

鄂尔多斯盆地中、东部煤岩气富集机制与有利区预测方法

蒲庭玉^{1,2}, 庞雄奇^{1,2}, 林浩^{1,2}, 陈雨萱^{1,2}, 王雷^{1,2}, 张子英^{1,2}, 丁蓉^{1,3},
邓泽^{4,5}, 田文广⁴, 肖惠译^{1,2}

[1. 中国石油大学(北京)地球科学学院, 北京 102249; 2. 油气资源与工程全国重点实验室, 北京 102249; 3. 中国石油煤层气有限责任公司, 北京 100028; 4. 中国石油勘探开发研究院, 北京 100083; 5. 中国石油大学(北京)非常规油气科学技术研究院, 北京 102249]

摘要:鄂尔多斯盆地深层煤岩气勘探取得重大突破, 开辟了一个全新的发展领域。目前, 对深层煤岩气富集机理及有利勘探方向的认识仍存在分歧, 表明其富集机制研究有待进一步深化。以鄂尔多斯盆地中东部石炭系本溪组 8# 煤层为研究对象, 综合运用地质剖析、统计分析以及油气动力场理论, 探讨深层煤岩气的富集条件及有利区分布。研究表明, 在镜质体反射率(R_o)约为 1.5%~2.5% 的关键演化阶段, 煤岩气的生烃、储集、输导与保存条件呈现显著的时-空叠加特征, 对富气甜点的形成与分布起到主控作用, 具体表现为以下 4 点: ①该阶段煤岩产气速率高、生烃强度大, 为气体富集奠定物质基础。②煤岩孔隙度异常高, 在 R_o 约为 2.0% 时达到二次峰值, 微孔与宏孔孔隙体积同步增加, 为煤岩气富集提供优质储集空间。③煤岩割理体系高度发育, 割理密度在 R_o 约为 1.9% 时达到峰值, 构建起煤岩气运聚富集的高效输导通道。④煤岩周边围岩处于局限动力场, 为富气甜点的形成创造了良好的保存环境。在此基础上, 构建了以“生-储-导-保”四要素定量表征为核心的深层煤岩气有利区综合评价模型, 并采用多参数叠加方法对研究区内的有利区进行分级预测。预测结果将研究区划分为 I 类、II 类和 III 类有利区。钻探结果表明, I 类有利区内的高含气井(含气量 $\geq 18 \text{ m}^3/\text{t}$)占比达 90%, 平均含气量为 $24.04 \text{ m}^3/\text{t}$, 模型预测与实际勘探结果吻合较好。研究成果为鄂尔多斯盆地深层煤岩气有利区优选及进一步勘探部署提供了可靠的理论依据和技术支撑, 对提升资源开发效率、保障国家能源安全具有重要意义。

关键词: 孔隙结构; 全油气系统; 有利区预测; 油气富集; 煤岩气; 鄂尔多斯盆地

中图分类号: TE132.2

文献标识码: A

Enrichment mechanisms and play fairway prediction methods of coal-rock gas in the central-eastern Ordos Basin

PU Tingyu^{1,2}, PANG Xiongqi^{1,2}, LIN Hao^{1,2}, CHEN Yuxuan^{1,2}, WANG Lei^{1,2}, ZHANG Ziyin^{1,2}, DING Rong^{1,3},
DENG Ze^{4,5}, TIAN Wenguang⁴, XIAO Huiyi^{1,2}

[1. College of Geosciences, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China; 2. State Key Laboratory of Petroleum Resources and Engineering, Beijing 102249, China; 3. PetroChina Coalbed Methane Company Limited, Beijing 100028, China; 4. Research Institute of Petroleum Exploration and Development, PetroChina, Beijing 100083, China; 5. Unconventional Petroleum Research Institute, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China]

Abstract: Significant breakthroughs have recently been achieved in deep coal-rock gas exploration in the Ordos Basin, opening up a new frontier for unconventional gas development. However, considerable discrepancies still exist regarding the enrichment mechanisms and favorable exploration targets of deep coal-rock gas, indicating that further research is needed. This study focuses on the No. 8 coal seam of the Benxi Formation, Upper Paleozoic, in the central-eastern Ordos Basin. Geological analysis, statistical analysis, and hydrocarbon dynamic field theory were comprehensively employed to investigate the enrichment conditions and favorable area distributions of deep coal-rock gas. As indicated by the research results, during the critical thermal evolution stage with vitrinite reflectance (R_o) ranging from approximately

收稿日期: 2026-01-31; 修回日期: 2026-05-08。

第一作者简介: 蒲庭玉(2000—), 男, 博士研究生, 油气藏形成机制与分布规律。E-mail: putycup@163.com。

通信作者简介: 庞雄奇(1961—), 男, 教授、博士研究生导师, 油气藏形成机理与分布规律、含油气盆地分析与资源评价。E-mail: pangxq@cup.edu.cn。

基金项目: 中国石油天然气股份有限公司勘探开发研究院廊坊分院项目(RIPED-2024-JS-1292); 中国石油天然气股份有限公司勘探开发研究院项目(2024DJ2301); 中国石油煤层气有限责任公司科技项目(2025-KJ-05)。

1.5% to 2.5%, the hydrocarbon generation, reservoir development, migration, and preservation conditions of coal-rock gas exhibit significant spatiotemporal coupling characteristics, which exert a dominant control on the formation and distribution of gas-rich sweet spots. Specifically, these characteristics are reflected in the following four aspects: (1) coal rocks at this stage are characterized by high gas generation rates and strong hydrocarbon generation intensity, thereby providing a substantial material basis for gas enrichment; (2) coal rocks exhibit abnormally high porosity, with a secondary peak occurring at $R_o \approx 2.0\%$, while the pore volumes of both micropores and macropores increase synchronously, providing favorable reservoir space for coal-rock gas accumulation; (3) the cleat system of coal rocks is highly developed, and cleat density reaches its maximum at $R_o \approx 1.9\%$, forming efficient migration pathways for coal-rock gas accumulation; (4) the surrounding strata adjacent to coal seams are characterized by confined dynamic fields, thereby creating favorable preservation conditions for gas-rich sweet spots. On this basis, a comprehensive evaluation model for favorable deep coal-rock gas areas was established based on the quantitative characterization of the four key elements of "generation, reservoir, migration, and preservation." A multi-parameter superposition method was further adopted to predict and grade favorable areas within the study area. The prediction results divided the study area into Class I, Class II, and Class III favorable areas. Drilling results indicate that high-gas-content wells (gas content $\geq 18 \text{ m}^3/\text{t}$) account for 90% of wells in Class I favorable areas, with an average gas content of $24.04 \text{ m}^3/\text{t}$. The prediction results are highly consistent with actual exploration performance. The research results provide a reliable theoretical basis and technical support for play fairway delineation and further exploration deployment of deep coal-rock gas in the Ordos Basin, and are of great significance for improving resource development efficiency and safeguarding national energy security.

Key words: pore structure, whole petroleum system, favorable area prediction, oil and gas enrichment, coal-rock gas, Ordos Basin

引用格式: 蒲庭玉, 庞雄奇, 林浩等. 鄂尔多斯盆地中、东部煤岩气富集机制与有利区预测方法[J]. 石油与天然气地质, DOI: 10.11743/oggXXXXXX01.

PU Tingyu, PANG Xiongqi, LIN Hao, et al. Enrichment mechanisms and play fairway prediction methods of coal-rock gas in the central-eastern Ordos Basin[J]. Oil & Gas Geology, DOI: 10.11743/oggXXXXXX01.

近年来,中国煤岩气勘探开发在理论创新与产业实践中均实现跨越式发展,已成为中国能源结构优化与非常规天然气增产的核心战略接替资源^[1]。鄂尔多斯盆地煤系地层广泛分布,煤阶演化完整,是中国煤岩气勘探程度最高、勘探成果最为集中的盆地之一;多口探井获得工业性高产气流,具备开展深层煤岩气富集机理研究的天然优势^[2-5]。牛小兵等基于体积法初步估算鄂尔多斯盆地煤岩气资源量为 $22.38 \times 10^{12} \text{ m}^3$ ^[6],为未来的煤岩气革命奠定了坚实的资源基础。相较于中、浅层煤层气,深层煤岩气在成藏条件、赋存状态及富集模式等方面存在显著差异,目前对其富集机制尚未形成统一认识,有利区优选也缺乏系统、可靠的评价方法,这已成为制约煤岩气进一步勘探部署与规模化开发的关键科学问题。因此,系统厘清煤岩气的富集机制并开展有利区预测研究,对于降低勘探风险、提高勘探成功率具有重要的理论意义和现实需求。

前人对煤岩的物理性质、地球化学性质和生烃演化过程等已形成较为成熟的认识,取得了一系列理论

成果^[7-8]。针对煤岩气的成藏条件与富集规律也开展了大量研究:秦勇等人从深部地应力状态、深部煤层吸附性能和深部温压场3个方面分析了深部煤层气的成藏效应^[9];申建等人在此基础上进一步讨论了煤岩孔隙特征、渗透率和煤岩力学性质^[10];牛小兵和李明瑞等认为煤层厚度、煤阶、聚散组合、埋藏深度和沉积环境等是煤岩气富集的主要控制因素^[6,11];周立宏等提出了煤岩气“二元富集”模式,认为煤岩是成藏的基础,保存条件是控产的关键^[12];李国欣等利用体积法、容积法和类比法,对中国陆上煤岩气有利区开展了资源潜力分析^[13]。上述研究从不同角度深化了对煤岩气成藏条件及有利区的认识,但总体上多聚焦于特征分析,对关键演化阶段多要素的协同耦合机制探讨不足,尤其缺乏对煤岩孔隙、割理与动力场的综合研究。本文在前人研究的基础上,以鄂尔多斯盆地中东部上古生界石炭系本溪组8#煤层为研究对象,从煤岩气赋存空间和油气动力场入手,系统分析煤岩孔隙结构与割理密度的演化规律及其对不同赋存相态煤岩气富集的

影响。同时,结合全油气系统与油气动力场理论,探讨深层煤岩与围岩所处动力场的差异及围岩的保存效应,最终阐明深层煤岩气富集机制,建立有利区预测方法,为勘探部署提供地质依据和技术支撑。

1 区域地质概况

鄂尔多斯盆地是华北板块西部典型的克拉通边缘叠合盆地^[14],横跨五省区,面积达 $25 \times 10^4 \text{ km}^2$,是中国第二大沉积盆地^[15]。盆地整体呈西高东低的地形格局,东翼宽缓、西翼窄陡。盆地内部可划分为6个一级构造单元(图1a)。该盆地经历了吕梁、加里东、海西、印支、燕山和喜马拉雅等多期构造演化,内部断层活动较弱,是一个整体构造相对简单、沉降稳定的大型多旋回沉积盆地。盆地西缘发育逆冲断层系统;而在煤岩气取得勘探突破的盆地东缘,总体构

造为倾角平缓的大型单斜构造,断层发育较少且规模较小,仅局部地区发育大中型断层^[16],整体有利于煤岩气的保存与富集。

鄂尔多斯盆地上古生界主力煤层分布于上石炭统本溪组、下二叠统太原组和山西组,聚煤期主要为海西运动和印支运动,属于典型的海-陆过渡相。煤层呈广覆式分布,含煤面积达 $16 \times 10^4 \text{ km}^2$,镜质体反射率(R_o)介于0.8%~2.7%。其中,山西组主要发育1[#]—5[#]煤层,煤层总厚度为4~15 m;太原组主要发育6[#],7[#]以及8[#]煤层上段,总厚度为3~40 m;本溪组主要发育8[#]—10[#]煤层,习惯上常将8[#]煤层和9[#]煤层统称为8[#]+9[#]煤层,该层位是鄂尔多斯盆地煤岩气勘探开发取得突破的主要层位,厚度一般为2~15 m,全盆地最厚处可达25 m^[16-17](图1b)。

本研究区位于鄂尔多斯盆地中东部。根据煤岩的自然演化序列,本次共采集了39口井的100余块煤岩

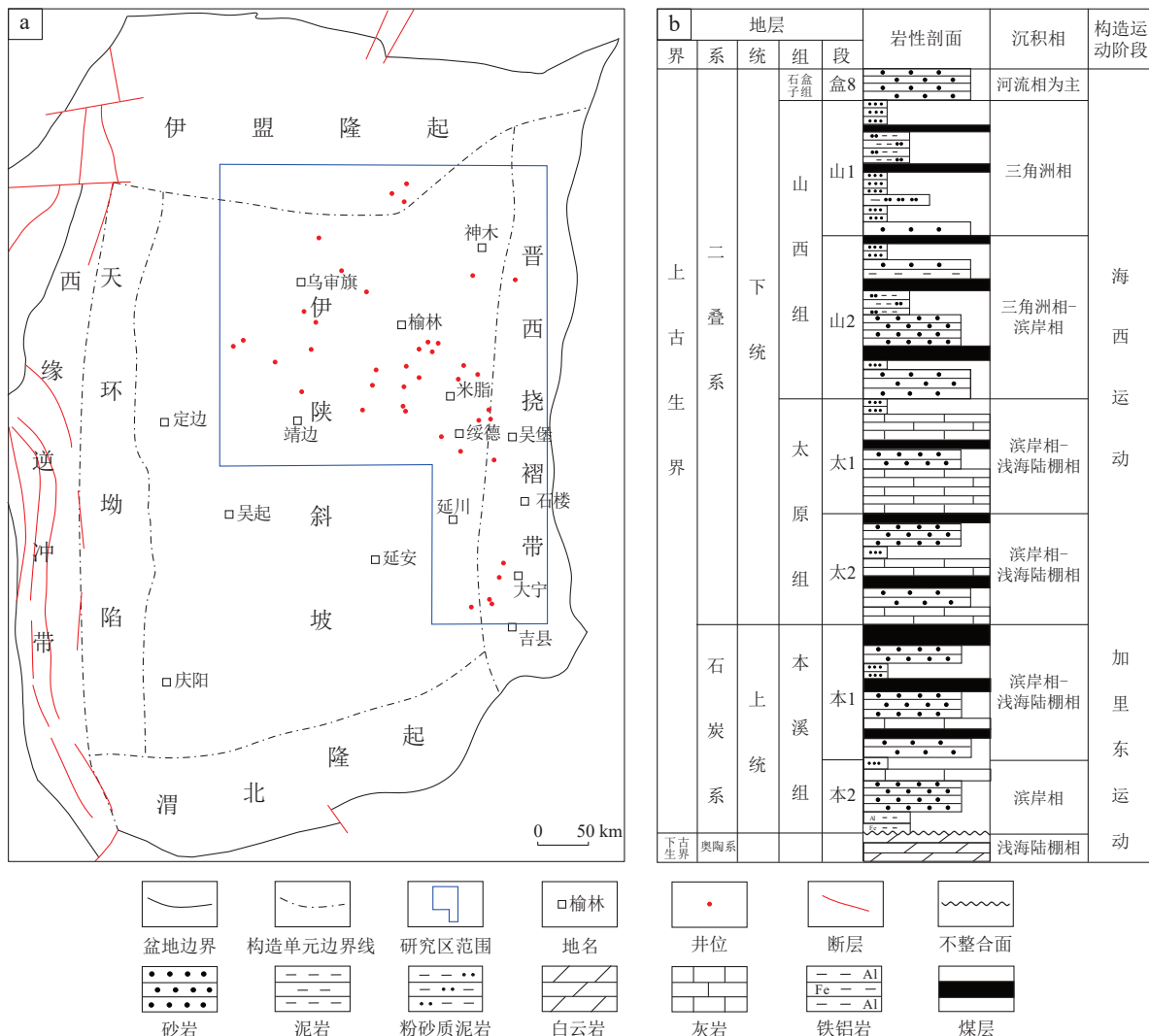


图1 鄂尔多斯盆地构造分区(a)及上古生界含煤层系地层柱状图(b)

Fig. 1 Structural division (a) and stratigraphic column of the Upper Paleozoic coal-bearing formations (b) in the Ordos Basin

样品,均取自本溪组8#煤层,各井位在平面上均匀覆盖研究区,具体井点位置见图1a。本溪期,盆地主要发育潟湖、潮坪、三角洲、浅海陆棚和障壁岛等沉积相^[18],为泥炭沉积提供了丰富的物源条件,有利于大面积成煤。研究区东北部8#煤层厚度可超过10 m,自北向南总体呈减薄趋势,大宁—吉县附近煤层厚度可达8 m; R_o 整体呈南高、北低的趋势,普遍大于1.0%。盆地东缘临兴区块受紫金山侵入岩体的影响较大, R_o 异常高;东南部吴堡—石楼—大宁—吉县一带的 R_o 普遍大于2.2%,已进入热演化过成熟阶段。综合来看,石炭系—二叠系煤层无论是其自身的先天条件(如分布面积、厚度、煤质和成熟度等),还是后天的保存环境(如构造运动和断层发育等),均为煤岩气的勘探突破提供了坚实的资源基础和地质保障。

2 研究思路和工作方法

2.1 煤岩气高含气层的分布特征

据相关学者评估,本溪组8#煤层的煤岩气资源量为 $17.47 \times 10^{12} \text{ m}^3$,约占盆地深层煤岩气总量的78%^[6],因此,将该层位作为本次研究的目标高含气层位。研究区煤样实测含气量介于 $7.7 \sim 27.0 \text{ m}^3/\text{t}$,在扣除水分和灰分的影响后,该数值将进一步升高。同时,8#煤层的含气量随 R_o 和埋深的增加而逐渐升高,在达到最大值($R_o \approx 2.2\%$,埋深 $\approx 2400 \text{ m}$)后开始减小(图2)。为此,本文将 $R_o \approx 2.2\%$ 、埋深 $\approx 2400 \text{ m}$ 作为深层煤岩气含气量发生转折的临界成熟度和临界深度,该临界条件可与下文的孔隙度和割理密度的高值区间进行对比印证。

在厘定高含气层位之后,首先剖析吸附气与游离气的含量和相对比例。吸附气量计算依据等温吸附实验、孔隙度和视密度测试等结果。由于本溪组地层的温-压条件远超甲烷的临界温-压,甲烷在煤岩中的吸附属于超临界吸附,因此需将测试所得的过剩吸附量校正为绝对吸附量^[19],相关计算公式如下:

$$V_{ab} = \frac{V_L p}{p_L + p} \quad (1)$$

$$V_{ex} = \frac{V_L p}{p_L + p} \left(1 - \frac{\rho_g}{\rho_a}\right) \quad (2)$$

$$\rho_g = \frac{pM}{ZRT} \quad (3)$$

式中: V_{ab} 为甲烷绝对吸附量, m^3/t ; V_L 为兰格缪尔体积, m^3/t ; p_L 为兰格缪尔压力,MPa; p 为储层压力,MPa; V_{ex} 为过剩甲烷吸附量, m^3/t ; ρ_g 为游离态甲烷密度, g/cm^3 ;

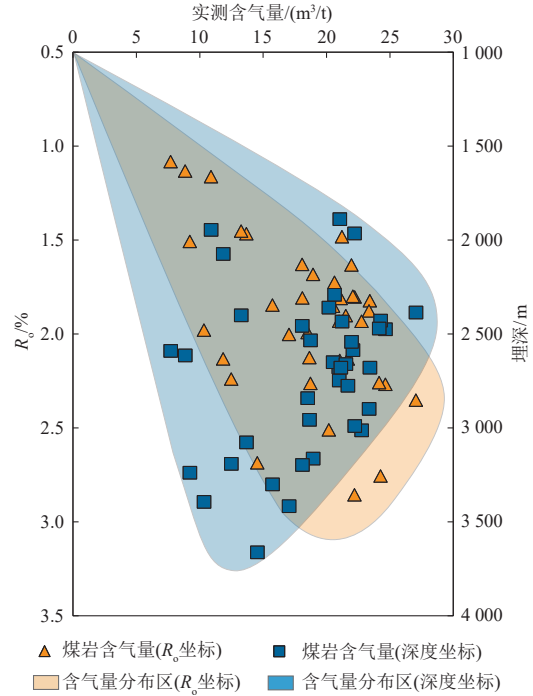


图2 鄂尔多斯盆地中、东部本溪组8#煤层实测含气量与 R_o 及深度的关系

Fig. 2 Relationship between measured gas content, R_o , and burial depth of the No. 8 coal seam of the Benxi Formation in the central-eastern Ordos Basin (R_o 为镜质体反射率。)

ρ_a 为吸附态甲烷密度, g/cm^3 ; M 为甲烷的气体分子质量, g/mol ; Z 为气体压缩因子,无量纲; R 为理想气体常数, $\text{J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$; T 为储层温度,K。

游离气含量的计算参考李勇等人提出的深部煤层气游离气含量预测模型^[20]。该模型在煤岩总孔隙度的基础上减去了吸附气所占据的孔隙空间,从而能够更准确地评估游离气含量,方程如下:

$$V_f = (\Phi - \Phi_a) \frac{1 - S_w}{\rho_b B_g} \quad (4)$$

$$\Phi_a = V_{ab} \rho_b \rho_{gs} / \rho_a \quad (5)$$

式中: V_f 为煤层游离气含量, m^3/t ; Φ 为气测煤层孔隙度,%; Φ_a 为吸附态甲烷占据的孔隙度,%; S_w 为煤层含水饱和度,%; ρ_b 为煤层视密度, t/m^3 ; B_g 为甲烷体积系数, m^3/m^3 ; ρ_{gs} 为标准状态(293.15 K, 101 kPa)下游离态甲烷密度, g/cm^3 。

2.2 煤岩气富集主控因素的确定

2.2.1 高生气强度

煤岩生气强度是煤岩厚度、有机质丰度、类型及成熟度的综合反映,是决定煤岩气能否富集的基础。只

有当煤岩在地质演化过程中具备持续、高效的生气能力时,才能在满足自身吸附存储需求的同时,克服运移损耗,形成规模性富集;反之,若生气强度不足,即便煤岩具备一定的生烃潜力,也可能因天然气生成量难以弥补吸附平衡损耗和扩散散失,而无法形成有效富集。研究表明,鄂尔多斯盆地8#煤层均达到成熟—过成熟阶段,总有机碳含量、氯仿沥青“A”含量及总烃含量相对较高,生烃潜量为4~220 mg/g^[6],为高生气强度的形成提供了前提条件。

2.2.2 高孔隙度

孔隙空间是煤岩气主要的赋存空间和运移通道。通过扫描电镜观测煤岩中的孔隙类型,并基于二氧化碳吸附、氮气吸附和高压压汞实验,分析煤岩各孔径段的孔隙体积分布及其相对含量。在此基础上,明确煤岩孔隙度随 R_o 的变化特征,指出煤岩高含气区间对应的孔隙度范围;进一步依据微孔(孔径<2 nm)、介孔(孔径=2~50 nm)和宏孔(孔径>50 nm)的孔隙体积及相对含量变化,解释吸附气、游离气及总含气量的变化规律,明确煤岩气富集与孔隙度之间的对应关系。

2.2.3 高密度割理

高密度割理一方面可提升游离气的储集空间,另一方面能加速超出吸附容量的天然气发生短距离运移,减

少扩散散失,从而促使天然气在有利构造或储层甜点区快速聚集。若割理密度不足或被充填物封堵,即便煤岩具备高生气潜力和优质孔隙条件,也可能因天然气运移不畅而导致富集效率降低。本文重点基于镜下观测及宏观描述,剖析研究区8#煤层的割理发育特征,包括割理类型、空间展布形态、密度、宽度、连通性及充填物类型(泥质、方解石或无充填)等核心参数。对不同埋深(1 880~3 666 m)和不同成熟度($R_o=0.9\%\sim 3.0\%$)条件下煤岩的割理密度进行统计分析。明确割理密度随埋深和 R_o 的演化规律,并探讨其对煤岩气富集的影响。

2.2.4 围岩动力场

贾承造等揭示了非常规油气的自封闭成藏机制,指出致密油气、页岩油气和煤层气的自封闭力均以毛细管压力和分子吸附力为主^[21]。2023年,全油气系统(Whole Petroleum System,简称WPS)理论被正式提出^[22],该理论指含油气盆地中由相互关联的烃源岩层形成的全部油气、油气藏、油气资源及其形成演化过程与分布特征所构成的自然系统。全油气系统内存在3个油气动力边界,分别为浮力成藏下限(BHAD)^[23]、油气成藏底限(HADL)^[24]和源岩供烃底限(ASDL)^[25];基于这些动力边界,可划分出3类流体动力场^[26],即自由动力场(F-HDF)、局限动力场(C-HDF)和束缚动力场(B-HDF)(图3)。近年来,WPS理论不断发展,取得

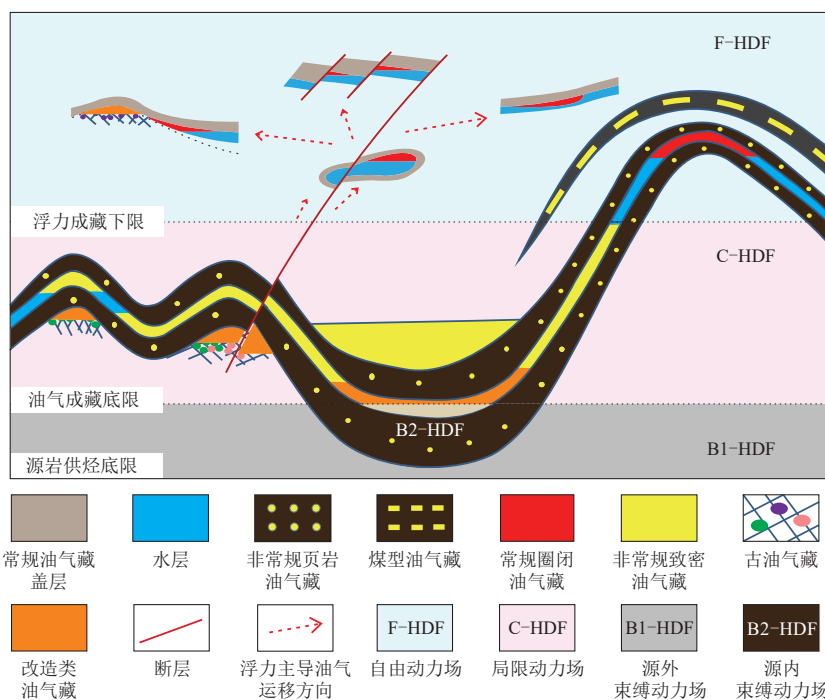


图3 全油气系统内油气动力边界和油气动力场耦合成藏机制与分布发育模式示意图^[30]

Fig. 3 Accumulation mechanism and distribution pattern of oil and gas resources controlled by a combination of dynamic boundaries and dynamic fields within the whole petroleum system^[30]

了显著进展,已成功应用于页岩油气、致密油气及天然气水合物的富集规律与资源潜力评估中^[27-29],同时也在全国各大盆地得到了成熟应用。

支东明等率先将WPS理论应用于煤系地层^[31],研究表明煤系地层内发育多种类型油气资源,具有全序列成藏的特点。李国欣等基于煤岩储层内的天然气,构建了鄂尔多斯盆地东缘和准噶尔盆地煤系全油气系统^[32],揭示煤岩气“三场”控藏机理。其中,割理裂缝内的游离气具备常规气的成藏特征,而微纳米孔内的吸附气则表现出非常规气的特征。研究指出,在局限动力场向自由动力场转化的过程中存在煤岩气-煤层气聚集过渡带,但未具体划定其深度与边界。丁蓉等也基于WPS思路对鄂尔多斯盆地石炭系-二叠系煤系开展了研究^[33],但其对动力边界和动力场的划分仍基于致密砂岩作为储层的思路,未对煤岩储层进行单独划分。

本研究将对煤岩及围岩的动力边界与动力场类型进行单独划分。首先,依据动力平衡方程,结合煤岩的润湿角、孔喉半径和界面张力等数据,计算其BHAD;在此基础上,结合煤层埋深判断其所处的动力场类型,识别主导油气运移的作用力,并判别煤岩气藏的常规或非常规属性。围岩的动力场及动力边界划分,则参照前人对鄂尔多斯盆地中东部致密砂岩的研究成果。最后,结合煤岩与围岩的动力场特征及气体运移状态,阐述围岩对煤岩气的封闭与保护机制。

3 基本认识

3.1 煤岩特征与煤岩气赋存特征及含量

鄂尔多斯盆地本溪组煤岩整体结构保存良好,多为原生结构煤(图4a),在局部构造强烈区域发育有碎裂煤和碎粒煤^[17]。从显微组分来看,8#煤层中镜质组含量最高,介于41.5%~94.6%,平均值为76.1%,表明其生烃能力强;壳质组含量最低,惰质组与矿物组的相对含量变化较大。工业分析结果显示,8#煤层固定碳含量较高,平均值超过70.00%;灰分含量平均值为15.20%,挥发分含量平均值为11.50%,水分含量平均值为0.87%,均处于较低水平。总体而言,本溪组8#煤层煤质优良,生烃条件优异。

在获取计算参数的基础上(表1),根据公式(1)—公式(5)计算得到:本溪组8#煤层吸附气含量为0.84~27.43 m³/t,平均值为15.89 m³/t;游离气含量为1.32~13.94 m³/t,平均值为8.08 m³/t;游离气体积占比为20.1%~52.9%,平均值为37.1%。周立宏等预测埋深2 000 m以深的游离气体积占比可达41%^[34],与本文结果基本吻合。吸附气含量在埋深2 500 m以浅时均维持在约25 m³/t,随后逐渐下降;游离气含量先增后减,气体含量最高值对应的埋深约为2 700 m(图5a),相应

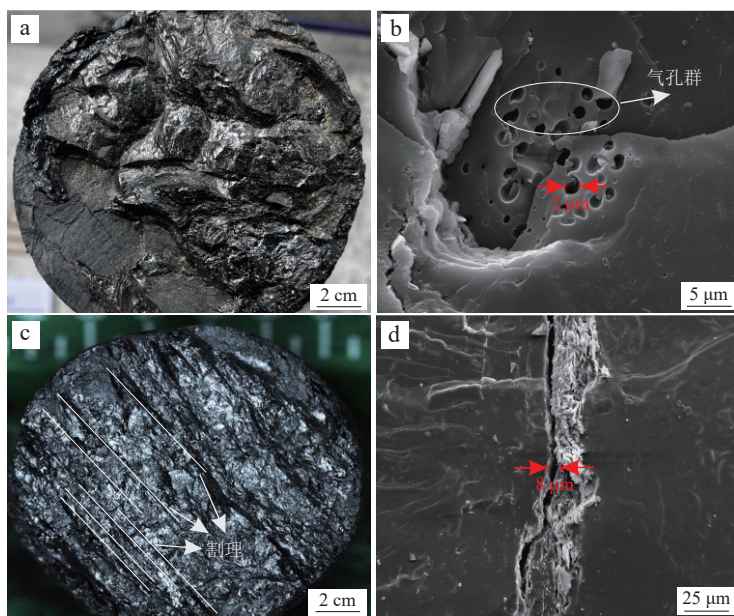


图4 鄂尔多斯盆地中、东部本溪组8#煤层宏观特征和镜下特征照片

Fig. 4 Photographs of macroscopic and microscopic characteristics of the No. 8 coal seam of the Benxi Formation in the central-eastern Ordos Basin

a. 8#煤层宏观煤体结构,埋深2 355 m, $R_o \approx 2.3\%$,岩心;b. 镜质体中发育的气孔群,埋深2 986 m, $R_o \approx 1.8\%$,扫描电镜;c. 煤岩割理宏观特征,埋深3 163 m, $R_o \approx 1.9\%$,面割理为4条/(5 cm),端割理为2条/(5 cm),岩心;d. 均质镜质体中发育的裂缝,埋深2 255 m, $R_o \approx 2.9\%$,扫描电镜

表1 鄂尔多斯盆地中、东部部分样品吸附气-游离气计算相关参数

Table 1 Parameters related to the calculation of adsorbed gas and free gas for selected samples from the central-eastern Ordos Basin

样品 编号	埋深/m	R_0 /%	ρ_c / (g/cm ³)	Φ /%	p /MPa	T /K	V_L / (m ³ /t)	p_L / MPa	B_g / (m ³ /m ³)	ρ_g / (g/cm ³)	ρ_a / (g/cm ³)	Φ_a /%
N1	2 839.0	2.0	1.4	4.5	27.5	363.3	23.0	3.4	0.005	0.152	0.225	0.086
N2	2 838.7	2.0	1.4	4.0	27.5	363.3	24.2	3.9	0.005	0.152	0.225	0.086
N3	2 840.1	2.0	1.8	2.6	27.5	363.4	11.1	4.0	0.005	0.152	0.225	0.052
N4	2 840.7	1.9	1.4	7.1	27.5	363.4	24.0	3.4	0.005	0.152	0.225	0.085
N5	2 841.5	2.0	1.4	5.0	27.5	363.4	23.7	3.2	0.005	0.152	0.225	0.086
N6	2 842.0	2.1	1.3	3.5	27.5	363.4	25.5	3.6	0.005	0.152	0.225	0.088
N7	3 010.1	1.9	1.4	6.9	29.2	368.3	19.3	3.1	0.005	0.157	0.223	0.070
N8	2 674.3	1.8	1.3	8.9	25.8	358.5	22.4	3.0	0.005	0.146	0.228	0.076
N9	2 676.0	1.8	1.3	8.2	25.8	358.6	21.1	2.9	0.005	0.146	0.228	0.074
N10	2 679.3	1.8	1.5	9.9	25.8	358.7	15.8	2.9	0.005	0.146	0.228	0.063
N11	3 187.8	2.2	1.4	6.4	31.1	373.6	15.3	3.2	0.004	0.162	0.220	0.058
N12	3 187.4	2.2	1.4	6.3	31.1	373.5	15.1	3.0	0.004	0.162	0.220	0.059
N13	3 188.6	2.3	1.7	1.4	31.1	373.6	3.9	3.4	0.004	0.162	0.220	0.018
N14	3 189.4	2.2	1.8	4.1	31.1	373.6	9.6	3.5	0.004	0.162	0.220	0.047
N15	2 472.2	2.2	1.3	9.0	23.7	352.6	26.6	4.6	0.005	0.138	0.232	0.086
N16	2 473.7	2.3	1.4	8.5	23.7	352.6	22.7	5.1	0.005	0.138	0.232	0.074
N17	3 636.9	2.1	1.4	3.8	35.7	386.7	14.2	3.4	0.004	0.173	0.213	0.057
N18	3 637.5	2.3	1.7	4.3	35.7	386.7	8.0	3.8	0.004	0.173	0.213	0.038
N19	2 610.6	1.1	1.4	3.0	25.1	356.6	6.9	3.2	0.005	0.143	0.229	0.025
N20	3 159.9	1.7	1.3	6.4	30.8	372.7	21.9	3.8	0.004	0.161	0.220	0.078
N21	2 746.4	1.9	1.3	7.3	26.5	360.6	24.5	3.7	0.005	0.148	0.227	0.082
N22	2 355.6	2.5	1.3	5.0	22.5	349.2	22.7	3.5	0.005	0.133	0.234	0.075
N23	2 357.1	2.5	1.3	4.4	22.5	349.2	25.9	3.6	0.005	0.133	0.234	0.083
N24	2 358.7	2.6	1.7	7.0	22.5	349.3	23.3	3.4	0.005	0.133	0.234	0.098

注: R_0 . 镜质体反射率; ρ_c . 煤岩视密度; Φ . 煤岩气测孔隙度; p . 地层压力; T . 地层温度; V_L . 兰氏体积; p_L . 兰氏压力; B_g . 体积系数; ρ_g . 游离态甲烷密度; ρ_a . 吸附态甲烷密度; Φ_a . 吸附态甲烷的孔隙度。

R_0 约为2.0%,而吸附气含量开始下降的临界 R_0 则更大(图5b)。此外,游离气相对含量随埋深增加而升高,在研究区8#煤层埋深范围内,游离气体积占比从约20%增至约45%,增幅超过100%(图5c)。

3.2 孔隙度的二次高峰

勘探实践表明,深层煤岩仍发育有效的孔-缝系统。有学者发现,煤岩孔隙度随深度的变化并非单调递减,而是在烟煤向无烟煤转化过程中存在一个孔隙度的二次高峰^[35-36],推测可能是烃类排气形成的气孔增加了孔隙度。本溪组煤岩处于成熟-过成熟阶段,甲烷大量生成^[37]。镜下观测显示,研究区本溪组8#煤层发育大量热成因气孔,以圆形和椭圆形为主,常成群出现,直径通常为几十至几百纳米,部分可达微米级(图4b)。这些气孔属于介孔和宏孔的孔径范围,主要为游离气提供赋存空间^[38],同时也为吸附气提供吸附

点位。

对研究区8#煤层孔隙度与 R_0 的相关性分析表明,在中等煤阶范围内,煤岩孔隙度并非随热演化程度加深及压实作用增强而单调递减,而是在 $R_0 \approx 2.0\%$ 时出现异常高值,之后随 R_0 增大逐步降低(图6a)。当 R_0 大于1.5%时,煤岩进入大规模热解产气阶段^[39],脂肪族侧链裂解产生甲烷小分子,同时煤岩芳构化增强,两者均会增大孔隙度,存在协同叠加效应。煤岩脂肪族链的长度与 R_0 呈“U”形对应关系,在 $R_0 \approx 2.0\%$ 时达到最低^[40],此时脂肪族链断裂程度最高,甲烷转化效率最高,与孔隙度二次高值对应的 R_0 高度吻合。结合鄂尔多斯盆地的构造热事件分析:早白垩世是盆地的主要成藏期^[41],地层进入深埋阶段,8#煤层达到历史最大埋深和最高古地温,上古生界煤系烃源岩 R_0 达1.3%^[42];大吉区块中、西部 R_0 大于2.0%,局部甚至超过2.5%^[43],处于强烈热解生气阶段,发育大量热成因气孔。加之盆

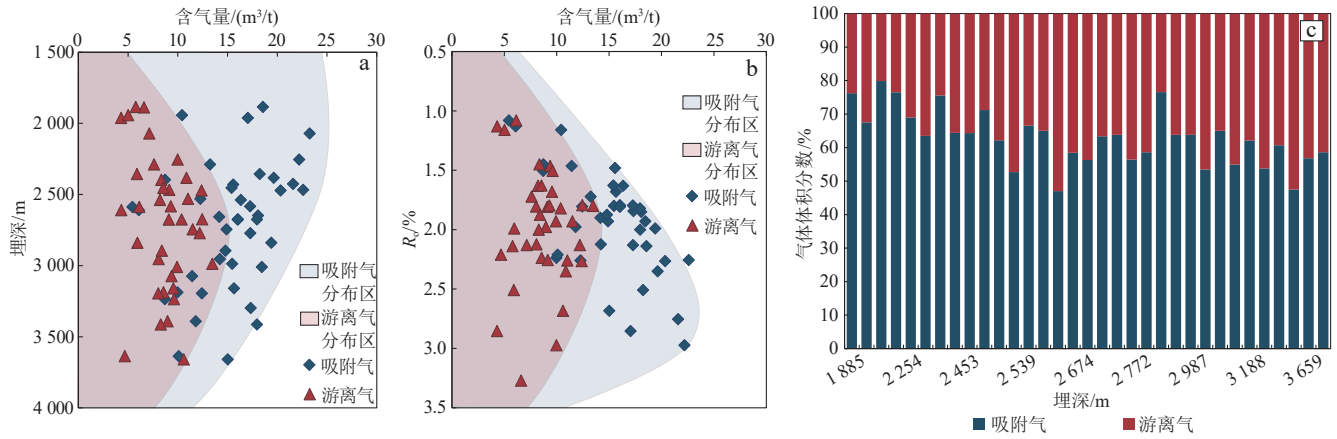


图5 鄂尔多斯盆地中、东部本溪组8#煤层吸附气和游离气含量随埋深(a)和 R_o 的变化关系(b)以及吸附气和游离气相对体积随埋深的变化规律(c)

Fig. 5 Variations of adsorbed gas and free gas contents with burial depth (a) and R_o (b), and variation of the relative ratio of adsorbed gas to free gas with burial depth (c) for the No. 8 coal seam of the Benxi Formation in the central-eastern Ordos Basin (R_o 为镜质体反射率。c图埋深取值依据研究区8#煤层取样测试数据。)

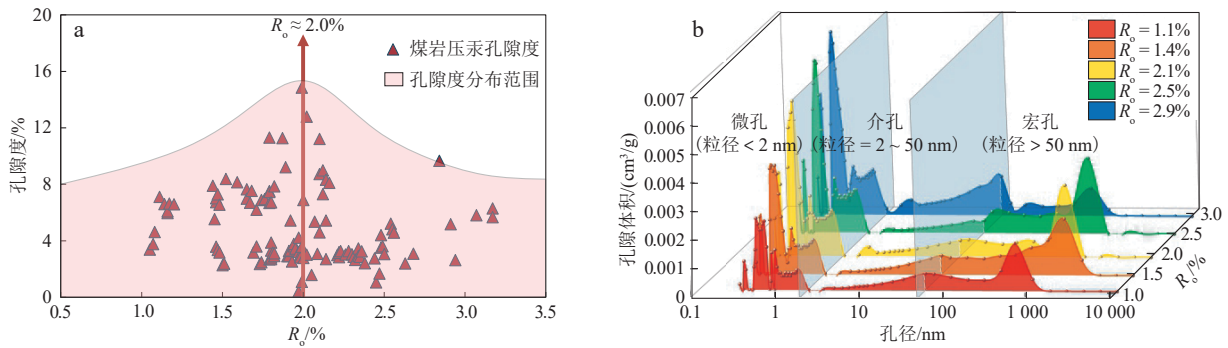


图6 鄂尔多斯盆地中、东部孔隙度和 R_o 的关系(a)以及煤岩热演化过程中不同孔径孔隙体积分布规律(b)

Fig. 6 Relationship between porosity and R_o (a), and distribution patterns of pore volumes with different pore sizes during coal-rock thermal evolution (b) in the central-eastern Ordos Basin (R_o 为镜质体反射率。)

地内部稳定的沉降背景,煤岩所受构造挤压应力较小,有利于气孔的发育和保存,从而形成相对高孔的储集空间。为进一步揭示不同孔径段孔隙体积的演化规律,本文选取研究区本溪组8#煤层中5块不同热演化程度的煤样(R_o 间隔约0.5%),采用二氧化碳吸附、氮气吸附和高压压汞实验联合表征微孔、介孔和宏孔的孔隙体积及其分布特征。由图6b可知,微孔孔隙体积总体呈先显著增加后趋于稳定的趋势;介孔孔隙体积较小,孔隙体积占比仅为3.2%~8.6%;宏孔孔隙体积的变化趋势与游离气含量类似,均呈现先增加后减小的特征,峰值同样出现在 $R_o \approx 2.0\%$ 附近,孔隙体积占比最高可达20.0%,这表明,孔隙度的二次异常高值主要由介孔与宏孔贡献。结合图5b,游离气含量的峰值也出现在 $R_o \approx 2.0\%$ 附近,与煤岩孔隙度二次高值及宏孔孔隙体积的峰值相对应。尽管如此,此时微孔孔隙

体积分仍超过70%,在孔隙体系中占据主导地位。因此,游离气的高体积占比应是孔隙度的二次高峰和其他因素共同耦合控制的结果。

3.3 割理与裂缝的大量发育

本溪组煤岩发育大规模的割理裂隙。一般认为,割理是煤岩中凝胶化物质体积均匀收缩产生的内张力所形成的两组内生裂隙^[44]。沿着煤层面延伸的称为面割理,延伸长度可达数米;垂直于面割理的叫端割理,延伸较短。割理宽度一般为3~40 μm ^[45],但考虑到地下高温、高压条件,实际原地状态下的割理宽度可能小于该值;有学者利用扫描电镜测得煤岩微观割理宽度为0.1~10.0 μm ^[46]。研究区8#煤层中割理普遍发育(图4c),密度介于1~26条/(5 cm),平均值为12条/(5 cm);大部分割理未被充填,仅部分被黏土矿

物、石英和方解石等无机矿物充填。割理连通性较好且呈开启状态,可构成游离气储集与源内运移的有效空间。此外,受外部地应力场及构造环境变动的影响,部分煤基质发育张性微裂缝。裂口多呈不规则锯齿状,缝宽多为微米级,常被黏土矿物或黏土质充填(图4d),裂缝延伸较远,可达肉眼观测级别,也构成了煤岩气重要的渗流通道。

低成熟度褐煤煤质较软、脆性较低,割理密度较小。在向烟煤演化过程中,煤岩脆性增加,割理密度逐渐增大;进入过成熟阶段后,煤体发生石墨化,割理逐渐整体闭合,相关学者称之为割理融退作用^[45]。樊明珠等通过统计太行山山西组煤岩割理密度与煤级的相关性,认为在整个煤岩热演化的过程中,割理密度总体呈正态分布(图7a)^[47]。研究区本溪组8#煤层的 R_o 介于0.9%~3.0%,恰好处于割理密度发育的峰值区间。割理密度高值区对应的 R_o 大多分布在1.5%~2.5%,当 R_o 约为1.9%时,割理密度最高,可达26条/(5 cm)(图7b)。割理密度高值区对应的埋深大约为2 000~3 500 m,在埋深约为2 400 m时达到最大(图7c),这与8#煤层实测含气量最大时的埋深相吻合(图2),也与图5a和图5b中游离气富集对应的 R_o 和埋深相对应,表明割理与煤岩气含量(尤其是游离气含量)具有较强的相关性。关于研究区煤岩中的裂缝发育情况,前人研究表明,8#煤层裂缝被矿物充填较多,裂缝充填率超过50%,充填矿物多为高岭石和方解石等可溶性矿物^[48],

虽然矿物的充填在一定程度上对煤岩气的渗流起负面作用,但在开发过程中使用酸化压裂液仍可以沟通裂缝,打开渗流通道。综合来看,本溪组煤岩中割理裂缝的大量发育为煤岩气提供了丰富的赋存空间和运移通道,这也解释了为何许多煤岩气井呈现出“投产即见气、见气即高产”的规律。

3.4 围岩动力场的保护

根据全油气系统基本原理,储层自上而下可划分为三类动力场。其中,自由动力场储层物性较好,油气成藏动力以浮力为主;局限动力场则以非浮力主导成藏;二者的分界即为BHAD。前人通过物理模拟实验对BHAD进行了表征^[49],在该下限处,油气运移的动力等于阻力[公式(6)]。

$$p_e = p_w + p_c \quad (6)$$

式中: p_e 为气体膨胀力(MPa),是油气运移的动力,与气体压缩因子和地层条件下的天然气密度等因素有关,前人通常采用流体包裹体捕获压力和现今气层压力分别代表成藏时期与现今的气体膨胀力; p_w 为静水压力(MPa), p_c 为毛细管力(MPa),二者均为油气运移的阻力, p_w 与地层水密度和埋深有关, p_c 与气-水界面张力、煤岩润湿性及孔喉半径有关。天然气自源岩生成后向外运移,一旦突破BHAD,气体膨胀力消失,油气便在浮力主导下运移至有效圈闭或构造高点,并在优质盖层的封盖作用下聚集成藏,具备常规气藏的特征。前

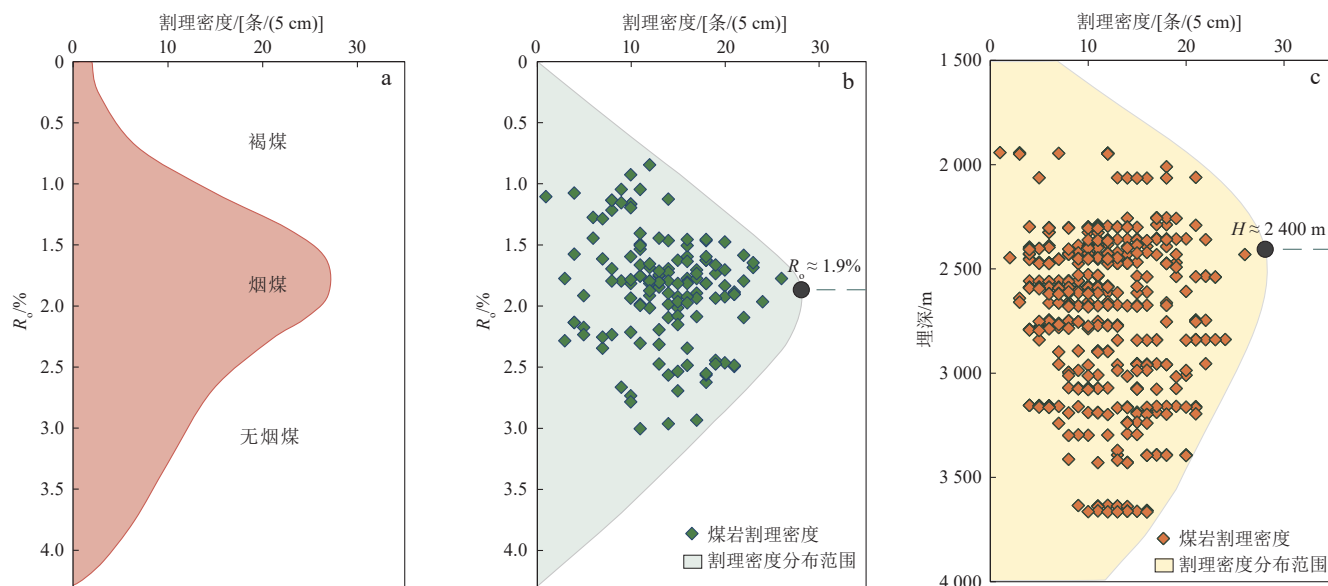


图7 鄂尔多斯盆地中、东部煤岩割理密度随 R_o 及埋深变化关系

Fig. 7 Variations of coal cleat density with R_o and burial depth

a. 割理密度随 R_o 的变化关系(太行山山西组煤岩)^[47]; b. 割理密度随 R_o 的变化关系(研究区8#煤层); c. 割理密度随埋深(H)的变化关系(研究区8#煤层)
(R_o 为镜质体反射率。)

人在计算BHAD时,通常采用某一地区的平均气体膨胀力进行区域化计算和划分^[49],因此具体到单井时存在一定误差。对于较厚的致密砂岩而言,这一误差尚可接受;但研究区8#煤层厚度往往不超过10 m,若仍采用平均化思路划分下限和动力场,数米的误差便可能将煤层划入不同的动力场。为此,本文采用“一井一算”的思路,对各井位的煤岩BHAD分别计算、单独分析,以尽可能降低误差。以研究区内的大吉区块为例,本文选取两口井(DJ65井和DJ56井)进行计算。煤岩润湿角(76.5°)和气-水界面张力(0.045 N/m)均取自相关文献^[50-51],结合8#煤层的埋深和实测储层压力,将相关数值代入公式(6)计算可得:DJ65井8#煤层现今的BHAD为2 558 m,而煤层埋深2 451~2 456 m,位于BHAD之上,处于自由动力场,由浮力主导成藏。煤系地层的围岩多为致密砂岩、泥岩和灰岩,突破压力较大,是良好的盖层。前人已对鄂尔多斯盆地中东部致密砂岩的动力场进行了划分^[52],其BHAD范围为1 350~1 750 m,在8#煤层的埋深范围内,围岩处于局限动力场。因此,自由动力场内的煤岩气受浮力主导向上运移至构造高点,在围岩的封盖作用下聚集成藏,具有常规气藏的性质(图8a)。同时,还存在另一种模

式(图8b)。计算可得,DJ56井8#煤层的BHAD为1 945 m,煤层埋深为2 038~2 044 m,位于BHAD之下,处于局限动力场,依靠自身分子作用力便可实现自封闭成藏,煤岩气可得到有效保存,具有非常规气藏“自生自储”的性质。若遇到割理裂缝,动力平衡被打破,煤岩气满足浮力成藏条件并向上运移。此时,若围岩处于局限动力场,仍可对天然气进行有效封堵;若围岩处于断裂带发育区,则保存条件被破坏,围岩受改造作用转变为自由动力场,不能对煤岩气进行有效封堵。综上所述,煤岩的BHAD随不同井位的深度和压力差异而变化,煤岩所在动力场也并非严格按照碎屑岩层系全油气系统动力场模式呈现浅层自由动力场和深层局限动力场的分布规律,深层煤岩仍然可能处于自由动力场,具有其特殊性。而深部围岩基本处于局限动力场,低孔、低渗,封闭性能良好,有利于煤岩气的保存与富集。

4 深层煤岩气富集有利区预测方法

庞雄奇等(2015)首次提出了“烃源岩-储层相-封盖层-低势区”4类核心功能单元对油气藏形成和分布

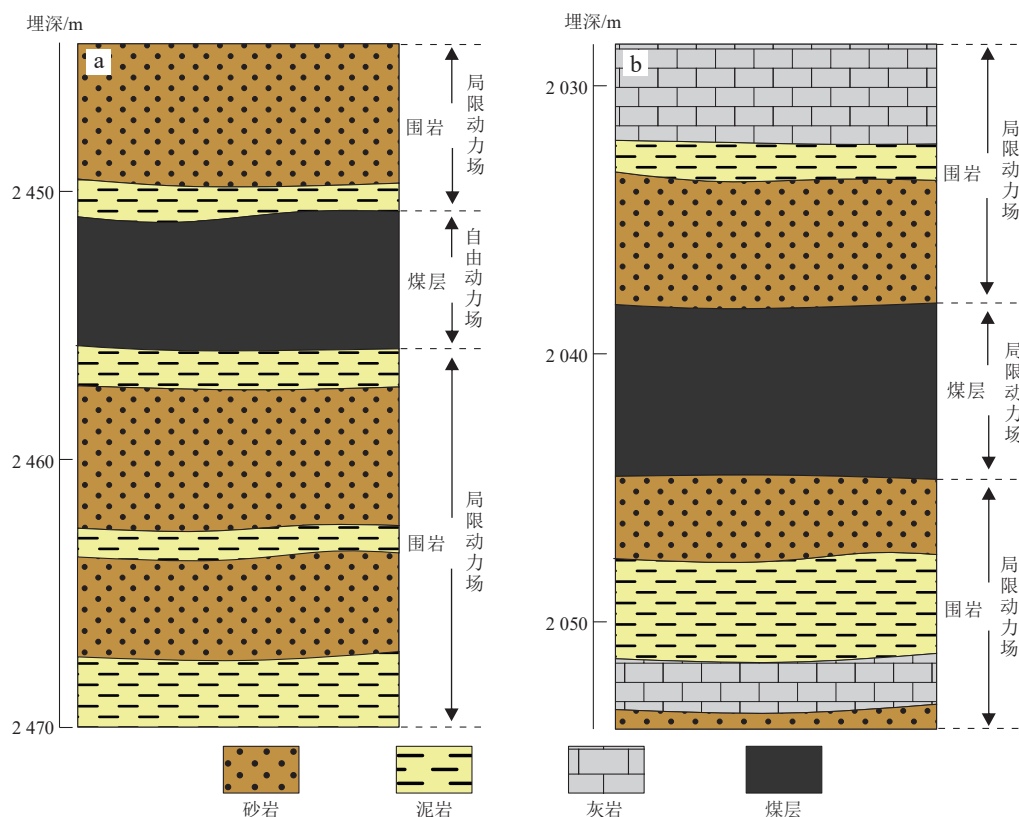


图8 鄂尔多斯盆地中、东部大吉区块DJ65井(a)和DJ56井(b)8#煤层和围岩动力场示意图

Fig. 8 Schematic diagram of the dynamic fields of the No. 8 coal seam and surrounding rocks in wells DJ65 and DJ56, Daji Block, central-eastern Ordos Basin

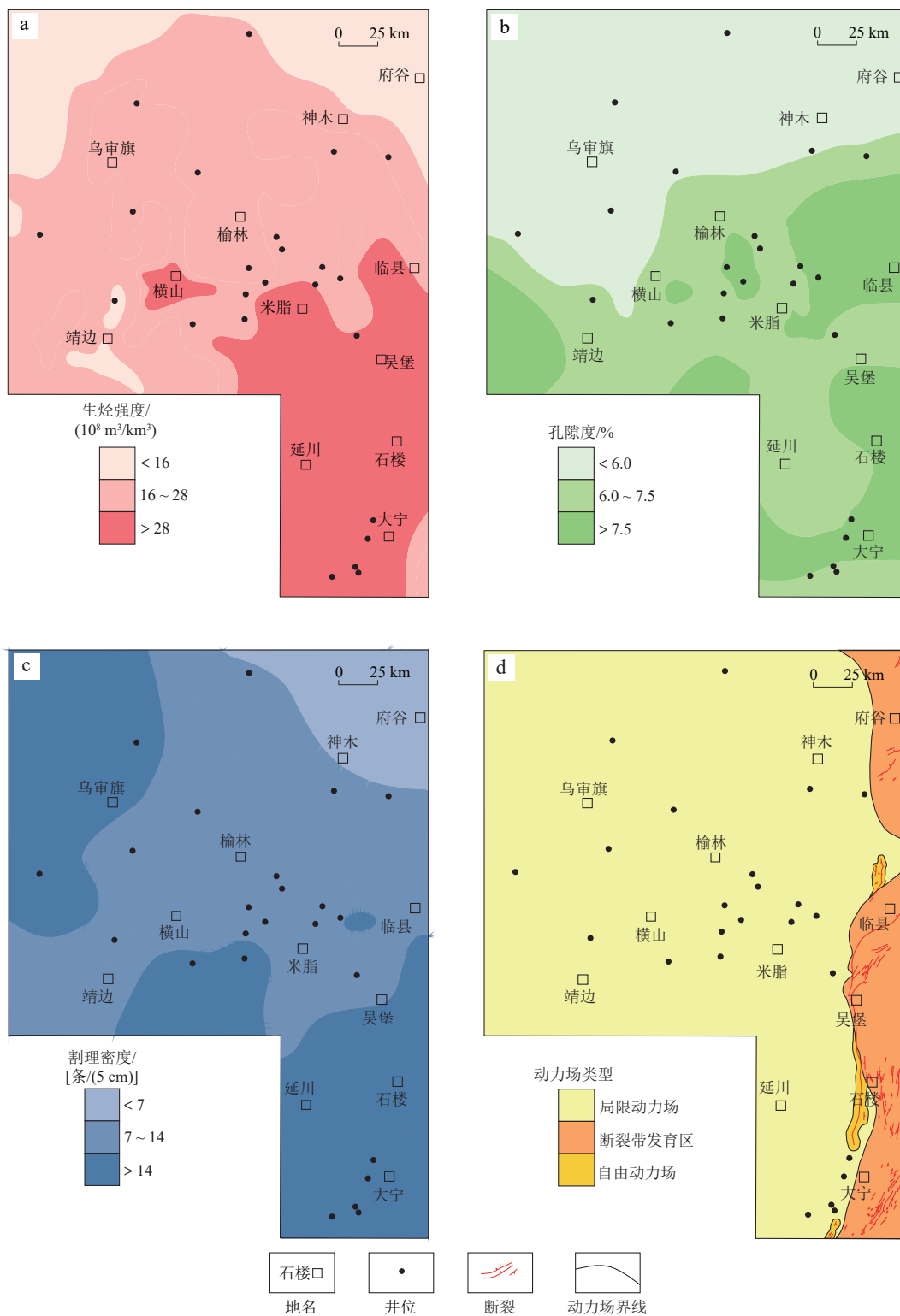


图9 鄂尔多斯盆地中、东部上古生界8#煤岩四要素分级平面分布

Fig. 9 Planar distribution of the grading results of the four key elements in the central-eastern Ordos Basin

a. 生烃强度^[55]; b. 孔隙度; c. 割理密度; d. 动力场^[52]

的控制作用^[53],并基于该理论对渤海湾盆地油气藏有利区进行了预测。结果表明,平面上4类单元的叠加复合控制了90%以上油气藏的形成和分布。孟卫工等将该方法应用于辽河凹陷,发现95%以上已发现的

油气藏均分布于四要素叠合的有利成藏区带内,再次验证方法的可行性^[54]。本次研究中,考虑到煤岩孔隙结构的特殊性,采用割理密度来表征储层内外毛细管力差所反映的势能。基于上述分析,深层煤岩气的富

集是煤岩高生气强度、高孔隙度、割理与裂缝发育以及围岩动力场保护等多因素协同作用的结果。

鄂尔多斯盆地上古生界煤岩的生气强度和围岩动力场划分基于前人研究成果^[52,55],而煤岩孔隙度和割理密度则依据研究区实测数据。综合这四要素,对富气有利区进行预测和评价(图9),并将预测结果按等级划分表示(表2)。将生气强度分成3个等级:小于 $16 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{km}^3$, $(16 \sim 28) \times 10^8 \text{ m}^3/\text{km}^3$ 及大于 $28 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{km}^3$,其控制的煤岩气富集区域主要分布于横山、大宁、石楼、延川以及吴堡地区。煤岩孔隙度同样划分为3个等级:小于6.0%, 6.0% ~ 7.5%及大于7.5%,高值区域主要分布在石楼—大宁一带、临县区域以及靖边西部。煤岩割理密度分成3个等级:小于7条/(5 cm), 7 ~ 21条/(5 cm)及大于21条/(5 cm),高值区域主要位于乌审旗地区、吴堡—石楼—大宁地区以及米

脂—靖边南部地区。围岩局限动力场主要分布于除大宁—石楼—吴堡—临县—府谷一带的中、西部地区。

以上四要素均可划分为优秀、良好和一般3个等级,并分别赋予3,2和1分。在此基础上,于平面上对4类地质富集要素的取值及分布特征进行有效叠合,对各区域进行赋分累加,最终得到研究区煤岩气富集有利区平面分布图(图10a)。其中,赋分 ≥ 11 分的区域划分为Ⅰ类有利区,主要分布于吴堡—石楼—大宁—延川地区,部分分布于米脂、临县和横山等区域;赋分介于9~10分的区域划分为Ⅱ类有利区,主要分布在研究区中部到南部,包括乌审旗—榆林—靖边以南;赋分 ≤ 8 分的区域视为Ⅲ类有利区,主要位于研究区北部。

基于研究区煤层含气量数据,将实测含气量 $\geq 18 \text{ m}^3/\text{t}$ 的井视为煤岩气富集井,利用研究区39口井的

表2 鄂尔多斯盆地中、东部上古生界煤岩四要素分级标准

Table 2 Grading criteria of the four key elements for the Upper Paleozoic coal rocks in the Ordos Basin

级别	生气强度/($10^8 \text{ m}^3/\text{km}^3$)	孔隙度/%	割理密度/[条/(5 cm)]	围岩动力场
优秀	> 28	> 7.5	> 21	局限动力场
良好	16 ~ 28	6.0 ~ 7.5	7 ~ 21	自由动力场
一般	< 16	< 6.0	< 7	

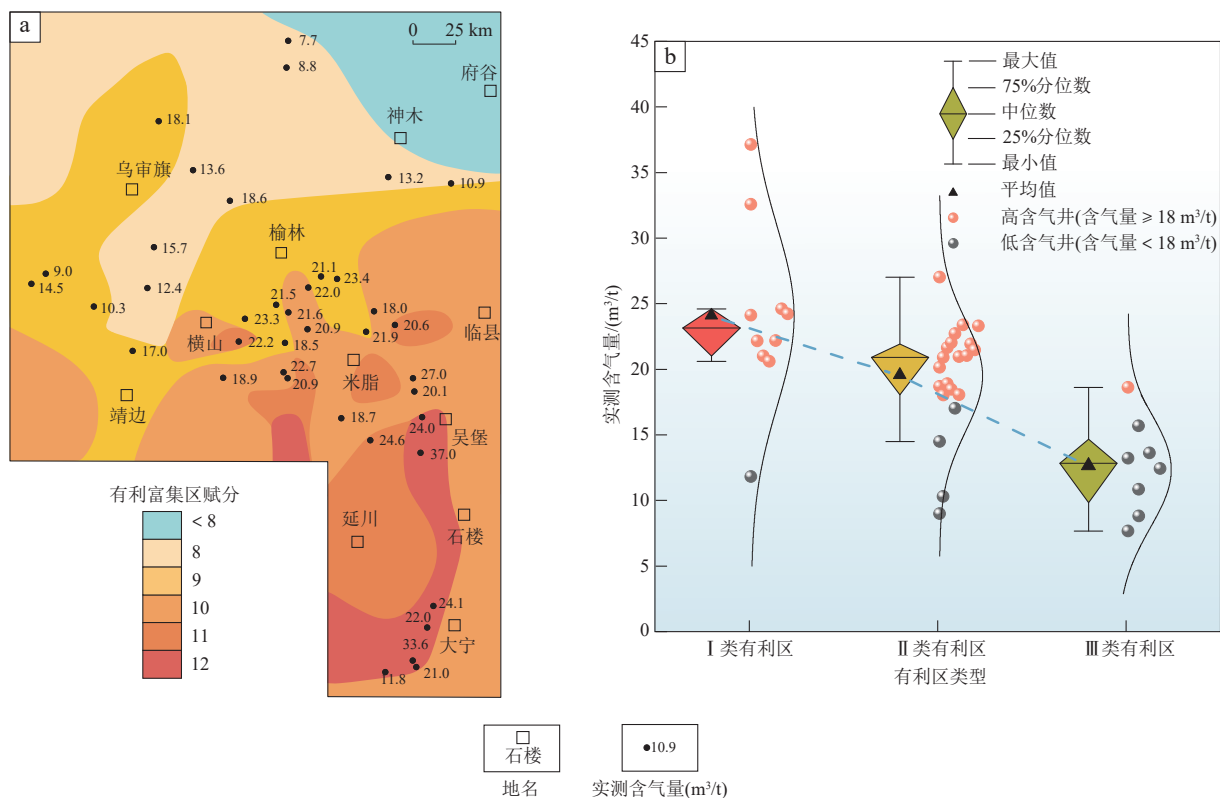


图10 鄂尔多斯盆地中、东部上古生界8#煤层煤岩气富集有利区平面分布(a)与不同有利区实测含气量分布特征(b)

Fig. 10 Planar distribution of favorable areas for coal-rock gas enrichment (a) and validation against measured gas contents in different favorable areas (b) in the central-eastern Ordos Basin

实测含气量数据,对3类有利区进行验证,结果如图10b所示(红色圆点表示高含气井,黑色圆点表示低含气井);由图可知,I类有利区共有10口探井,实测煤岩含气量平均值为 $24.04 \text{ m}^3/\text{t}$,含气量较高,其中9口井含气量 $\geq 18 \text{ m}^3/\text{t}$,为高含气井,占比90.0%;II类有利区共有21口探井,实测煤岩含气量平均值为 $19.50 \text{ m}^3/\text{t}$,其中17口井含气量 $\geq 18 \text{ m}^3/\text{t}$,占比81.0%,次于I类有利区;III类有利区共有8口探井,实测煤岩含气量平均值为 $12.60 \text{ m}^3/\text{t}$,含气量较低,仅有1口井含气量 $\geq 18 \text{ m}^3/\text{t}$,占比仅为12.5%。综合来看,除局部构造引起的含气量差异外,有利区等级越高,煤岩平均含气性越好,同时高含气量井的勘探成功率也随之提高,验证了本研究提出的基于四要素的煤岩气有利区预测方法的准确性。

5 结论

1) 鄂尔多斯盆地中东部本溪组8#煤层煤质良好,镜质组和固定碳含量高,生烃能力强。煤岩含气量较高,介于 $7.7 \sim 27.0 \text{ m}^3/\text{t}$ 。当 R_o 约为2.2%、埋深约为2400 m时,含气量达到最大值。吸附气含量为 $0.84 \sim 27.43 \text{ m}^3/\text{t}$,平均值为 $15.89 \text{ m}^3/\text{t}$;游离气含量为 $1.32 \sim 13.94 \text{ m}^3/\text{t}$,平均值为 $8.08 \text{ m}^3/\text{t}$,体积占比为20.1%~52.9%,平均值为37.1%;在8#煤层埋深范围内,游离气体积占比随深度的增加而升高,增幅超过100%。

2) 煤岩孔隙度在 R_o 约为2.0%时达到二次高峰。盆地稳定的构造背景保留了大量热成因气孔,增加了孔隙空间。随着热演化程度升高,微孔的孔隙体积先显著增加,后趋于稳定;宏孔的孔隙体积先增加后减小,其最大值对应的 R_o 约为2.0%。镜下观测及全孔径表征实验均表明,煤岩孔隙度的二次高峰主要由宏孔贡献,这为游离气提供了更充足的赋存空间。

3) 本溪组8#煤层割理裂隙普遍发育,平均密度为12条/(5 cm),且多数未被充填。随热演化程度增高,割理密度整体呈正态分布,峰值对应的 R_o 约为1.9%、埋深约为2400 m,与煤岩实测含气量最大值对应的临界条件相吻合。尽管煤岩中裂隙充填率较高,但后期可通过酸化压裂打开渗流通道。

4) 基于全油气系统理论,对8#煤层及其围岩所处的动力场进行了划分。结果表明:部分井位的8#煤层处于自由动力场,受浮力主导运移;其围岩处于局限动力场,煤岩气运移至构造高点,并在围岩的封盖作用下聚集成藏。另一些井位的8#煤层和围岩均处于局限动力场,煤岩气依靠自身分子作用力即可实现自封闭成

藏。若是遇到割理裂缝,成藏机制将转变为浮力成藏,此时致密围岩依然能对天然气进行有效封堵。

5) 基于生烃强度、孔隙度、割理裂隙及围岩动力场这四要素,对煤岩气富集有利区进行了预测。结果表明:I类有利区煤岩实测含气量平均值为 $24.04 \text{ m}^3/\text{t}$,高含气井占比90.0%;II类有利区煤岩实测含气量平均值为 $19.50 \text{ m}^3/\text{t}$,高含气井占比81.0%;III类有利区煤岩实测含气量平均值 $12.60 \text{ m}^3/\text{t}$,高含气井占比仅为12.5%。预测的有利区与实际情况相符。

参 考 文 献

- [1] 邹才能,赵群,刘翰林,等. 中国煤岩气突破及意义[J]. 天然气工业, 2025, 45(4): 1-18.
ZOU Caineng, ZHAO Qun, LIU Hanlin, et al. China's breakthrough in coal-rock gas and its significance[J]. Natural Gas Industry, 2025, 45(4): 1-18.
- [2] 李勇,徐凤银,唐书恒,等. 鄂尔多斯盆地煤层(岩)气勘探开发进展及发展方向[J]. 天然气工业, 2024, 44(10): 63-79.
LI Yong, XU Fengyin, TANG Shuheng, et al. Progress and development direction of coalbed methane (coal-rock gas) exploration and development in the Ordos Basin[J]. Natural Gas Industry, 2024, 44(10): 63-79.
- [3] 李国欣,陈瑞银,温志新,等. 全球煤岩气资源潜力与分布[J]. 石油勘探与开发, 2026, 53(1): 14-26.
LI Guoxin, CHEN Ruiyin, WEN Zhixin, et al. Global coal-rock gas resource potential and distribution[J]. Petroleum Exploration and Development, 2026, 53(1): 14-26.
- [4] 张雷,李雪峰,张继坤,等. 鄂尔多斯盆地东缘煤层气产业发展前景、挑战与对策[J]. 天然气工业, 2026, 46(1): 41-51.
ZHANG Lei, LI Xuefeng, ZHANG Jikun, et al. Development progress, challenges, and strategies for CBM/CRG in the eastern margin of the Ordos Basin[J]. Natural Gas Industry, 2026, 46(1): 41-51.
- [5] 李勇,邹才能,王明伟,等. 全球煤层(岩)气形成分布、富集模式及发展前景[J]. 天然气工业, 2026, 46(1): 24-40.
LI Yong, ZOU Caineng, WANG Mingwei, et al. Formation, distribution, enrichment pattern and development prospect of coal-rock gas worldwide[J]. Natural Gas Industry, 2026, 46(1): 24-40.
- [6] 牛小兵,范立勇,闫小雄,等. 鄂尔多斯盆地煤岩气富集条件及资源潜力[J]. 石油勘探与开发, 2024, 51(5): 972-985.
NIU Xiaobing, FAN Liyong, YAN Xiaoxiong, et al. Enrichment conditions and resource potential of coal-rock gas in Ordos Basin, NW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2024, 51(5): 972-985.
- [7] MILKOV A V, ETIOPE G. Revised genetic diagrams for natural gases based on a global dataset of > 20 000 samples[J]. Organic Geochemistry, 2018, 125: 109-120.
- [8] 戴金星. 煤成气及鉴别理论研究进展[J]. 科学通报, 2018, 63(14): 1290-1305, 1290.

- DAI Jinxing. Coal-derived gas theory and its discrimination [J]. Chinese Science Bulletin, 2018, 63(14): 1290–1305, 1290.
- [9] 秦勇, 申建, 王宝文, 等. 深部煤层气成藏效应及其耦合关系 [J]. 石油学报, 2012, 33(1): 48–54.
- QIN Yong, SHEN Jian, WANG Baowen, et al. Accumulation effects and coupling relationship of deep coalbed methane [J]. Acta Petrolei Sinica, 2012, 33(1): 48–54.
- [10] 申建, 秦勇, 傅雪海, 等. 深部煤层气成藏条件特殊性及其临界深度探讨 [J]. 天然气地球科学, 2014, 25(9): 1470–1476.
- SHEN Jian, QIN Yong, FU Xuehai, et al. Properties of deep coalbed methane reservoir-forming conditions and critical depth discussion [J]. Natural Gas Geoscience, 2014, 25(9): 1470–1476.
- [11] 李明瑞, 史云鹤, 范立勇, 等. 鄂尔多斯盆地上古生界本溪组 8# 煤岩煤岩气与致密砂岩气主要气藏特征对比 [J]. 石油与天然气地质, 2024, 45(6): 1590–1604.
- LI Mingrui, SHI Yunhe, FAN Liyong, et al. Comparison of main reservoir characteristics between deep coal-rock gas of the No. 8 coal seam of the Upper Paleozoic Benxi Formation and tight sand gas reservoirs, Ordos Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2024, 45(6): 1590–1604.
- [12] 周立宏, 陈长伟, 韩国猛, 等. 复杂断陷盆地深层煤岩气地质特征、有利成藏因素及发育模式——以渤海湾盆地大港探区为例 [J]. 石油与天然气地质, 2024, 45(6): 1665–1677.
- ZHOU Lihong, CHEN Changwei, HAN Guomeng, et al. Geological characteristics, favorable accumulation factors, and developmental models of deep coal-rock gas in complex fault-bounded basins: A case study of the Dagang exploration area in the Bohai Bay Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2024, 45(6): 1665–1677.
- [13] 李国欣, 张君峰, 赵群, 等. 煤岩气资源评价方法与中国陆上有利区勘探潜力 [J]. 石油勘探与开发, 2025, 52(6): 1231–1245.
- LI Guoxin, ZHANG Junfeng, ZHAO Qun, et al. Evaluation methodology of coal-rock gas resources and exploration potential of favorable areas in onshore China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2025, 52(6): 1231–1245.
- [14] 赵振宇, 郭彦如, 王艳, 等. 鄂尔多斯盆地构造演化及古地理特征研究进展 [J]. 特种油气藏, 2012, 19(5): 15–20.
- ZHAO Zhenyu, GUO Yanru, WANG Yan, et al. Study progress in tectonic evolution and paleogeography of Ordos Basin [J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2012, 19(5): 15–20.
- [15] 杨华, 付金华, 刘新社, 等. 鄂尔多斯盆地上古生界致密气成藏条件与勘探开发 [J]. 石油勘探与开发, 2012, 39(3): 295–303.
- YANG Hua, FU Jinhua, LIU Xinshe, et al. Accumulation conditions and exploration and development of tight gas in the Upper Paleozoic of the Ordos Basin [J]. Petroleum Exploration and Development, 2012, 39(3): 295–303.
- [16] 接铭训. 鄂尔多斯盆地东缘煤层气勘探开发前景 [J]. 天然气工业, 2010, 30(6): 1–6.
- JIE Mingxun. Prospects in coalbed methane gas exploration and production in the eastern Ordos Basin [J]. Natural Gas Industry, 2010, 30(6): 1–6.
- [17] 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.
- [18] 郭艳琴, 李文厚, 郭彬程, 等. 鄂尔多斯盆地沉积体系与古地理演化 [J]. 古地理学报, 2019, 21(2): 293–320.
- GUO Yanqin, LI Wenhui, GUO Bincheng, et al. Sedimentary systems and palaeogeography evolution of Ordos Basin [J]. Journal of Palaeogeography (Chinese Edition), 2019, 21(2): 293–320.
- [19] ZHANG Rui, LIU Shimin. Experimental and theoretical characterization of methane and CO₂ sorption hysteresis in coals based on Langmuir desorption [J]. International Journal of Coal Geology, 2017, 171: 49–60.
- [20] 李勇, 高爽, 吴鹏, 等. 深部煤层气游离气含量预测模型评价与校正——以鄂尔多斯盆地东缘深部煤层为例 [J]. 石油学报, 2023, 44(11): 1892–1902.
- LI Yong, GAO Shuang, WU Peng, et al. Evaluation and correction of prediction model for free gas content in deep coalbed methane: A case study of deep coal seams in the eastern margin of Ordos Basin [J]. Acta Petrolei Sinica, 2023, 44(11): 1892–1902.
- [21] 贾承造, 庞雄奇, 宋岩. 论非常规油气成藏机理: 油气自封闭作用与分子间作用力 [J]. 石油勘探与开发, 2021, 48(3): 437–452.
- JIA Chengzao, PANG Xiongqi, SONG Yan. The mechanism of unconventional hydrocarbon formation: Hydrocarbon self-containment and intermolecular forces [J]. Petroleum Exploration and Development, 2021, 48(3): 437–452.
- [22] JIA Chengzao, PANG Xiongqi, SONG Yan. Whole petroleum system and ordered distribution pattern of conventional and unconventional oil and gas reservoirs [J]. Petroleum Science, 2023, 20(1): 1–19.
- [23] PANG Xiongqi, JIA Chengzao, WANG Wenyang, et al. Buoyance-driven hydrocarbon accumulation depth and its implication for unconventional resource prediction [J]. Geoscience Frontiers, 2021, 12(4): 101133.
- [24] PANG Xiongqi, HU Tao, LARTER S, et al. Hydrocarbon accumulation depth limit and implications for potential resources prediction [J]. Gondwana Research, 2022, 103: 389–400.
- [25] PANG Xiongqi, JIA Chengzao, ZHANG Kun, et al. The dead line for oil and gas and implication for fossil resource prediction [J]. Earth System Science Data, 2020, 12(1): 577–590.
- [26] PANG Xiongqi, LIU Keyu, MA Zhongzhen, et al. Dynamic field division of hydrocarbon migration, accumulation and hydrocarbon enrichment rules in sedimentary basins [J]. Acta Geologica Sinica-English Edition, 2012, 86(6): 1559–1592.

- [27] 郭旭升, 黄仁春, 张殿伟, 等. 四川盆地海相碳酸盐岩全油气系统成藏特征与有序分布规律[J]. 石油勘探与开发, 2024, 51(4): 743-758.
- GUO Xusheng, HUANG Renchun, ZHANG Dianwei, et al. Hydrocarbon accumulation and orderly distribution of whole petroleum system in marine carbonate rocks of Sichuan Basin, SW China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2024, 51(4): 743-758.
- [28] 贾承造, 姜林, 赵文. 全油气系统中的致密油气: 成藏机理、富集规律与资源前景[J]. 石油学报, 2025, 46(1): 1-16, 47.
- JIA Chengzao, JIANG Lin, ZHAO Wen. Tight oil and gas in Whole Petroleum System: Accumulation mechanism, enrichment regularity, and resource prospect [J]. Acta Petrolei Sinica, 2025, 46(1): 1-16, 47.
- [29] 庞雄奇, 贾承造, 徐帆, 等. 全油气系统理论在全球天然气水合物资源评价中的应用[J]. 石油勘探与开发, 2025, 52(2): 267-278.
- PANG Xiongqi, JIA Chengzao, XU Zhi, et al. Application of the whole petroleum system in the evaluation of the global natural gas hydrate resource [J]. Petroleum Exploration and Development, 2025, 52(2): 267-278.
- [30] PANG Xiongqi. Quantitative evaluation of the whole petroleum system: hydrocarbon thresholds and their application [M]. Singapore: Springer, 2023.
- [31] 支东明, 李建忠, 杨帆, 等. 吐哈盆地台北凹陷侏罗系煤系全油气系统特征[J]. 石油勘探与开发, 2024, 51(3): 453-466.
- ZHI Dongming, LI Jianzhong, YANG Fan, et al. Whole petroleum system in Jurassic coal measures of Taibei Sag in Tuha Basin, NW China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2024, 51(3): 453-466.
- [32] 李国欣, 贾承造, 赵群, 等. 煤岩气成藏机理与煤系全油气系统[J]. 石油勘探与开发, 2025, 52(1): 29-43.
- LI Guoxin, JIA Chengzao, ZHAO Qun, et al. Coal-rock gas accumulation mechanism and the whole petroleum system of coal measures [J]. Petroleum Exploration and Development, 2025, 52(1): 29-43.
- [33] 丁蓉, 庞雄奇, 贾承造, 等. 基于全油气系统理论评价深部煤层气的方法原理和研究实例[J]. 石油学报, 2025, 46(3): 532-546.
- DING Rong, PANG Xiongqi, JIA Chengzao, et al. Methods, principles and case study of evaluating deep coalbed methane based on Whole Petroleum System theory [J]. Acta Petrolei Sinica, 2025, 46(3): 532-546.
- [34] 周立宏, 闫霞, 熊先钺, 等. 深部煤层气超临界状态下赋存特征及分配规律[J]. 煤炭科学技术, 2025, 53(3): 73-90.
- ZHOU Lihong, YAN Xia, XIONG Xianyue, et al. Characteristics of occurrence and distribution rule of deep coalbed methane in supercritical state [J]. Coal Science and Technology, 2025, 53(3): 73-90.
- [35] 刘大锰, 姚艳斌, 蔡益栋, 等. 华北石炭-二叠系煤的孔渗特征及主控因素[J]. 现代地质, 2010, 24(6): 1198-1203.
- LIU Dameng, YAO Yanbin, CAI Yidong, et al. Characteristics of porosity and permeability and their geological control of Permian-Carboniferous coals in North China [J]. Geoscience, 2010, 24(6): 1198-1203.
- [36] SHAO Pei, WANG Xiao, SONG Yu, et al. Study on the characteristics of matrix compressibility and its influence factors for different rank coals [J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2018, 56: 93-106.
- [37] 李勇. 煤结构演化及燃料、原料和材料属性开发[J]. 煤炭学报, 2022, 47(11): 3936-3951.
- LI Yong. Coal structure evolution and its fuel, raw material and functional material properties development [J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(11): 3936-3951.
- [38] 黄道军, 周国晓, 杨兆彪, 等. 鄂尔多斯盆地深部煤岩气井产出气-水地球化学特征及其地质响应[J]. 石油与天然气地质, 2024, 45(6): 1617-1627.
- HUANG Daojun, ZHOU Guoxiao, YANG Zhaobiao, et al. Geochemical characterization of gas-water output from deep coalrock methane wells in the Ordos Basin and its geological responses [J]. Oil & Gas Geology, 2024, 45(6): 1617-1627.
- [39] 侯雨庭, 喻健, 张春雨, 等. 鄂尔多斯盆地石炭系本溪组深部煤层气富集地质特征及勘探前景[J]. 石油学报, 2025, 46(5): 857-874.
- HOU Yuting, YU Jian, ZHANG Chunyu, et al. Geological characteristics and exploration prospects of deep coalbed methane enriched in Carboniferous Benxi Formation, Ordos Basin [J]. Acta Petrolei Sinica, 2025, 46(5): 857-874.
- [40] HE Xueqiu, LIU Xianfeng, NIE Baisheng, et al. FTIR and Raman spectroscopy characterization of functional groups in various rank coals [J]. Fuel, 2017, 206: 555-563.
- [41] 任战利, 祁凯, 刘润川, 等. 鄂尔多斯盆地早白垩世构造热事件形成动力学背景及其对油气等多种矿产成藏(矿)期的控制作用[J]. 岩石学报, 2020, 36(4): 1213-1234.
- REN Zhanli, QI Kai, LIU Runchuan, et al. Dynamic background of Early Cretaceous tectonic thermal events and its control on various mineral accumulations such as oil and gas in the Ordos Basin [J]. Acta Petrologica Sinica, 2020, 36(4): 1213-1234.
- [42] 任战利, 祁凯, 李进步, 等. 鄂尔多斯盆地热动力演化史及其对油气成藏与富集的控制作用[J]. 石油与天然气地质, 2021, 42(5): 1030-1042.
- REN Zhanli, QI Kai, LI Jinbu, et al. Thermodynamic evolution and hydrocarbon accumulation in the Ordos Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2021, 42(5): 1030-1042.
- [43] 周立宏, 李勇, 丁蓉, 等. 煤层(岩)气“同生异构”控藏特征及开发实践——以鄂尔多斯盆地大西区块石炭系本溪组8号煤为例[J]. 石油勘探与开发, 2025, 52(4): 772-781.
- ZHOU Lihong, LI Yong, DING Rong, et al. Differential accumulation characteristics and production of coalbed methane/coal-rock gas: A case study of the No. 8 coal seam of the Carboniferous Benxi Formation in the Daji block, Ordos Basin, NW China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2025, 52(4): 772-781.
- [44] 贾建称, 张泓, 贾茜, 等. 煤储层割理系统研究: 现状与展望

- [J]. 天然气地球科学, 2015, 26(9): 1621-1628.
- JIA Jianchen, ZHANG Hong, JIA Qian, et al. Status and prospect: study on the cleat system in coal reservoir[J]. Natural Gas Geoscience, 2015, 26(9): 1621-1628.
- [45] LAUBACH S E, MARRETT R A, OLSON J E, et al. Characteristics and origins of coal cleat: a review [J]. International Journal of Coal Geology, 1998, 35(1/4): 175-207.
- [46] 王青, 田冲, 罗超, 等. 四川盆地遂宁—合江地区二叠系龙潭组煤岩气储层特征及勘探前景[J]. 岩性油气藏, 2025, 37(4): 26-37.
- WANG Qing, TIAN Chong, LUO Chao, et al. Characteristics and exploration prospects of coal-rock gas reservoirs in Permian Longtan Formation in Suining-Hejiang area, Sichuan Basin [J]. Lithologic Reservoirs, 2025, 37(4): 26-37.
- [47] 樊明珠, 王树华. 煤层气勘探开发中的割理研究[J]. 煤田地质与勘探, 1997, 25(1): 29-32.
- FAN Mingzhu, WANG Shuhua. Study on the cleats in coalbed methane development[J]. Coal Geology & Exploration, 1997, 25(1): 29-32.
- [48] 田丰华, 李小刚, 朱文涛, 等. 大宁—吉县区块8号煤裂缝三维特征评价及压裂段优选[J]. 能源与环保, 2023, 45(9): 88-95.
- TIAN Fenghua, LI Xiaogang, ZHU Wentao, et al. Evaluation of 3D characteristics and optimization of fracturing sections for No. 8 coal seam crack in Daning-Ji County block[J]. China Energy and Environmental Protection, 2023, 45(9): 88-95.
- [49] GUO Yingchun, PANG Xiongqi, LI Zongxing, et al. The critical buoyancy threshold for tight sandstone gas entrapment: Physical simulation, interpretation, and implications to the Upper Paleozoic Ordos Basin [J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2017, 149: 88-97.
- [50] 黄维刚, 胡夫, 刘楠琴. 表面活性剂对煤尘湿润性能的影响研究[J]. 矿业安全与环保, 2010, 37(3): 4-6, 10.
- HUANG Weigang, HU Fu, LIU Nanqin. Study on surfactant wettability for coal dust [J]. Mining Safety & Environmental Protection, 2010, 37(3): 4-6, 10.
- [51] 侯伟, 徐凤银, 张雷, 等. 煤岩类型对煤储层吸附/解吸特征影响及实践意义——以保德区块为例[J]. 煤田地质与勘探, 2022, 50(3): 110-118.
- HOU Wei, XU Fengyin, ZHANG Lei, et al. Influence of coal lithotypes on adsorption/desorption characteristics in coal reservoirs and its practical significance: A case study in Baode Block[J]. Coal Geology & Exploration, 2022, 50(3): 110-118.
- [52] 张子英, 田文广, 庞雄奇, 等. 鄂尔多斯盆地中东部地区上古生界油气动力场临界条件[J]. 天然气地球科学, 2026, 37(4): 687-704.
- ZHANG Ziyang, TIAN Wenguang, PANG Xiongqi, et al. The critical conditions of Upper-Paleozoic hydrocarbon dynamic field in the central and eastern Ordos Basin [J]. Natural Gas Geoscience, 2026, 37(4): 687-704.
- [53] 庞雄奇, 朱伟林, 吕修祥, 等. 渤海湾盆地东部油气门限控藏研究与有利成藏区预测评价[J]. 石油学报, 2015, 36(增刊2): 1-18.
- PANG Xiongqi, ZHU Weilin, LYU Xiuxiang, et al. A study on hydrocarbon thresholds controlling reservoir accumulation and predictive evaluation of favorable accumulation areas in eastern Bohai Bay Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2015, 36(S2): 1-18.
- [54] 孟卫工, 庞雄奇, 李晓光, 等. 辽河坳陷油气分布门限与有利成藏区带预测评价[J]. 石油学报, 2015, 36(增刊2): 36-50, 59.
- MENG Weigong, PANG Xiongqi, LI Xiaoguang, et al. Reservoir distribution threshold and prediction of favorable hydrocarbon accumulation zones in Liaohe Depression [J]. Acta Petrolei Sinica, 2015, 36(S2): 36-50, 59.
- [55] 赵丹枫. 鄂尔多斯盆地东部上古生界致密砂岩气藏成藏特征研究[D]. 西安: 西安石油大学, 2013.
- ZHAO Danfeng. The accumulation characteristics of tight gas reservoirs in the Upper Palaeozoic of eastern Ordos Basin[D]. Xi'an: Xi'an Shiyou University, 2013.

(编辑 刘格云)