,使得煤层气降压解吸转化成游离气部分逸散,地层水矿化度中等,为地层水弱径流区,地层低压,影响了煤层气保存,含气量中等。

5 有利区带与勘探实践

5.1 有利区带

利用体积法开展煤层含气量、密度、厚度等资源评价关键参数与资源量计算。评价认为旬宜探区煤层气资源量为 $1.754 \times 10^8 \text{ m}^3$,资源丰度介于 $(1.0 \sim 2.6) \times 10^8 \text{ m}^3/\text{km}^2$,具备较好的深部煤层气勘探潜力。区带上,西北斜坡区煤层气资源量为 $1.097.98 \times 10^8 \text{ m}^3$,东南断坡区煤层气资源量为 $656.38 \times 10^8 \text{ m}^3$;埋深上,2 000~3 000 m的深部煤层气资源量为 $872.05 \times 10^8 \text{ m}^3$,大于3 000 m的深部煤层气资源量为 $882.32 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。

东南断坡区煤层单层厚度介于1.00~4.77 m,累计厚度介于6~11 m;成煤环境为潮坪泥炭坪—瀉湖泥炭坪;夹矸2~3层,厚度介于0.9~1.2 m;灰分含量高,一般介于25%~40%。燕山期持续性活动大断层发育,地层压力系数介于0.675~0.765;地层水矿化度介于13 641~29 424 mg/L,为地层水弱径流区;煤层气保存条件中等。煤层含气量介于12~20 m^3/t ,气测全烃值最高47%,含气性中等—较好。煤层埋深中等,一般介于2 000~2 600 m。综合评价该区为中深层低压煤层气勘探有利区,煤层气资源量为 $656.38 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。

西北斜坡区太原组煤层单层厚度介于2.00~5.24 m,累计厚度介于4.00~10.49 m;成煤环境为潮坪泥炭坪;夹矸发育较少,一般无夹矸或者夹矸1层左右,厚度0.5 m左右;灰分含量低等—中等,一般小于25%;断层不发育,地层压力系数为0.985;地层水矿化度高达76 205 mg/L,为地层水封闭滞留区,煤层气保存条件好;煤层含气量介于20~26 m^3/t ,气测全烃值最高达60%,含气性好;煤层埋深介于2 600~3 600 m。综合评价为深层常压煤层气勘探有利区,煤层气资源量为 $1.097.98 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。

5.2 勘探实践

评价认为旬宜探区东南断坡区煤层发育,含气性中

等,气测显示明显,埋深适中,是煤层气勘探首选有利地区。优选东南断坡区彭镇区块部署钻探了PZ1井,该井太原组累计钻遇煤层7层11.25 m,取心见煤层3层2.76 m。岩心观察煤岩裂隙发育,半玻璃光泽,为亮煤和半亮煤,原生一碎裂结构,浸水实验气泡呈串珠状,其中主力煤层8号煤单层厚度4.7 m,气测全烃值47%,镜质组反射率2.05%,为高阶无烟煤,综合评价煤层气成藏地质条件有利。优选太原组8号煤层(井段2 221.0~2 225.7 m),实施“控液多砂+变黏压裂液+组合支撑”工艺压裂,压裂液量为 4.616 m^3 ,加砂量为 233.43 m^3 ,排量介于 $4.88 \sim 15.39 \text{ m}^3$,施工压力介于50.54~78.12 MPa,停泵压力介于40.21~49.80 MPa。该井在返排率为25.6%,动液面为1 724 m时开始见气,临界解吸压力为4.97 MPa,高于利用等温吸附曲线计算的理论临界解吸压力1.9 MPa(实测含气量在等温吸附线上对应的解吸压力),具有见气较早、排水降压期较短、解吸压力较高、含游离气的深部煤层气产出特征,试气阶段该井排采最高日产气量为 725.8 m^3 ,稳定日产气量为 400 m^3 ,累计产气量为 13.639 m^3 (图7)。PZ1井压裂初期地层对加砂敏感,在前置液阶段,当排量为 $0.66 \text{ m}^3/\text{min}$ 时,施工压力为74.5 MPa,接近施工限压上限,后期通过注酸和规模注液才使得地层破裂和连续压裂施工,最终施工排量与加砂量均未达到设计要求。分析认为煤层塑性强,弹性模量为3.2 GPa,黏土矿物含量高,介于74.6%~99.1%,造成施工压力高、地层对加砂敏感、裂缝起裂与扩展的困难,影响了裂缝延伸长度和有效支撑半径,使得储层改造体积有限,进而影响了煤层气产量,未能获得工业气流。PZ1井太原组煤层压裂试获低产气流,展示了旬宜探区深部煤层气具有良好勘探潜力,使得旬宜探区深部煤层气勘探展现好苗头。未来该区通过水平井部署和有效支撑体体积压裂技术攻关应用,有望取得深部煤层气勘探的重要突破,并成为该区重要资源接替领域。

6 结论

1) 旬宜探区发育潮坪泥炭坪、瀉湖泥炭坪2种成煤环境。其中潮坪泥炭坪成煤环境有利,成煤厚度大,煤岩类型好,灰分含量低。受成煤环境和古地貌影响,探区煤层分布具有“西薄东厚”的聚煤特征。8号煤层全区稳定分布,10号煤层仅在探区东南部局部发育。

2) 旬宜探区太原组煤层具有厚度大、分布范围广、煤岩类型与煤体结构好、储集空间发育、含气性较好等特征,具备深部煤层气成藏的有利条件。煤层持续演化生成的烃类,以吸附和游离态在煤层孔隙裂隙中聚集成藏,

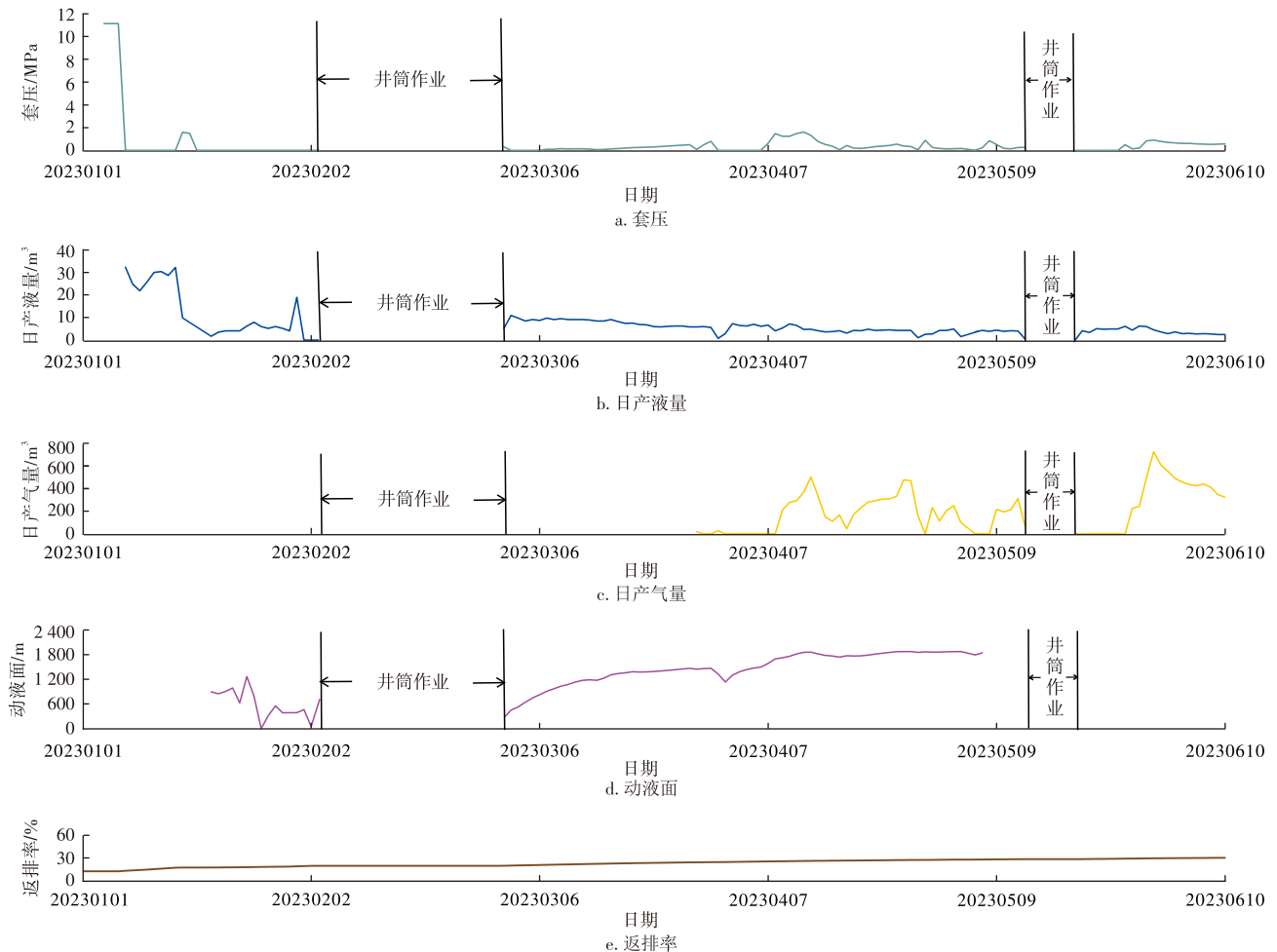


图7 鄂尔多斯盆地南部旬宜探区PZ1井生产曲线

Fig. 7 Production curves of PZ1 well in Xunyi exploration area, southern Ordos Basin

形成自生自储型深层煤层气藏。西北斜坡区表现为“高含气量、高游离气、地层常压”的成藏特征,东南断坡区表现为“中等含气量、低游离气含量、地层低压”的成藏特征。

3) 旬宜探区太原组煤层气资源量丰富,勘探潜力较大。东南断坡区是中深层低压煤层气勘探的有利地区,西北斜坡区为深层常压煤层气勘探有利地区。部署于东南断坡区的PZ1井煤层直井压裂试获低产气流,使得旬宜探区深部煤层气勘探展现好苗头。未来该区通过水平井部署和有效支撑体积压裂技术攻关应用,有望取得深部煤层气勘探的重要突破。

参考文献

[1] 万永平,王振川,韩双彪,等.鄂尔多斯盆地东南缘延安气田深部煤层气成藏地质特征及资源潜力[J]. 天然气地球科学, 2024, 35(10): 1724-1739.
WAN Yongping, WANG Zhenchuan, HAN Shuangbiao, et al. Geological characteristics and resource potential of deep coalbed methane accumulation in Yan'an Gas Field, southeastern margin of Ordos Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2024, 35(10): 1724-1739.

[2] 赵英龙,赵梅芳,牛永丰,等.鄂尔多斯盆地富县西区长8储层特征及其控油作用[J]. 非常规油气, 2024, 11(1): 36-44.
ZHAO Yinglong, ZHAO Meifang, NIU Yongfeng, et al. Reservoir characteristics and its oil-controlling effect of Chang8 in western Fuxian area, Ordos Basin[J]. Unconventional Oil & Gas, 2024, 11(1): 36-44.

[3] 白江. 鄂尔多斯盆地吴起地区延长组长6段储层特征研究[J]. 非常规油气, 2024, 11(2): 46-55.
BAI Jiang. Reservoir characteristics of Chang6 Member of Yanchang Formation in Wuqi Area, Ordos Basin[J]. Unconventional Oil & Gas, 2024, 11(2): 46-55.

[4] 贾浩宸,刘玉博,赵小春,等.鄂尔多斯盆地吴起油田长6段地层古压力及其对油气聚集作用的分析[J]. 非常规油气, 2023, 10(5): 56-64.
JIA Haochen, LIU Yubo, ZHAO Xiaochun, et al. Formation pressure restoration and its effect on oil and gas accumulation in Chang6 Member of Wuqi Oilfield, Ordos Basin[J]. Unconventional Oil & Gas, 2023, 10(5): 56-64.

[5] 李春堂,祁壮壮,丁晓琪,等.鄂尔多斯盆地大牛地气田马家沟组四段白云岩特征及分布规律[J]. 天然气勘探与开发, 2023, 46(1): 32-41.
LI Chuntang, QI Zhuangzhuang, DING Xiaoqi, et al. Characteristics

- and distribution regularity of dolomites in the fourth member of Majiagou Formation, Daniudi gas field, Ordos Basin[J]. *Natural Gas Exploration and Development*, 2023, 46(1): 32-41.
- [6] 王琼. 鄂尔多斯盆地北部下二叠统山西组2段储层特征及影响因素: 以东胜气田A井区为例[J]. *天然气勘探与开发*, 2024, 47(3): 23-31.
WANG Qiong. Reservoir characteristics and influencing factors of Lower Permian Shan-2 Member, northern Ordos Basin: A case study of Wellblock A in Dongsheng gas field[J]. *Natural Gas Exploration and Development*, 2024, 47(3): 23-31.
- [7] 谢宾, 曾凌翔, 李彬, 等. 鄂尔多斯盆地苏里格气田深层煤层气直井压裂实践与认识[J]. *天然气勘探与开发*, 2024, 47(6): 45-52.
XIE Bin, ZENG Lingxiang, LI Bin, et al. Practice and understanding of vertical well fracturing for deep CBM reservoirs in Sulige gasfield, Ordos Basin[J]. *Natural Gas Exploration and Development*, 2024, 47(6): 45-52.
- [8] 顾超, 曹建康, 庄一鹏, 等. 鄂尔多斯盆地旬宜区块上古生界烃源岩地球化学特征[J]. *西北地质*, 2020, 57(2): 263-269.
GU Chao, CAO Jiankang, ZHUANG Yipeng, et al. Geochemical characteristics of upper Paleozoic source rocks in Xunyi block, Ordos Basin[J]. *Northwestern Geology*, 2020, 57(2): 263-269.
- [9] 侯娟, 曹建康, 庄一鹏, 等. 鄂尔多斯盆地南部旬-宜探区延长组长7烃源岩特征及评价[J]. *矿产与地质*, 2021, 41(4): 708-716.
HOU Juan, CAO Jiankang, ZHUANG Yipeng, et al. The evaluation and characteristics of Chang 7 hydrocarbon source rock in Xun-Yi exploration area, South Ordos Basin[J]. *Mineral Resources and Geology*, 2021, 41(4): 708-716.
- [10] 姬晓燕, 夏娟, 王高科, 等. 四股泉矿区太原组煤岩煤质特征及成煤环境研究[J]. *煤炭技术*, 2024, 43(7): 136-140.
JI Xiaoyan, XIA Juan, WANG Gaoke, et al. Study on lithology and coal quality features and coal forming environment of Taiyuan Formation in Siguquan mining area[J]. *Coal Technology*, 2024, 43(7): 136-140.
- [11] 邹银洪, 丁允龙, 刘静, 等. 六盘水煤田阿夏矿区煤层地球化学特征及成煤环境[J]. *中国煤炭地质*, 2024, 36(5): 21-28.
ZOU Yinhong, DING Yunlong, LIU Jing, et al. Geochemical characteristics and coal-forming environment of coal seams in the Aga mining area of the Liupanshui coalfield[J]. *Coal Geology of China*, 2024, 36(5): 21-28.
- [12] 曹磊, 朱士飞, 张谷春, 等. 贤按煤田煤岩煤质特征及成煤环境研究[J]. *中国煤炭地质*, 2024, 36(5): 29-32.
CAO Lei, ZHU Shifei, ZHANG Guchun, et al. Study on characteristics of coal quality and coal forming environment in Xian'an coalfield[J]. *Coal Geology of China*, 2024, 36(5): 29-32.
- [13] 梁开华, 王平丽, 黄兴龙, 等. 大南湖矿区中侏罗统西山窑组沉积体系及成煤环境[J]. *中国煤炭地质*, 2023, 35(11): 1-9.
LIANG Kaihua, WANG Pingli, HUANG Xinglong, et al. Sedimentary system and coal-forming environment of middle Jurassic Xishanyao Formation in Dananhu mining area[J]. *Coal Geology of China*, 2023, 35(11): 1-9.
- [14] 周汝贤, 庞宇, 马遨. 黔西龙场井田含煤岩系沉积环境及聚煤规律[J]. *山东煤炭科技*, 2024, 42(3): 134-137.
ZHOU Ruxian, PANG Yu, MA Ao. Sedimentary environment and coal accumulation law of coal bearing rock series in Qianxi Longchang well field[J]. *Shandong Coal Science and Technology*, 2024, 42(3): 134-137.
- [15] 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.
- [16] 刘大锰, 李俊乾. 我国煤层气分布赋存主控地质因素与富集模式[J]. *煤炭科学技术*, 2014, 42(6): 19-24.
LIU Dameng, LI Junqian. Main geological controls on distribution and occurrence and enrichment patterns of coalbed methane in China[J]. *Coal Science and Technology*, 2014, 42(6): 19-24.
- [17] 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.
- [18] 康玉国, 张明. 沁水盆地东缘龙泉地区煤层气成藏条件及主控因素[J]. *东北石油大学学报*, 2022, 46(3): 1-12.
KANG Yuguo, ZHANG Ming. CBM accumulation conditions and main controlling factors in Longquan Area, eastern margin of Qinshui Basin[J]. *Journal of Northeast Petroleum University*, 2022, 46(3): 1-12.
- [19] 徐最. 达坂城地区低煤阶煤层气成藏主控因素分析[J]. *中国煤层气*, 2023, 20(2): 17-22.
XU Zui. Analysis of the controlling factors of low-rank coalbed methane accumulation in Dabancheng Area[J]. *China Coalbed Methane*, 2023, 20(2): 17-22.
- [20] 郭燕珩, 惠鹏, 陈小军, 等. 大佛寺井田煤层气井产能主控因素分析[J]. *陕西煤炭*, 2022, 41(4): 95-98.
GUO Yanheng, HUI Peng, CHEN Xiaojun, et al. Analysis on main controlling factors of coalbed methane wells productivity in Dafosi mine field[J]. *Shaanxi Meitan*, 2022, 41(4): 95-98.
- [21] 姚勇, 林亮, 张贺, 等. 鄂尔多斯盆地东缘柳林区块煤层气富集高产主控地质因素分析[J]. *中国煤层气*, 2022, 19(1): 18-23.
YAO Yong, LIN Liang, ZHANG He, et al. Study on the main controlling geological factors of high yield in Liulin CBM block, eastern Ordos Basin[J]. *China Coalbed Methane*, 2022, 19(1): 18-23.

(编辑 黄颖)