

煤田地质与勘探

Coal Geology & Exploration

ISSN 1001-1986, CN 61-1155/P

《煤田地质与勘探》网络首发论文

题目: 鄂尔多斯盆地神木-佳县区块深部煤层气地质特征及勘探开发潜力
作者: 李国永, 姚艳斌, 王辉, 孟令箭, 李珮杰, 张永超, 王建伟, 马立民
收稿日期: 2023-07-23
网络首发日期: 2023-09-13
引用格式: 李国永, 姚艳斌, 王辉, 孟令箭, 李珮杰, 张永超, 王建伟, 马立民. 鄂尔多斯盆地神木-佳县区块深部煤层气地质特征及勘探开发潜力[J/OL]. 煤田地质与勘探. <https://link.cnki.net/urlid/61.1155.P.20230912.1953.002>



网络首发: 在编辑部工作流程中, 稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定, 且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式(包括网络呈现版式)排版后的稿件, 可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定; 学术研究成果具有创新性、科学性和先进性, 符合编辑部对刊文的录用要求, 不存在学术不端行为及其他侵权行为; 稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准, 正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性, 录用定稿一经发布, 不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容, 只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认: 纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司签约, 在《中国学术期刊(网络版)》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版, 以单篇或整期出版形式, 在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊(网络版)》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物(ISSN 2096-4188, CN 11-6037/Z), 所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

鄂尔多斯盆地神木—佳县区块深部煤层气地质特征及勘探开发潜力

李国永¹, 姚艳斌^{2,3}, 王 辉^{2,4}, 孟令箭¹, 李珮杰¹, 张永超¹, 王建伟¹, 马立民¹

(1. 中国石油冀东油田分公司, 河北 唐山 063000; 2. 中国地质大学(北京) 能源学院, 北京 100083; 3. 煤层气开发利用国家工程研究中心煤储层物性实验室, 北京 100083; 4. 华北理工大学 应急管理与安全工程学院, 河北 唐山 063210)

摘要：我国深部(以下均指埋深大于 2 000 m)煤层气资源丰富，勘探开发潜力巨大。与中浅部相比，深部煤层气在富集成藏规律与开发方式方面均具有显著的差异性，急需针对重点区块开展解剖性分析研究。神木—佳县区块位于鄂尔多斯盆地东北部，目前尚处于深部煤层气勘探的起步阶段，深部煤层气富集特征及开发潜力等尚不明确。基于研究区近期实施的地震资料、300 余口井的测井资料和 4 口取心井的分析资料等，系统分析煤储层基础地质特征，总结煤层气富集主控因素与富集规律，类比剖析研究区深部煤层气勘探开发潜力。研究区深 8 号煤的镜质体反射率介于 0.7%~1.8%，大部分区域煤层演化已处于热解生气高峰，区域上煤层净煤厚度高达 7~8 m，煤层发育稳定，构造相对简单、水动力封闭性较强、顶底板封盖条件较好，为煤层气大面积连续成藏提供了优越条件，其中佳县南区的煤层气资源条件最好。与鄂尔多斯盆地东部其他区块深部煤层相比，研究区煤层中游离气占比明显更高(15.21%~46.47%)，煤层中吸附气主要受吸附压力封存控制，而游离气受毛管力封闭与浮力重力分异双重控制，两种封存机制共同决定了深部煤层含气量的垂向分带与平面分区，以佳县南部为例总结了吸附气吸附压力主控、游离气毛管压力封闭与重力分异耦合控制的典型深部煤层气富集模式。与临兴区块和大宁—吉县区块类比分析结果表明，神木—佳县区块具有较好的煤层气资源基础、储层改造条件和高产潜力，预示了此区块深部煤层气规模化开发的美好前景。此外，大宁—吉县区块深部属典型的高煤阶煤，而神木—佳县深部为中煤阶煤，因此，该研究认识进一步丰富完善了深部煤层气富集理论，对于全国深部煤层气勘探开发实践有重要指示意义。

关键词：深部(层)煤层气；鄂尔多斯盆地东部；神木—佳县；深 8 号煤；煤层气富集机制

中图分类号：P618.11

文献标志码：A

Geological characteristics and development potential of deep coalbed methane resources in Shenmu-Jiaxian Block, Ordos Basin, China

LI Guoyong¹, YAO Yanbin^{2,3}, WANG Hui^{2,4}, MENG Lingjian¹, LI Peijie¹, ZHANG Yongchao¹,
WANG Jianwei¹, MA Limin¹

(1. PetroChina Jidong Oilfield Company, Tangshan 063000, China; 2. School of Energy resource, China University of Geosciences(Beijing), Beijing 100083, China; 3. Coal Reservoir Laboratory of National Engineering Research Center of CBM Development & Utilization, Beijing 100083, China; 4. School of Emergency Management and Safety Engineering, North China University of Science and Technology, Tangshan 063210, China)

Abstract: China possesses abundant deep coalbed methane (CBM) resources with significant exploration and development potential, referring to depths greater than 2000 m. Deep CBM differs significantly from shallower formations in terms of accumulation and development patterns, necessitating detailed research for key blocks. The Shenmu-Jiaxian Block, situated in the northeastern part of the Ordos Basin, is currently in the early stages of deep CBM exploration, and its enrichment characteristics and development

收稿日期：2023-07-23；修回日期：2023-09-11

基金项目：国家自然科学基金杰出青年基金项目(42125205)；国家自然科学基金重点基金项目(42130806)

第一作者：李国永，1979 年生，男，博士，高级工程师，从事油气田勘探开发研究与技术管理。E-mail: lgyairen@163.com

通信作者：姚艳斌，1978 年生，男，博士，教授，博士生导师，从事非常规油气与碳封存方面的研究工作。E-mail: yyb@cugb.edu.cn

potential remain uncertain. In this study, we conducted a comprehensive analysis of the fundamental geological features of coal reservoirs in the study area using recent seismic data, well logs from over 300 wells, and analytical data from four core wells. We identified the main controlling factors and accumulation mechanism of CBM, and analogically assessed the development potential of deep CBM in the region. The targeting No. 8 deep coal, has the vitrinite reflectance of 0.7%~1.8%, indicating the coalification in the most parts of the study area is currently in the peak stage of thermogenic gas generation. The region exhibits considerable coal thickness, stable development, relatively simple tectonics, well hydrodynamic sealing, and favorable roof and floor sealing conditions, providing favorable conditions for widespread and continuous CBM accumulation. Among them, the southern area of Jiaxian demonstrates the most favorable CBM resource conditions. Compared to other deep blocks in the eastern Ordos Basin, the study area exhibits a notably higher proportion of free gas in coal seams. It is suggested that the adsorption gas in coals is mainly controlled by adsorption pressure, whereas the free gas is subject to dual controls of capillary pressure and buoyancy-gravity differentiation. These two trapping mechanisms jointly determine the vertical zonation and regional distribution of gas content in the deep coal seams. Taking the southern area of Jiaxian as an example, we summarized a typical enrichment pattern of deep CBM. Comparative analysis with the Linxing and Daning-Jixian Blocks indicates that the Shenmu-Jiaxian Block possesses a solid foundation of CBM resources, favorable reservoir alteration, and high production potential, hinting at promising prospects for large-scale development of deep CBM in this region. In addition, the Daning-Jixian block is characterized by high-rank coals, whereas the Shenmu-Jiaxia block consists of medium-rank coals. Therefore, this study contributes to the enrichment and refinement of the theory of deep coalbed methane accumulation, which holds significant instructive implications for the exploration and development of deep coalbed methane in China.

Keywords: deep coalbed methane; eastern Ordos basin; Shenmu-Jiaxian; No.8 coal; gas accumulation mechanism

中国 1 500~3 000 m 埋深的煤层气地质资源量约 $30.37 \times 10^{12} \text{ m}^3$, 为 1 500 m 以浅煤层气资源量的 2 倍, 这是中国煤层气产业规模性发展的重要资源基础^[1]。就煤层气资源而言, 从浅部(层)到深部(层), 煤储层的地应力、地层流体压力和地层温度逐渐升高, 煤层气的赋存状态从吸附气占绝对优势逐渐转变为吸附气与游离气并重。秦勇等^[1]从地应力状态“转换深度”与吸附气含量“临界深度”两个关键指标出发, 重新厘定了深部煤层气的科学内涵与定义。按照该定义, 我国目前实现突破的中深部煤层气区块, 如沁水盆地南部柿庄北区块、郑庄北区块和长治北区块, 以及鄂尔多斯盆地东缘的临兴区块和延川南区块等, 其开发深度仍处于所谓的“临界深度”(600~1800 m)附近^[2], 与严格意义上的深部煤层气还有所区别。2019 年以来, 鄂尔多斯盆地东缘大宁-吉县区块逐步进入深部煤层气“规模勘探+先导试验”阶段, 直井日产气量突破 $2 \times 10^4 \text{ m}^3$, 水平井日产气量突破 $10 \times 10^4 \text{ m}^3$, 实现了真正意义上深部煤层气勘探开发的突破, 同时也发现了一些颠覆传统浅部煤层气的固有认识^[3]。截至目前, 国内对大于 2000 m 以深煤层气的勘探和开发理论研究仍处于起步阶段, 而深部煤层气的快速发展和即将到来的广泛建产, 对国内专家学者提出了新的挑战。深部煤层气富集机理及高效开发技术优选是目前业界急需解决的重要科学与技术问题。

神木-佳县区块位于鄂尔多斯盆地东北部, 该区块东部为神府-保德-临兴区块, 南部依次是三交北区块、三交区块、石楼北区块、石楼南区块和大宁-吉县区块。整个鄂尔多斯盆地东部埋深超 2 000 m 的

本溪组 8 号煤层的资源潜力巨大, 是有望实现我国深部煤层气规模化上产的重要基地。目前, 神木-佳县区块仍处于深部煤层气勘探初期阶段, 尚未提交煤层气探明地质储量, 深部煤层气地质条件及富集规律等关键问题尚不清楚。笔者首次开展鄂尔多斯盆地神木-佳县区块深部煤层气的研究工作, 系统分析煤储层基础地质特征, 总结煤层气富集规律与开发潜力, 以保障该区后续深部煤层气的增储上产, 同时也为丰富深部煤层气富集理论提供一定的基础支撑。

1 研究区概况

1.1 构造背景

鄂尔多斯盆地石油和天然气资源均非常丰富, 各类油气资源呈现叠置成藏的特点^[4], 是我国油气增储上产的重要盆地。该盆地位于华北地块西部, 是一个长期接受不均匀沉降活动的多旋回克拉通盆地。盆地自形成伊始经历了太古—早元古代结晶基底形成阶段、中—晚元古代大陆裂解和碰撞造山阶段、早古生代隆拗相间构造格局形成阶段、晚古生代拉张沉降阶段和中—新生代板块汇聚和碰撞造山阶段^[5-7]。其中, 中—新生代板块汇聚和碰撞造山阶段的燕山运动和喜马拉雅运动决定了鄂尔多斯盆地南北翘起、东翼缓而长和西翼短而陡的现今构造格局, 据此可将该盆地划分为伊盟隆起、晋西挠褶带、渭北隆起、西缘冲断带、天环坳陷和伊陕斜坡六大二级构造单元(图1)。本文研究区位于伊陕斜坡二级构造单元的东北部(图1), 由于横跨陕西省神木县和佳县, 简称神木-佳县区块。

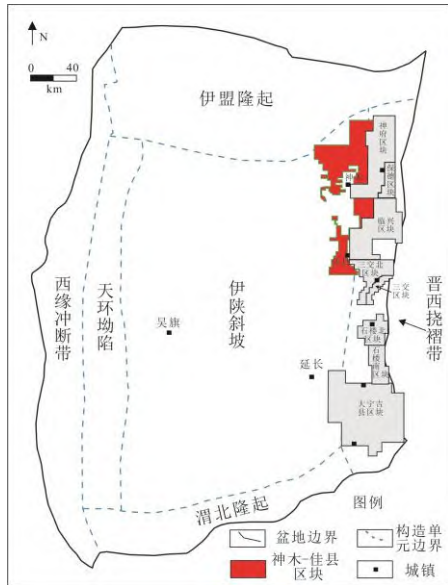


图1 鄂尔多斯盆地构造单元及研究区位置
Fig.1 Structural units and location of study area in Ordos Basin

1.2 沉积地层

神木-佳县区块地层自下而上发育奥陶系、上石炭统本溪组、下二叠统太原组、下二叠统山西组和中二叠统石盒子组等(图2), 其中石炭-二叠系煤层与泥岩为最主要的生烃层系。在石炭世-二叠世时期, 鄂尔多斯盆地呈北高南低的构造格局。此时盆地北部为滨岸沼泽和湖沼相沉积, 富动植物遗体有机物沉积, 煤系发育。从隶属层段来看, 含煤地层主要位于本溪组、太原组和山西组的山2段, 其中山西组山2段发育1—5号煤层, 太原组发育6—7号煤层, 本溪组发育8—9号煤层。其中, 8号煤层是目前深部煤层气开发的主要目标。

系	统	组	段	地层厚度	岩性剖面	标志层及煤层编号	岩性描述
二叠系	中统	石盒子组	盒8			骆驼脖子砂岩	
			山1	35~50m			浅灰色、深灰色砂岩, 砂质泥岩, 泥岩及煤层, 底部为中粒-粗粒岩屑石英砂岩
	下统	山西组	山2	40~60m		1号煤层 2号煤层 3号煤层 4号煤层 5号煤层 北窑沟砂岩	
			太原组	40~60m		6号煤层 东大窑灰岩 6下号煤层 斜道灰岩 7号煤层 毛儿沟灰岩 8上号煤层 庙沟灰岩	深灰色砂岩, 灰黑色泥岩、生屑泥晶灰岩及煤
石炭系	上统	本溪组		25~45m		8号煤层 吴家沟灰岩 9号煤层 晋祠砂岩 畔沟灰岩 铝土质泥岩	上部发育煤层、灰岩; 底部发育泥岩、铝土质泥岩
奥陶系							白云岩

图2 神木-佳县区块沉积地层特征
Fig.2 Characteristics of sedimentary formations in Shenmu-Jiaxian area

2 煤储层基础地质特征

2.1 煤层厚度与埋深

神木-佳县区块8号煤层厚度为6~15 m, 平均9.5 m(图3a), 煤层厚度大且分布稳定, 不仅保障了煤层气资源可靠性, 也为实施煤层气水平钻井及储层体积压裂提供了良好条件。从区域分布来看, 神木地区煤厚为8~12 m, 平均9 m, 自NE至SW方向逐渐减薄, 煤层中间发育薄层夹矸(图3c); 佳县地区煤厚主要介于9~14 m, 平均10 m, 自NE—SW方向逐渐减

薄, 煤层垂向连续性较好(图3c)。研究区8号煤层一般含0.5~1.2 m的夹矸层, 煤层净厚度略低于总厚度, 如佳县南区煤层净厚度介于4~11 m, 平均7.1 m(表1)。

神木-佳县区块8号煤层的埋深为1 600~2 800 m, 平均2 250 m(图3b)。其中, 佳县地区较神木地区埋深稍大, 埋深主要介于2 000~2 400 m, 平均2 200 m; 神木-佳县地区自NE的构造高部位向盆地中央凹陷方向埋深逐渐增大(图3b)。

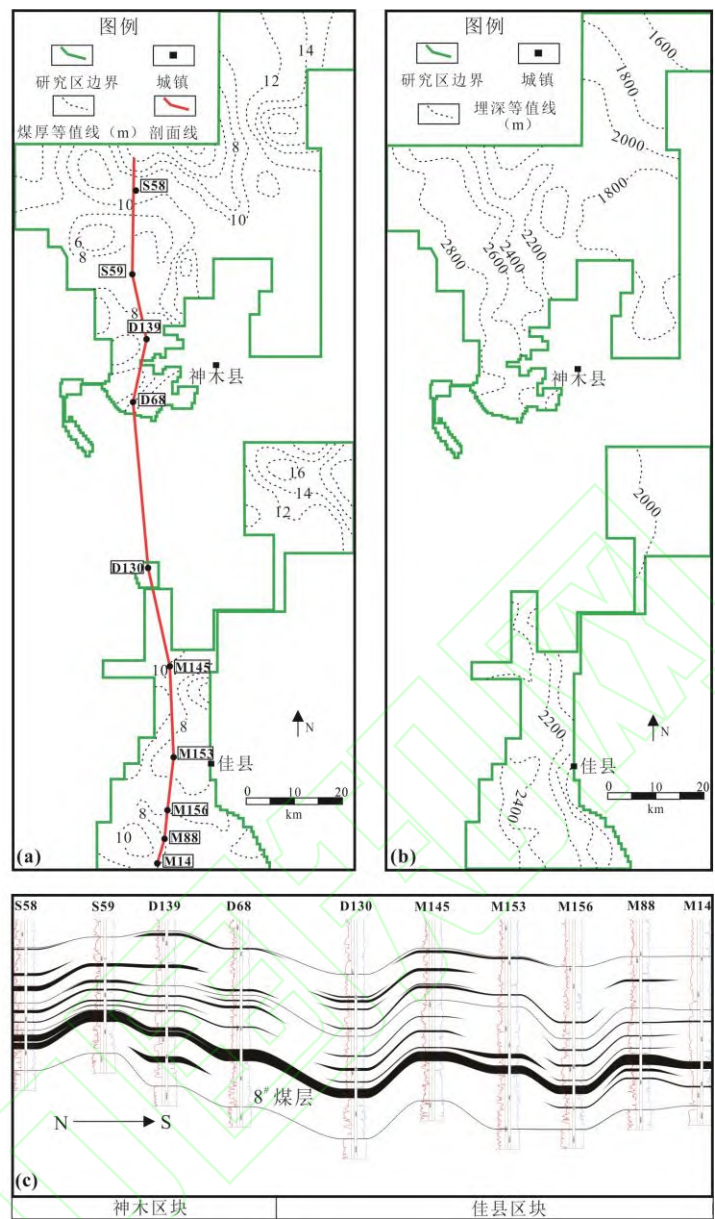


图3 研究区8号煤层的厚度(a)、埋深(b)及煤层连井地质剖面(c)

Fig.3 The distributions of coal thickness (a), burial depth (b), and geological cross-section connecting wells (c) of No.8 coal seam in the study area

2.2 煤岩煤质特征

2.2.1 煤热演化程度

随着煤的热演化程度(用最大镜质体反射率 R_{max} 表示)增大,煤层气的生成可分为3个阶段:生物气生成阶段($R_{max} \leq 0.5\%$)、热降解气生成阶段($0.5\% < R_{max} < 1.9\%$)和热裂解气生成阶段($R_{max} \geq 1.9\%$)。神木—

佳县区块8号煤层 R_{max} 为0.7%~1.8%,从北向南、从东向西热演化程度逐渐增高(图4)。不同的热演化程度导致研究区内煤类多样,从北向南依次发育气煤、肥煤、焦煤和瘦煤。与相邻的临兴区块和大宁—吉县区块深部8号煤相比,研究区的热演化程度稍低(表1)。

表1 佳县区块与临兴和大宁—吉县区块8号煤层地质特征对比

Table 1 Compare of geological characteristics of No. 8 coal seam in the Shenmu—Jiaxian, Linxing, and Daning—Jixian Blocks

物性		区块		
		临兴深部	大宁—吉县深部	佳县区块
基础地质条件	构造特征	单斜,断裂微构造发育	单斜,地层倾角 $2^{\circ} \sim 3^{\circ}$,断裂微构造发育	宽缓单斜,倾角 $< 2^{\circ}$,构造简单,断层不发育
	顶板岩性	砂岩或泥岩	灰岩	泥岩和灰岩为主,局部砂岩

	底板岩性	砂岩或泥岩	泥岩或砂岩	泥岩
	含水性	弱	弱	弱
	地下水类型	CaCl ₂	CaCl ₂	CaCl ₂
	矿化度/(10 ⁴ mg L ⁻¹)	22~30	7~22	7~30
	埋深/m	1800~2158	2000~2520	2000~2600
	储层温度/℃	40~65	30~50	50~70
	镜质体反射率/%	平均 1.8	2.14~2.78	1.20~1.80
资源潜力	煤层净厚度/m	5.8	6~7	7~8
	平均 Langmuir 体积/(m ³ · t ⁻¹)	21.6	28.3	19.2
	平均 Langmuir 压力/MPa	3.51	3.06	2.59
	游离气占比/%	0~20.7	9.6~21.2	15.21~46.47
	平均含气量/(m ³ · t ⁻¹)	12.9	24~25	17.7~22.8
	平均孔隙率/%	5.39	3.13	3.09
物性与可改造性	渗透率/10 ⁻³ μm ²	0.012~0.018(试井)	0.053~0.054(试井)	0.03~0.1(数值模拟)
	宏观煤岩类型	光亮/半亮煤为主	光亮/半亮煤为主	光亮/半亮煤为主
	煤体结构	原生结构为主	原生结构为主	原生煤为主, 碎裂煤次之
	水平应力差/MPa	5~17	1.3~17.8	2.6~3.4

注：大宁—吉县及临兴区块数据参考文献[8-12]。

2.2.2 煤质特征

佳县地区 8 号煤层水分质量分数为 0.4%~1.1%，平均 0.72%；灰分质量分数为 5.8%~38.8%，平均 17.2%；挥发分产率为 11.0%~25.0%，平均 17.3%。整体上，自佳县北部至南部地区，8 号煤的水分含量呈增加趋势，而灰分含量和挥发分产率有降低的趋势。此分布现象总体与煤的热演化程度有关(图 4)。根据煤的热演化程度，可推测神木地区 8 号煤应具有特低水分、中—高灰分和中—高挥发分产率的特点。

2.2.3 煤岩学特征

煤心观察结果表明，研究区 8 号煤层的宏观煤岩类型主要为光亮—半亮煤，少量半暗煤和暗淡煤。其中，佳县南部较佳县北部煤的光亮程度显著要好，宏观煤岩类型的分布规律与沉积环境和煤岩显微组分特征具有显著的相关关系。

研究区 8 号煤层以原生结构煤为主，其次为碎裂煤，很少存在碎粒煤。一般认为，原生煤和碎裂煤的结构较完整、力学强度高，有利于压裂和排采；而碎粒煤等构造煤力学强度较低，不利于水平井钻井及大规模体积压裂。位于研究区南部的大宁—吉县区块的深 8 号煤以原生结构煤为主，基本不含其他煤体结构类型^[8]；与鄂尔多斯盆地东缘其他深部煤层气区块相比，本研究区的煤体结构的分布非均质性更强，如佳县北部的 J48 井其顶部为碎裂结构煤(图 5b)，中偏底部为碎粒煤(图 5c)，底部又过渡为原生结构煤(图 5d)。总体上，研究区的煤体结构总体仍处于中等变形强度，有利于煤储层裂隙发育，导致

较高的渗透率。

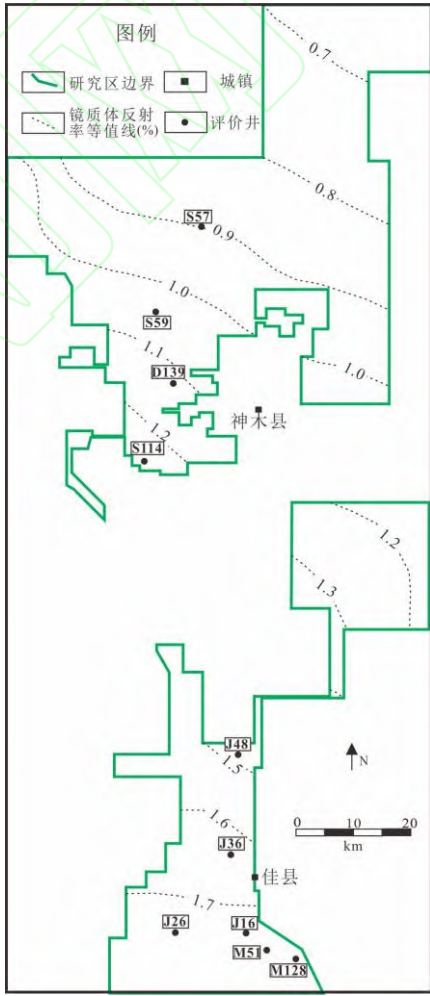
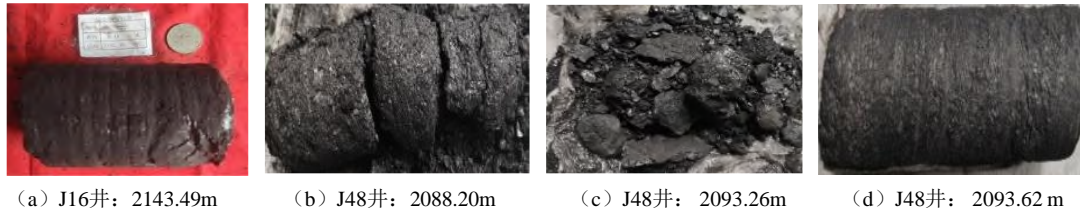


图 4 神木—佳县区块 8 号煤层镜质体反射率分布
Fig.4 Distribution of vitrinite reflectance of the No.8 coal seam in the study area



(a—d 依次为: 原生结构煤、碎裂煤、碎粒煤和原生结构煤)

图 5 佳县地区深 8 号煤煤体结构特征

Fig.5 Characteristics of coal texture of No. 8 coal seam in the Jiaxian Block (a-d corresponds to undeformed coal, cataclastic coal, granulated coal, and undeformed coal, respectively)

煤的显微组分测试结果表明,研究区 8 号煤的镜质组体积分数为 57.9%~88.1%,平均 73.5%;惰质组体积分数为 9.2%~23.8%,平均 15.5%;壳质组体积分数为 0.4%~4.0%,平均 3.3%;矿物组体积分数为 5.8%~25.5%,平均 15.2%。区域分布来看,8 号煤层的矿物组分含量为南低北高,镜质组含量则为北低南高,惰质组和壳质组含量垂向变化较复杂。随着深度变化,煤岩显微组分变化规律并不明显。通常,不同的显微组分含量可导致煤储层的储集性能明显差异,例如镜质组含量大的煤层吸附能力强且孔裂隙发育。因此,就显微组分含量来看,相较于大宁—吉县区块,研究区 8 号煤层具有更好的煤层气储集性能。

2.3 煤的吸附性与含气性特征

研究区共开展了 3 口井 24 个 8 号煤层样品的甲烷等温吸附测试,结果见表 2。由表中可知,佳县北部地区空气干燥基 Langmuir 体积平均为 13.37 m³/t,该结果较为可信,实验温度为 60℃(接近储层温度)。佳县南部的 J16 井和 J26 井测得的空气干燥基 Langmuir 体积平均值分别为 26.66 m³/t 和 18.9 m³/t,但考虑到其实验温度(均为 45℃)比储层实际温度(约 60℃)要低,因此该实验结果可能高估实际储层的吸附能力。此外佳县北部相较南部热演化程度偏低(图 4),也可能是北部吸附能力偏低的原因之一。总体来看,按照储层的实际温度 50~70℃,佳县南部煤的干燥无灰基 Langmuir 体积应介于 17~19 m³/t,而佳县北部相应值在 16~18 m³/t,而深部地区的干燥无灰基 Langmuir 体积主要在 16 m³/t 以下。

表 2 研究区 8 号煤层的等温吸附实验结果

Table 2 Results of methane isothermal adsorption of the No.8 coal seam in the study area

井号	煤层埋深/ m	Langmuir 体积/(m ³ t ⁻¹)		Langmuir 压力/ MPa	样品个数	实验温度/ ℃	最高实验压力/ MPa
		干燥无灰基	空气干燥基				
J16	2 140~2 143	27.48~34.19/30.25	23.63~30.13/20.66	2.15~3.53/2.57	8	45	13
J26	2 387~2 393	20.39~24.09/22.2	14.32~22.47/18.9	2.08~2.49/2.24	6	45	8
J48	2 086~2 094	14.37~20.34/17.22	11.01~15.63/13.37	2.43~2.95/2.80	10	60	13

注:表中数据为最小值~最大值/平均值。

研究区佳县南部已经开展 4 口井的保压密闭取心含气量测试。整体上,4 口井总含气量介于 17.70~22.81 m³/t,平均 20.56 m³/t;煤层含气量中游离气含量占比较高,4 口井介于 15.21%~46.47%,平均 30.10%。

J26 井煤解吸气的气体组分测试结果表明,煤层气组分中甲烷体积分数为 90.77%~93.45%,平均 92.79%,还含有一定量的非烃类气体,如 CO₂(体积分数为 5.56%~7.79%)和 N₂,以及微量的重烃气(<1%)。J26 井煤层气 δ¹³CH₄ 介于 -26.7‰~-33.5‰,煤层气表现为典型的热降解气特征。此外,J26 井煤层气解吸气的甲烷 δ¹³CH₄ 介于 -17.7‰~-16.5‰。通常认为,δ¹³CH₄> -28‰为煤系有机质气源,而 δ¹³CH₄< -28‰为腐泥型有机质气源。因此,研究区

煤层气表现为典型的煤系有机质气源特征。

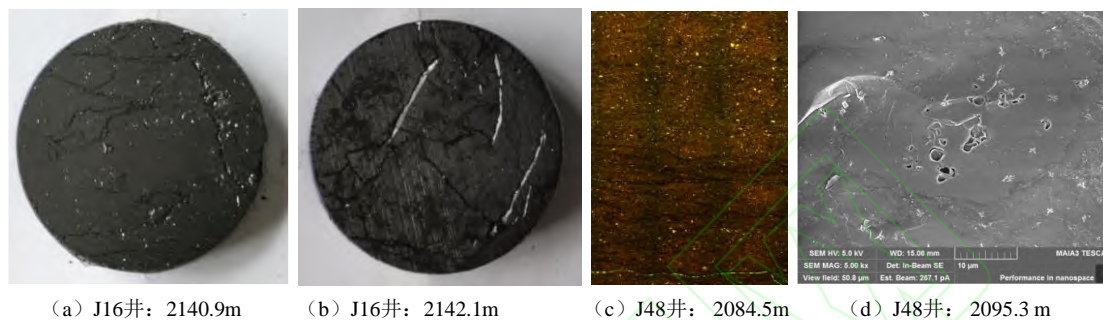
总体上,研究区煤层含气量与东部的临兴深部区域相比明显要高,而与南部的大宁—吉县深部区相比稍低(表 1),其主要与煤的热演化程度有关。由于整个鄂尔多斯盆地东缘深部煤层的保存条件较好,煤层的含气量与其热演化程度呈明显的正相关关系,因此研究区 8 号煤的热演化程度非常有利于煤层气的保存。同时,与其他两个区块相比,研究区煤层气中游离气的含量明显要高,也间接说明研究区深部煤层气具有良好的保存条件,非常有利于煤层气的富集成藏。

2.4 煤的物性特征

2.4.1 裂隙和孔隙发育

根据研究区 3 口探井的岩心观察与描述结果,研究区深 8 号煤的宏观裂隙较为发育,裂隙密度介于 7~36 条/5 cm²,平均 18 条/5 cm²。其中,裂隙长度超过 1 cm 的裂隙密度为 1~9 条/5 cm²,平均 4 条/5 cm²;裂隙长度介于 0.5~1 cm 的裂隙密度介于 0~12 条/5 cm²,平均值为 5 条/5 cm²;裂隙长度小于 0.5 cm 的裂隙密度介于 2~19 条/5 cm²,平均 9 条/5 cm²。结

果表明,长度小于 0.5 cm 的裂隙在深 8 号煤中最为发育(图 6a)。显微观测结果表明,煤的显微裂缝发育,其裂隙密度一般为 7.14~23.13 条/cm²,平均 12.96 条/cm²,裂缝多数与层面平行,少量裂缝垂直层面(图 6b,图 6c);裂缝呈半充填状,一般充填矿物以方解石为主(图 6b,图 6c)。此外,煤样中可见大面积发育的浑圆状气孔,孔径多在微米级,甚至数十微米(图 6d),说明虽然深部煤层较致密,但其中仍可发育较多的大孔隙,这为深部煤层游离气的赋存提供了良好的空间条件。



(a 和 b: 煤心; c: 煤岩薄片 10×10 荧光下; d: 扫面电镜下)

图 6 研究区煤中孔裂隙发育特征

Fig.6 Pore and fracture characteristics of the coals in the study area

2.4.2 孔隙率和渗透率

仅对佳县北部 J48 井、南部 J16 井和 J26 井采集的 8 号煤样品实施了渗透率和孔隙率测试。结果显示,佳县地区 8 号煤层孔隙率(氦气法)为 6.40%~8.58%,平均 7.71%;覆压 21.9 MPa 条件下测试的孔隙率为 3.09%;测井解释 4 口井的孔隙率介于 3.3%~5.2%,平均 4.35%。

常规方法测试的煤的渗透率为 $(0.03\sim4)\times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,平均 $1.4\times 10^{-3} \mu\text{m}^2$;模拟储层条件(覆压 21.9 MPa)测试的气体渗透率仅为 $0.023\times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,说明实际储层条件下深 8 号煤具有极低孔和极低渗的显著特点。根据邻区资料,大宁-吉县及临兴区块的深 8 号煤的孔隙率分别为 3.13%和 5.39%,这与佳县地区的孔隙率分析结果较接近。同时,大宁-吉县区块和临兴区块的试井分析渗透率分别为 $0.0535\times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 和 $0.015\times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ (表 1),这与研究区的气测渗透率值较接近。这也说明,研究区的煤储层物性与已经实现初步商业化开发的大宁-吉县深部区和临兴深部区的储层条件相接近,展示了良好的煤层气开发前景。

2.4.3 孔隙结构及可动流体孔隙率特征

佳县区块 J16 井 8 个煤样的低场核磁共振测试结果表明,饱和水煤样的核磁共振 T₂ 谱呈现明显的三峰特征,自左向右 3 个谱峰大小依次大致反映了微/小孔、中/大孔和裂隙的发育情况,3 种孔隙类型

的占比分别为 48.4%、11.9%和 40.0%(图 7)。样品经空气风干后再次进行核磁共振 T₂ 谱测试,结果如图 7 中红色曲线所示,该 T₂ 谱反映了束缚水条件下样品内孔隙水的分布情况,即样品内含有一定的束缚水分和内在水分;图 7 中 2 个 T₂ 谱的差反映了样品中可动水的分布情况^[13-14]。与饱和 T₂ 谱相比,谱的幅度的减少,表明 3 种孔隙内的水信号明显减少。对比饱和 T₂ 谱与离心后的 T₂ 谱发现,研究区深 8 号煤的孔隙空间虽然以微小孔为主,但是大中孔或裂隙具有一定的连通性,煤的可动流体孔隙率较高,8 个样品的平均可动流体孔隙率占总孔隙率的比例在 30%左右。说明研究区煤样的孔隙仍具有良好的连通性,有利于煤层气的解吸、扩散和渗流产出。

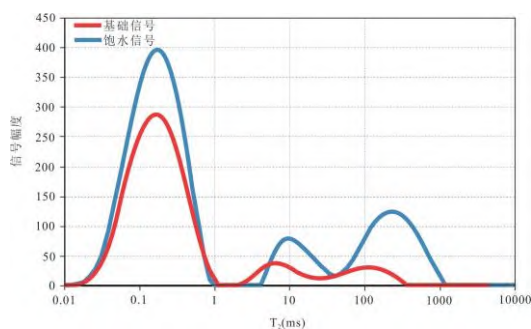


图 7 佳县区块 J16 井煤样的核磁共振 T₂ 谱图
(深度 2 141.8 m)

Fig.7 T₂ spectrum of a coal sample collected from well J16 in the Jiaxian Block (depth 2 141.8 m)

3 煤层气富集主控因素与富集规律

沉积盆地演化过程中,煤层的含气特征也随之变化,最终形成现今的煤层气含量分布。中浅部煤层气的勘探开发表明,影响煤层气含气量的主要因素包括煤层的热演化特征及生气潜力、地质构造特征、煤层顶底板封盖特征及地下水动力场特征等,本节也将从这几个方面来分析研究区深部煤层气的富集规律。

如前所述,煤层气的碳同位素分析结果表明,研究区煤层气成因主要为煤层自生自储的热成因气。在南部的佳县区块煤的热演化程度更高(图4),达到了热解生气高峰阶段,具有良好的煤层气生气潜力。煤层含气量测试结果也表明,研究区煤层含气量相对邻区较高,且含气组成中游离气占比非常高,深部煤层气的成藏特点更类似于致密气储层的特点,因此,决定研究区煤层气富集的关键因素应为后期的保存条件。

研究区井-震联合构造解释结果表明,神木-佳县区块8号煤层整体上为一宽缓的大型斜坡,东北部处于相对构造高部位、向西南方向构造标高逐渐降低。研究区地层非常平缓,倾角小于 2° ,仅在平缓基础上局部发育低幅鼻隆微构造,仅局部发育小断层(断距 $<50\text{ m}$)。其中,神木地区小断层多为逆断层,呈NW向延伸,通常具有良好的封堵性;佳县地区仅发现南部有NE向延伸的小型逆断层。整体上,研究区内构造简单,仅局部发育封堵性较好的逆断层,非常有利于深部煤层气的保存。参考大宁-吉县深部区的经验^[8],局部小型鼻隆微构造内游离气易富集成藏,这些局部微构造可能是煤层气的富集甜点。

中浅部煤层气的研究表明,水文地质条件与煤层气富集具有良好的相关关系^[15],而地下水的矿化度和水型是判断煤层气富集与否的重要指示指标^[16-17]。通常处于滞流状态的地下水矿化度值较高,地下水在压力等作用下对煤层气形成封堵作用;而处于径流状态的地下水矿化度值较低,易导致煤层气在水动力作用下运移逸散,不利于煤层气的保存。前人研究表明,鄂尔多斯盆地东北部8号煤层的主要含水层为其顶板上部的庙沟和毛儿沟灰岩含水层系^[18]。由于8号煤层底板泥岩具有良好的封闭作用,因此该煤层主要与顶板庙沟和毛儿沟灰岩含水层发生一定的水力联系。根据区内7口探井的水样分析结果表明,神木-佳县区块本溪组地下水主要为 CaCl_2 类型,地下水矿化度介于 $(6.8\sim 30.2)\times 10^4\text{ mg/L}$,平均为 $15.9\times 10^4\text{ mg/L}$,整体上符合高矿化度滞流的封闭水文地质环境,有利于煤层气的保存。其中,佳县北

部地区本溪组矿化度平均为 $14.0\times 10^4\text{ mg/L}$,佳县南部地区为 $17.3\times 10^4\text{ mg/L}$,佳县南部煤层气的富集条件较好,这也是南部煤层含气量整体较高的主要原因之一。

根据区内300余口测井资料进一步分析8号煤层的顶底板特征。神木-佳县区块8号煤层底板均为泥岩,而顶板以泥岩类型为主,局部发育砂岩和灰岩类型,分布情况如图8所示。其中,神木地区8号煤层顶板以泥岩或砂岩为主,封盖组合类型为泥岩-煤-泥岩(从底到顶,下同)或砂岩-煤-泥岩,两种类型分布面积相当(图8);佳县地区8号煤层顶板为泥岩、砂岩或灰岩,封盖组合主要为泥岩-煤-泥岩,其次为泥岩-煤-砂岩和泥岩-煤-灰岩。整个研究区顶板盖层的厚度都在10 m以上,上覆地层中厚的泥岩或灰岩顶板为煤层气赋存提供了良好的封闭环境。从区域分布来看,研究区煤层气的有利富集区主要位于佳县南部。

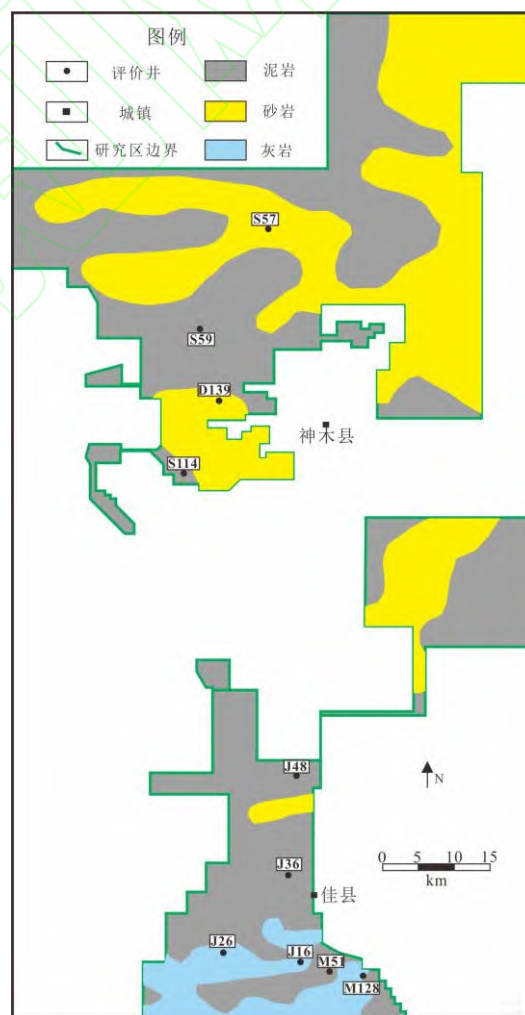


图8 佳县地区8号煤层顶板岩性分布特征
Fig.8 Lithological distribution of the roof of No.8 coal seam in the Jiaxian Block

综上所述,研究区由于处于埋深超过2 000 m的

深部，煤层的构造非常简单，断层不发育，且煤储层含水性具有高矿化度和滞流的特点，构造与水文地质条件非常有利于深部吸附气与游离气的保存。与浅层煤层气明显不同，研究区深部煤层气赋存除受吸附力影响外，也遵循天然气的毛管力封闭与浮力重力分异两种机制。对于深部吸附气，高储层压力有利于吸附封存；对于深部游离气，高压滞流的地质环境外加煤层顶板致密岩层的毛管封闭作用，共同决定了煤层气的自封闭作用(图9)。因此，总结研究区深部煤层气的富集规律主要包括3个方面：一

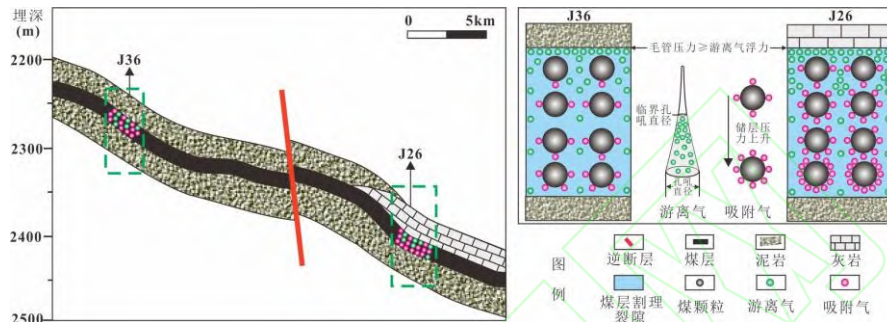


图9 研究区8号煤层的深部煤层气富集模式

Fig.9 Diagram shows the coalbed methane accumulation model of deep No. 8 coal seam in the study area

4 深部煤层气开发潜力分析

与该区临近的临兴区块和大宁-吉县区块分别由中联煤层气公司和中石油煤层气公司实施了深8号煤的勘探开发，均取得了煤层气的产气突破，特别是研究区南部的大宁-吉县深部区已初步进入商业化试开发阶段。神木-佳县区块深部煤层气勘探开发起步较晚，资料掌握程度较低，本节重点通过类比法分析研究区深部煤层气的开发潜力。

表1从煤层气地质条件、资源潜力、储层物性与可改造性3个方面系统总结对比了3个区块的差异特征。首先，3个区块的构造条件及水动力条件基本类似，均具有构造简单和地下水矿化度高的典型特点，预示着研究区也具有商业化产气的煤储层基础地质条件。其次，从资源潜力来看，研究区深8号煤的平均厚度较其他两个区略高；同时，研究区的含气量比大宁-吉县略低、但比临兴区块要高，煤层含气条件整体较优。此外，受热演化程度相对偏低的影响，研究区煤的吸附能力略低，导致煤层中吸附气含量较低，但游离气含量较高，非常有利于煤层气的开发。最后，研究区煤储层物性和可改造性方面明显好于其他两个区块。一方面，研究区主要是焦煤和瘦煤，煤的割理普遍较发育，仅部分被矿物充填(图6)。研究区以原生结构煤为主、碎裂煤为辅的煤体结构特点，也进一步印证了区内煤孔裂隙发育较好的典型特征。另一方面，研究区煤储层

是，研究区自北向南演化程度增高的总体格局，导致煤层含气量总体自北向南逐渐增高，这决定了区域含气量的总体分布格局；二是，全区总体滞流的水动力条件有利于大面积煤层气的保存，其中佳县南部煤层水矿化度更高，易受水力封堵形成高资源丰度的煤层气藏；三是，煤层顶底板岩性组合决定了煤层游离气含量的局部分布特征，煤层气富集区主要位于佳县南部的灰岩与泥岩顶板封盖区，其次是佳县北部的砂岩封盖区和神木区域。

的水平应力差仅有2.6~3.4 MPa，比其他两个区块明显要低，说明煤层的各向异性较弱，既有利于实施水平井分段压裂，又有利于体积压裂缝网的形成。

截至目前，神木-佳县区块已开展了1口煤层气井试气测试和2口水平井开发试验。其中，J54井日产气量 $0.656 \times 10^4 \text{ m}^3$ ，日产水量 3.84 m^3 ，无阻流量 $0.6901 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ；JN-1H水平井实施大规模体积压裂后，试采期间煤层气稳定日产量约 $8.16 \times 10^4 \text{ m}^3$ ；JM-2H水平井实施大规模体积压裂后，试采期间煤层气稳定日产量约 $12.47 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。整体上，神木-佳县区块深部煤层气规模化开发具有良好的前景。

5 结论

a. 神木-佳县区块深8号煤已处于热解生气高峰，具备大面积热成因气藏形成的基本条件；8号煤具有厚度大、发育稳定的特点，且顶底板岩性主要为泥岩，煤层所处的构造条件简单、水动力条件较弱，为煤层气富集保存提供了良好的条件，其中佳县南部煤层气资源条件最好。

b. 研究区深8号煤从北到南依次为气煤、肥煤、焦煤和瘦煤，煤体结构以原生结构煤为主、碎裂煤为辅，煤的割理和裂隙非常发育、可动流体孔隙率较高，煤层的孔渗条件较大宁-吉县深部区相当或稍好，显示了研究区良好的煤层气开发前景。

c. 与大宁-吉县深8号煤相比，研究区深8号煤的吸附能力相对较弱，吸附气含量稍低；但是煤中

游离气占比更高(15.21%~46.47%),含气量中游离气的贡献非常重要。总结研究区煤层气富集封存具有2种典型的机制,即吸附气主要受吸附压力封存控制,而游离气受毛管力封闭与浮力重力分异双重控制,二者共同决定了深部煤层含气量分布的垂向和平面特征,是佳县南部形成局部煤层气富集的主要原因。

d. 与鄂尔多斯盆地东部其他临近深部区块类分析表明,从基础地质条件、资源潜力、储层物性与可改造性三方面来看,研究区具有良好的深部煤层气开发条件,已被实施的1口试气井和2口开发水平井所证实。然而,神木-佳县区块南北跨度较大,其煤层气富集主控因素和开发地质条件可能存在较强的差异性,还有待进一步开展深入研究工作。

参考文献(References)

- [1] 秦勇, 申建. 论深部煤层气基本地质问题[J]. 石油学报, 2016, 37(1): 125-136.
- QIN Yong, SHEN Jian. On the fundamental issues of deep coalbed methane geology[J]. Acta Petrolei Sinica, 2016, 37(1): 125-136.
- [2] 秦勇, 申建, 李小刚. 中国煤层气资源控制程度及可靠性分析[J]. 天然气工业, 2022, 42(6): 19-32.
- QIN Yong, SHEN Jian, LI Xiaogang. Control degree and reliability of CBM resources in China[J]. Natural Gas Industry, 2022, 42(6): 19-32.
- [3] 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.
- [4] 徐兴雨. 鄂尔多斯盆地断裂构造及其控藏作用研究[D]. 青岛: 中国石油大学.
- XU Xingyu. Study on faults structure and reservoir control in Ordos Basin[D]. Qindao: China University of Petroleum.
- [5] 杨华, 席胜利, 魏新善, 等. 鄂尔多斯多旋回叠合盆地演化与天然气富集[J]. 中国石油勘探, 2006(1): 17-24.
- YANG Hua, XI Shengli, WEI Xinshan, et al. Evolution and natural gas enrichment of multicycle superimposed Basin in Ordos Basin[J]. Petroleum Geology, 2006(1): 17-24.
- [6] 段吉业, 刘鹏举, 夏德馨. 浅析华北板块中元古代-古生代构造格局及其演化[J]. 现代地质, 2002(4): 331-338.
- DUAN Jiye, LIU Pengju, XIA Dexin. The Preliminary Research on tectonic pattern and tectonic evolution of Mesoproterozoic-Paleozoic in North China Plate[J]. Geoscience, 2002(4): 331-338.
- [7] 王继远. 鄂尔多斯盆地榆林地区太原组-山西组页岩储层精细表征[D]. 北京: 中国地质大学(北京).
- WANG Jiyuan. Fine Characterization of Shale Reservoir of Taiyuan and Shanxi Formations in Yulin Area, Ordos Basin[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing).
- [8] 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+262.

XU Fengyin, WANG Chengwang, XIONG Xianye, 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.

[9] 陶传奇. 鄂尔多斯盆地东缘临兴地区深部煤层气富集成藏规律研究[D]. 北京: 中国矿业大学(北京).

TAO Chuanqi. Deep coalbed methane accumulation and reservoiring in Linxing area, eastern Ordos Basin, China[D]. Beijing: China University of Mining and Technology(Beijing).

[10] 王成旺, 甄怀宾, 陈高杰, 等. 大宁-吉县区块深部8号煤储层特征及可压裂性评价[J]. 中国煤炭地质, 2022, 34(2): 1-5.

WANG Chengwang, ZHEN Huaibin, CHEN Gaojie, et al. Assessment of coal No.8 reservoir features and fracturability in Daning-Jixian Block deep part[J]. 2022, 34(2): 1-5.

[11] 倪小明, 王延斌, 韩文龙, 等. 煤层气开发地质单元划分与应用实践[J]. 煤炭学报, 2020, 45(7): 2562-2574.

NI Xiaoming, WANG Yanbin, HAN Wenlong, et al. Division and application of development geological units for coalbed methane[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(7): 2562-2574.

[12] 贾小宝. 大宁-吉县地区深部煤储层物性特征研究[D]. 太原: 太原理工大学.

JIA Xiaobao. The physical characteristics of deep coal reservoir in Daning-Jixian area[D]. TaiYuan: Taiyuan University of Technology.

[13] YAO Yanbin, LIU Dameng, CHE Yao, et al. Petrophysical characterization of coals by low-field nuclear magnetic resonance (NMR)[J]. Fuel, 2010, 89(7): 1371-1380.

[14] 姚艳斌, 刘大猛. 基于核磁共振弛豫谱的煤储层岩石物理与流体表征[J]. 煤炭科学技术, 2016, 44(6): 14-22.

YAO Yanbin, LIU Dameng. Petrophysics and fluid properties characterizations of coalbed methane reservoir by using NMR relaxation time analysis[J]. Coal Science and Technology, 2016, 44(6): 14-22.

[15] MENG Yanjun, TANG Dazhen, Xu Hao. Geological controls and coalbed methane production potential evaluation: A case study in Liulin area, eastern Ordos Basin, China[J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2014, 21: 95-111.

[16] 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.

[17] YAO Yanbin, LIU Dameng, YAN Taotao. Geological and hydrogeological controls on the accumulation of coalbed methane in the Weibei field, southeastern Ordos Basin[J]. International Journal of Coal Geology, 2014, 121: 148-159.

[18] 顾娇杨, 张兵, 郭明强. 临兴区块深部煤层气富集规律与勘探开发前景[J]. 煤炭学报, 2016, 41(1): 72-79.

GU Jiaoyang, ZHANG Bing, GUO Mingqiang. Deep coalbed methane enrichment rules and its exploration and development prospect in Linxing block[J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(1): 72-79.

(责任编辑 范章群)