



鄂尔多斯盆地本溪组煤岩气含气性主控因素及其实践意义

邓泽 赵群 范立勇 黄道军 丁蓉 曹毅民 李珮杰 高向东

引用本文:

邓泽, 赵群, 范立勇, 等. 鄂尔多斯盆地本溪组煤岩气含气性主控因素及其实践意义[J]. 煤炭科学技术, 2025, 53(S1): 233–251.

DENG Ze, ZHAO Qun, FAN Liyong. Key controlling factors of coal-rock gas of Benxi Formation in Ordos Basin and its practical significance[J]. Coal Science and Technology, 2025, 53(S1): 233–251.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12438/cst.2025-0236>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

鄂尔多斯盆地深部8号煤储层孔隙发育模式及其控气作用

Pore development patterns and gas control effects of No.8 deep coal seam of Ordos Basin

煤炭科学技术. 2025, 53(3): 115–123 <https://doi.org/10.12438/cst.2025-0088>

鄂尔多斯盆地深部煤层气差异富集的地质控制

Geological control of differential enrichment of deep coalbed methane in the Ordos Basin

煤炭科学技术. 2025, 53(1): 203–215 <https://doi.org/10.12438/cst.2024-1144>

基于机器学习的煤系致密砂岩气储层分类研究——以鄂尔多斯盆地 D J 区块为例

Research on classification of tight sandstone gas reservoir in coal measures based on machine learning: a case from DJ Block of Ordos Basin

煤炭科学技术. 2022, 50(6): 260–270 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/943e02b6-b1a4-4185-8eb5-efebbb019fa3>

鄂尔多斯盆地石炭—二叠纪太原组煤中稀土元素地球化学特征

Geochemistry characteristics of rare earth elements in the permo-carboniferous Taiyuan Formation coal in Ordos Basin—Taking Ningdong coalfield as an example

煤炭科学技术. 2024, 52(12): 239–246 <https://doi.org/10.12438/cst.2023-1726>

煤中硫分布特征及其沉积成因研究——以鄂尔多斯盆地榆横矿区南区为例

Study on distribution characteristics and sedimentary genesis of sulfur in coal: taking southern Yuheng Mining Area of Ordos Basin as a case

煤炭科学技术. 2020, 48(8): 200–209 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/3f1774d3-3322-4815-9ffd-1243a1760b65>

济源盆地上三叠统谭庄组油页岩段构造裂缝特征及主控因素分析

Characteristics and main factors controlling development of tectonic fractures in oil-shale member of Upper Triassic Tanzhuang Formation in Jiyuan Basin

煤炭科学技术. 2022, 50(7): 206–215 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/d8211030-076e-48f8-8de5-dd8fef632ff5>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息



移动扫码阅读

邓泽, 赵群, 范立勇, 等. 鄂尔多斯盆地本溪组煤岩气含气性主控因素及其实践意义[J]. 煤炭科学技术, 2025, 53(S1): 233–251.

DENG Ze, ZHAO Qun, FAN Liyong, *et al.* Key controlling factors of coal-rock gas of Benxi Formation in Ordos Basin and its practical significance[J]. Coal Science and Technology, 2025, 53(S1): 233–251.

鄂尔多斯盆地本溪组煤岩气含气性主控因素及其实践意义

邓泽^{1,2}, 赵群^{1,2}, 范立勇³, 黄道军³, 丁蓉⁴, 曹毅民⁴, 李珮杰⁵, 高向东⁶

(1. 中国石油勘探开发研究院, 北京 100083; 2. 中国石油集团煤岩气重点实验室, 北京 100083; 3. 中国石油长庆油田分公司勘探开发研究院, 陕西西安 710018; 4. 中石油煤层气有限责任公司, 北京 100028; 5. 中国石油冀东油田分公司, 河北唐山 063000; 6. 东华理工大学地球科学学院, 江西南昌 330013)

摘要:鄂尔多斯盆地煤岩气资源丰富, 多个区块勘探开发取得重大突破, 然而煤岩气的含气性主控因素尚未明确, 制约整体勘探开发进程。基于含气量、煤岩煤质、煤岩地化、孔隙结构等大量实测资料, 系统分析了本溪组煤岩气地质条件, 厘定了含气性主控因素, 并开展了煤岩气资源条件分区评价。研究表明: 沉积、煤阶、埋深奠定了深层煤岩含气量的整体格局。① 沉积环境制约着煤岩生烃物质基础(包括煤层厚度、煤层结构及煤岩煤质)、煤岩气原始赋存空间及保存条件的平面分布。成煤环境演化则决定了煤岩煤质的纵向差异分布, 进而影响含气量的纵向非均质性。② 煤阶不仅控制了煤岩生气强度, 还通过影响孔裂隙结构从而影响煤岩气的赋存空间及储集性能。随着变质程度提高, 煤岩的吸附性能得到了强化。③ 现今埋深主要影响吸附气和游离气的比例, 常压储层在临界深度以下, 随着埋深的增加, 游离气的比例有所增加, 3 000 m 以深总气量呈减小趋势。④ 微幅构造对发育于缓坡带的煤岩气起到了局部富气的作用。⑤ 综合考虑生、储、保有利条件, 明确了盆地煤岩气富集带为榆林到宜川的南北条带, 平均含气量高达 23 cm³/g。⑥ 依据煤岩气的内涵及含气性主控因素, 结合煤层展布, 构建了煤岩气资源条件评价体系, 将盆地本溪组煤岩划分为 4 大类 13 个小区, I 类区主要分布在榆林地区、大宁—吉县地区和延安地区, II 类区主要分布在乌审旗一带。研究成果以期对鄂尔多斯盆地煤岩气有序勘探开发提供借鉴与参考。

关键词: 煤岩气; 主控因素; 资源条件; 本溪组; 鄂尔多斯盆地

中图分类号: TE122

文献标志码: A

文章编号: 0253-2336(2025)S1-0233-19

Key controlling factors of coal-rock gas of Benxi Formation in Ordos Basin and its practical significance

DENG Ze^{1,2}, ZHAO Qun^{1,2}, FAN Liyong³, HUANG Daojun³, DING Rong⁴,
CAO Yimin⁴, LI Peijie⁵, GAO Xiangdong⁶

(1. PetroChina Research Institute of Petroleum Exploration & Development, Beijing 100083, China; 2. CNPC Key Laboratory of Coal Gas, Beijing 100083, China; 3. Research Institute of Exploration and Development, PetroChina Changqing Oilfield Company, Xi'an 710018, China; 4. PetroChina Coalbed Methane Company Limited, Beijing 100028, China; 5. Jidong Oilfield Company, PetroChina, Tangshan 063000, China; 6. School of Earth Science, East China University of Technology, Nanchang 330013, China)

Abstract: The Ordos Basin is rich in coal-rock gas resources, and significant breakthroughs have been made in exploration and development in many blocks. However, the key controlling factors for the gas content of coal have not yet been clarified, which restricts the overall exploration and development process. Based on a large amount of measured data such as gas content, coal rock and coal quality, coal geochemistry, and pore structure, the geological conditions of coal-rock gas in Benxi Formation were systematically analyzed, the main controlling factors of gas content were determined, and the coal-rock gas resource conditions were evaluated by zoning. The results show

收稿日期: 2025-02-24

责任编辑: 朱恩光

DOI: 10.12438/cst.2025-0236

基金项目: 中国石油科技资助项目(2024DJ23; 2023ZZ18); 中国石油长庆油田公司关键核心技术攻关资助项目(2023DZZ01)

作者简介: 邓泽(1982—), 男, 高级工程师。E-mail: dengze@petrochina.com.cn

通讯作者: 高向东(1988—), 男, 讲师, 博士。E-mail: gaoxid@ecut.edu.cn

that sedimentation, coal rank and buried depth have laid the overall pattern of gas content of coal. ① The sedimentary environment restricts the hydrocarbon material base (including coal seam thickness, coal seam structure and coal quality), the original occurrence space of coal-rock gas and the plane distribution of preservation conditions. The evolution of coal-forming environment determines the longitudinal difference distribution of coal quality, which in turn creates the longitudinal heterogeneity of gas content. ② Coal rank not only controls the gas generation intensity of coal, but also affects the occurrence space and reservoir performance of coal-rock gas by affecting the pore structure, and the adsorption performance of coal is strengthened with the increase of metamorphism. ③ The burial depth mainly affects the proportion of adsorbed gas and free gas, and below the critical depth, with the increase of burial depth, the proportion of free gas increases, and the total gas volume decreases after the depth exceeds 3000m. ④ The micro-amplitude structure plays a role in local gas enrichment in the development and gentle slope zone. ⑤ Taking into account the favorable conditions for hydrocarbon generation, storage, and preservation, coal-rock gas enrichment zone is clearly defined as the north-south strip from Yulin to Yichuan, with an average gas content of up to $23 \text{ cm}^3/\text{g}$. ⑥ According to the connotation and key control factors of coal-rock gas, combined with the distribution of coal seams, the evaluation system of coal-rock gas resource conditions was constructed, and the coal seam of Benxi Formation in the basin were divided into 4 categories and 13 communities. The class I area was mainly distributed in Yulin area, Daning-Jixian area, and Yanan area, and the class II area was mainly distributed in Wushenqi area. The research results are expected to provide reference and guidance for the orderly exploration and development of coal-rock gas in the Ordos Basin.

Key words: coal-rock gas; key control factors; resource conditions; Benxi Formation; Ordos Basin

0 引言

在“绿色低碳”战略目标驱动下,持续开展煤层气的勘探开发是保障国家能源安全的现实需求^[1]。以往,我国煤层气的规模开发主要集中在浅层(埋深一般小于 1 200 m),深层“三高一低”(高温、高压、高地应力、低渗透率)的储层环境令大家望而却步,1 500 m 以深甚至成为了煤层气勘探开发的禁区^[2-4]。近年来,随着中石油在白家海凸起(彩探 1H 井日产气 $5.7 \times 10^4 \text{ m}^3$)、大宁—吉县区块(吉深 6-7 平 01 井日产气 $10.1 \times 10^4 \text{ m}^3$)、中海油在临兴区块(深煤 1 井日产气 $6.0 \times 10^4 \text{ m}^3$)、中石化在大牛地区块(阳煤 1HF 井日产气量达到 $8.5 \times 10^4 \text{ m}^3$)等深层煤岩天然气的勘探突破,极大地提升了对其商业化开发的信心^[5-8]。

尽管深层煤岩天然气具有很大的开发潜力,但也面临诸多理论和技术挑战。高含气量、高含气饱和度、存在游离气是勘探开发深层煤岩天然气的主要动力,但其成因机制、成藏机理尚不明确。关于深层煤岩天然气富集成藏理论的探讨一直在进行,秦勇、申建等^[9-11]从吸附性能、地应力状态、温压场耦合下的物理性质 3 个方面阐释了深层煤岩天然气成藏效应的特殊性,深化了深层煤岩天然气“临界深度”的概念,并以此展开理论研究,旨在解决深层煤岩天然气的界定标准。后续学者从资源条件(含气量、资源量、资源丰度)^[12,13]、物性条件(孔裂隙结构、渗透性)^[14,15]、可改造性条件(煤体结构、力学性质、地应力状态)^[16]等方面丰富了深层煤岩天然气的内涵,并从煤系气共采兼容角度扩充了深层煤岩天然气的资源价值^[17,18]。近年来,面向深层煤岩天然气高效开发

的富集成藏规律研究,有效推动了其成藏理论进展。徐凤银等^[2]提出深层煤储层具有“广覆式生烃、毯式成藏”特征;贾承造等^[19]总结了基于自封闭作用和分子间作用力的深层煤岩天然气成藏机理;康永尚等^[20]提出了高饱和—超饱和深层煤岩天然气形成条件及成藏模式;孙粉锦等^[21]提出了煤层气系统的基本概念,并以鄂尔多斯盆地石炭—二叠系煤层为例,分析了煤层气系统在空间上的展布规律。闫霞等^[22]通过微构造剖析指出平缓构造区和正向微幅构造区是鄂东深层煤岩天然气的勘探方向;何发岐等^[23]指出岩性圈闭是深层煤储层游离气保存的主控因素,并指出深层煤岩天然气动用思路应由“排水减压”向“排气降压”转变。随着勘探开发实践的不断深入,大家逐渐明确深层煤岩天然气具有高含气量、高含气饱和度、存在游离气等储层特征;具有微距运移、圈闭富气的常规气藏属性;具有开井即见气、不依赖于排水降压的产出特征。这些特性决定了深层煤岩天然气有别于浅层煤层气,部分学者将其命名为煤岩气,并给出了明确的定义,又对煤岩气的内涵、地质特征及富集机理开展了广泛的讨论^[24-26]。笔者所述的煤岩气概念主要借鉴文献^[24]的内涵解读。目前,煤岩气含气性的关键控制因素、时空演化特征及其富集成藏规律等认识不清,制约着煤岩气的高效有序开发。

以鄂尔多斯盆地本溪组 8 号煤为研究对象,通过对煤岩气生、储、保、富条件的系统分析,揭示煤岩气含气性的主控因素,明确其赋存机制及成藏规律,构建煤岩气资源条件评价体系,并进行分区评价。针对不同分区提出相应的勘探开发建议,以期为煤

岩气的资源估算、选区评价及高效开发提供科学依据。

1 煤岩煤质及含气量特征

鄂尔多斯盆地上古生界本溪组 8 号煤层与构造相适应，整体呈西倾的单斜构造，东缘煤层倾角大，向西逐渐平缓，倾角为 1°左右。煤层自东向西从出露地表到埋深 4 000 多米，埋深跨度大^[27,28]。8 号煤层发育在本溪组顶部，沉积环境为海陆过渡相，广阔的陆表浅海环境为高等植物的生长及后期泥炭的堆积提供了有利的条件^[29]。煤层分布面积广，横向连续性强，厚度由东北向西南逐渐变薄，甚至尖灭，主体厚度为 4~15 m，东北部厚度可达 20 多米，具备广

覆生烃的物质基础，如图 1 所示。宏观煤岩类型以光亮煤和半亮煤为主，具有一定的半暗煤和少量的暗淡煤。煤岩显微组分鉴定和统计(238 样次)显示，有机显微组分含量为 50.0%~99.4%，平均为 93.4%。其中，镜质组含量为 22.5%~96.8%，平均为 77.2%；壳质组含量为 0~32.3%，平均为 1.8%；惰质组含量为 1.9%~76.9%，平均为 21.0%。生烃母质以镜质组为主，生烃潜力大。工业分析数据(504 样次)显示，灰分含量为 1.60%~39.97%，平均为 16.50%；水分含量为 0.24%~3.76%，平均为 0.81%；挥发分为 5.48%~31.17%，平均为 12.67%；固定碳含量为 39.6%~91.13%，平均为 70.02%。煤岩的镜质体反射率 R_o 呈现“南高北低，西高东低，东北部最低”的特征，除了

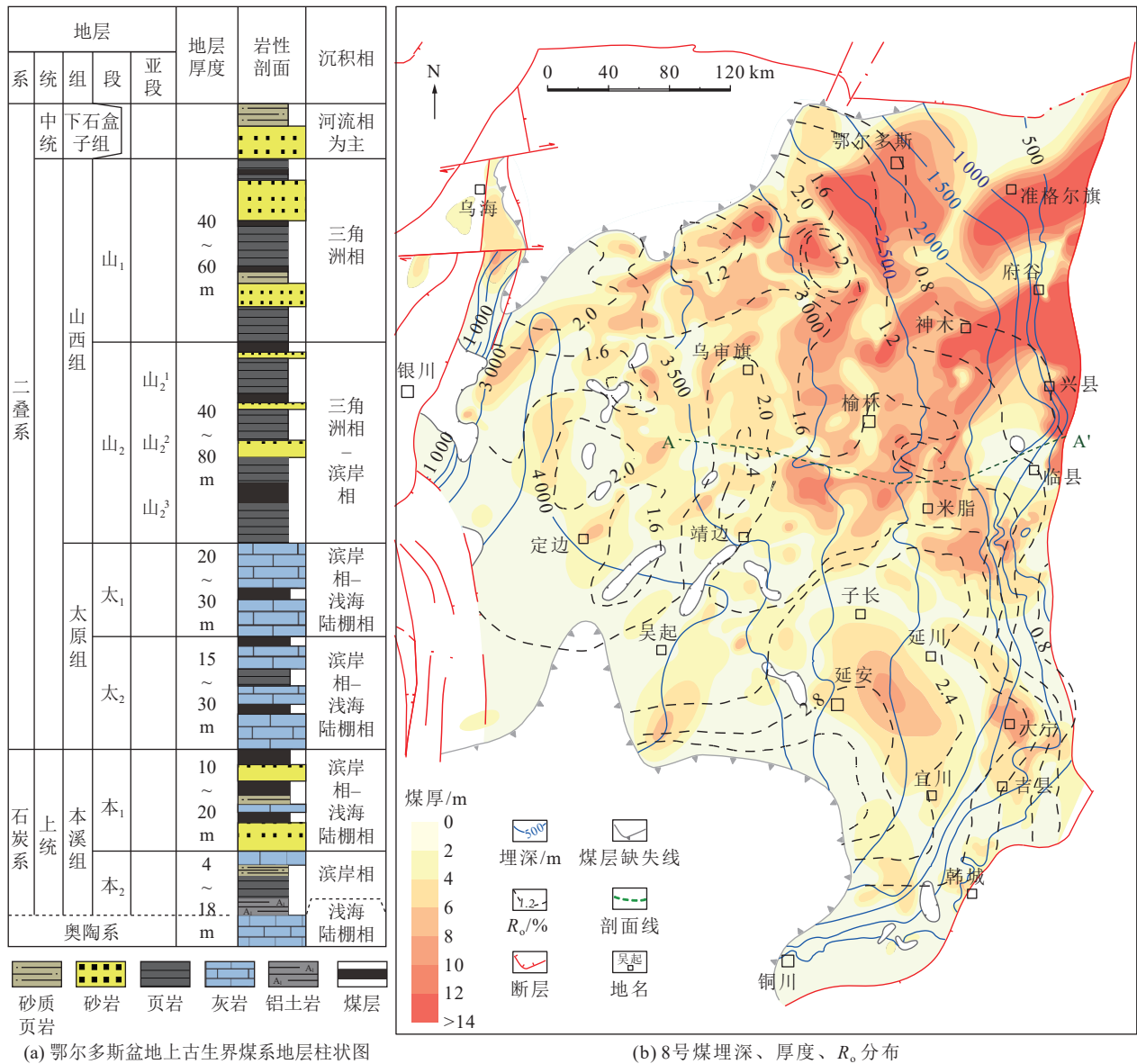


图 1 鄂尔多斯盆地上古生界煤系地层柱状图和 8 号煤埋深、厚度、 R_o 分布
Fig.1 Stratigraphic column of Upper Paleozoic coal-bearing strata in Ordos Basin and distribution of burial depth, thickness, and R_o of No. 8 coal

盆地东北角, 8 号煤的 R_o 普遍大于 0.7%, 表明煤岩已进入生烃成熟期, 东南部大宁—吉县区块煤岩甚至处于过成熟阶段, 生烃强度大。

8 号煤的实测含气量(198 样次)为 $4.32 \sim 35.57 \text{ cm}^3/\text{g}$, 主体分布范围为 $15 \sim 30 \text{ cm}^3/\text{g}$, 平均为 $19.35 \text{ cm}^3/\text{g}$ 。其中, 饱和吸附气量为 $2.7 \sim 27.6 \text{ cm}^3/\text{g}$, 主要分布范围为 $10 \sim 20 \text{ cm}^3/\text{g}$, 平均为 $15.14 \text{ cm}^3/\text{g}$ 。游离气量为 $0.1 \sim 19.5 \text{ cm}^3/\text{g}$, 集中分布于 $5 \sim 10 \text{ cm}^3/\text{g}$, 平均为 $5.8 \text{ cm}^3/\text{g}$ 。游离气的占比为 0.3%~57.7%, 分布范围较大, 0~40% 的范围内分布较多, 平均为 26.6%, 如图 2 所示。鄂尔多斯盆地本溪组 8 号煤岩生烃条件优越, 生烃强度大, 现存含气量高, 具有规模成藏潜质。然而, 无论是煤层埋深、厚度、煤岩煤质、热演化程度, 还是现今含气量, 跨度都很大, 显示出较强的空间非均质性, 相互之间的耦合制约关系有待揭示。

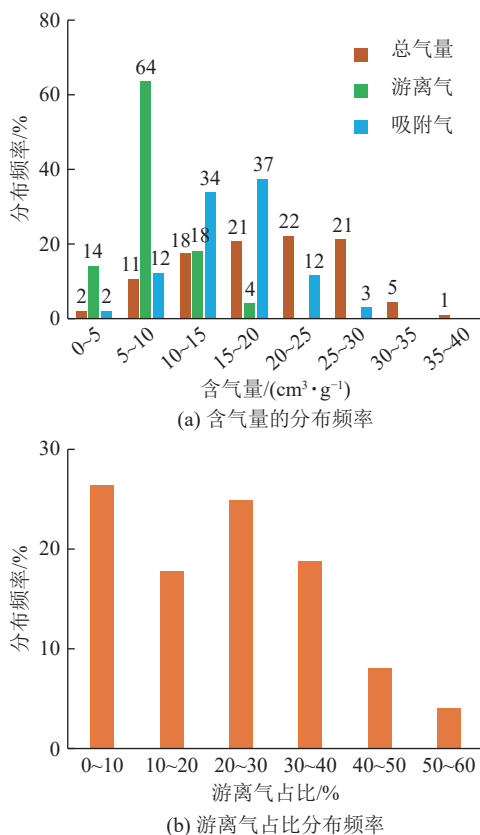


图 2 本溪组 8 号煤含气性特征

Fig.2 Gas content characteristics of No. 8 coal of Benxi Formation

2 含气量的关键控制因素

2.1 沉积环境制约下的储层发育及含气量特征

2.1.1 沉积相对煤层厚度的控制

本溪组 8 号煤层发育在海陆过渡的浅水三角

洲—障壁海岸沉积体系。其中, 北部区域主要为三角洲平原环境, 中南部为潮坪—泻湖—障壁岛构成的障壁海岸环境, 东缘中南局部为滨海陆棚环境, 如图 3 所示。由图 1 和图 3 比对可知, 沉积相带对煤层厚度的控制作用显著。煤层厚度在不同沉积相带由厚到薄的顺序依次为三角洲分流间湾、泻湖、潮坪/滨海陆棚。煤层发育厚度与泥炭堆积速率、可容空间形成速率及水动力条件等相关。一般泥炭堆积速率与可容空间形成速率相近, 水动力较弱的环境容易形成厚煤层。现有研究^[30,31]认为, 8 号煤(或 8+9 号煤)沉积时, 鄂尔多斯盆地发生了海侵方向转换, 即 8 号煤沉积前盆地南高北低, 海侵方向来自东北方向, 8 号煤沉积后, 海侵方向来自东南方向, 转换支点位于临县—柳林一带。转换过程为北部提供了较长的泥炭堆积时间, 同时北部浅水三角洲较高的泥炭供应速率与可容空间形成速率相适应, 为厚煤层的发育提供了有利条件。向南可容空间形成速率大于泥炭堆积速率, 泥炭供应不足, 煤层厚度逐渐变薄。另外, 潮坪和泻湖环境相比, 潮坪相对动荡的水体环境不利于泥炭堆积, 而水体相对静谧的泻湖环境更有利于泥炭堆积, 煤层厚度也更大。

2.1.2 沉积相对煤层结构的控制

煤层结构主要依据夹矸数量来划分, 反映了泥炭堆积时的水动力条件或基底沉降速度与泥炭堆积速度的相对大小。根据夹矸的数量本溪组 8 号煤层可以分为整装型、二分型、三分型和四分型 4 种类型。其中, 泻湖和滨海陆棚环境以整装型煤层结构为主, 分流间湾、潮坪、障壁岛及沉积相带分界处容易出现煤层的分叉, 如图 3 所示。分流间湾的煤层分叉主要与河道的泛滥相关; 潮坪亚相上发育的泥炭沼泽由于潮汐作用而周期性覆水, 动荡的水体环境容易导致煤层的分叉; 障壁岛属于障壁海岸沉积体系的高能相带, 较强的水动力条件易引发煤层分叉; 沉积相带的交界处往往由于沉积环境的变动而造成聚煤作用的不稳定, 从而导致煤层的分叉。

2.1.3 沉积作用对煤质的控制

1) 煤质的横向差异分布

沉积相带是泥炭沼泽发育的背景环境, 决定了泥炭沼泽中煤岩发育的整体质量。不同沉积相带灰分含量统计显示, 分流间湾环境煤岩灰分含量平均为 18%; 潮坪环境煤岩灰分含量为 16%~30%, 平均为 23%; 泻湖环境的煤岩灰分含量为 13%~19%, 平均为 17%; 障壁岛环境煤岩灰分含量为 19%~23%, 平均为 20%; 滨海陆棚环境煤岩灰分含量为 10%~

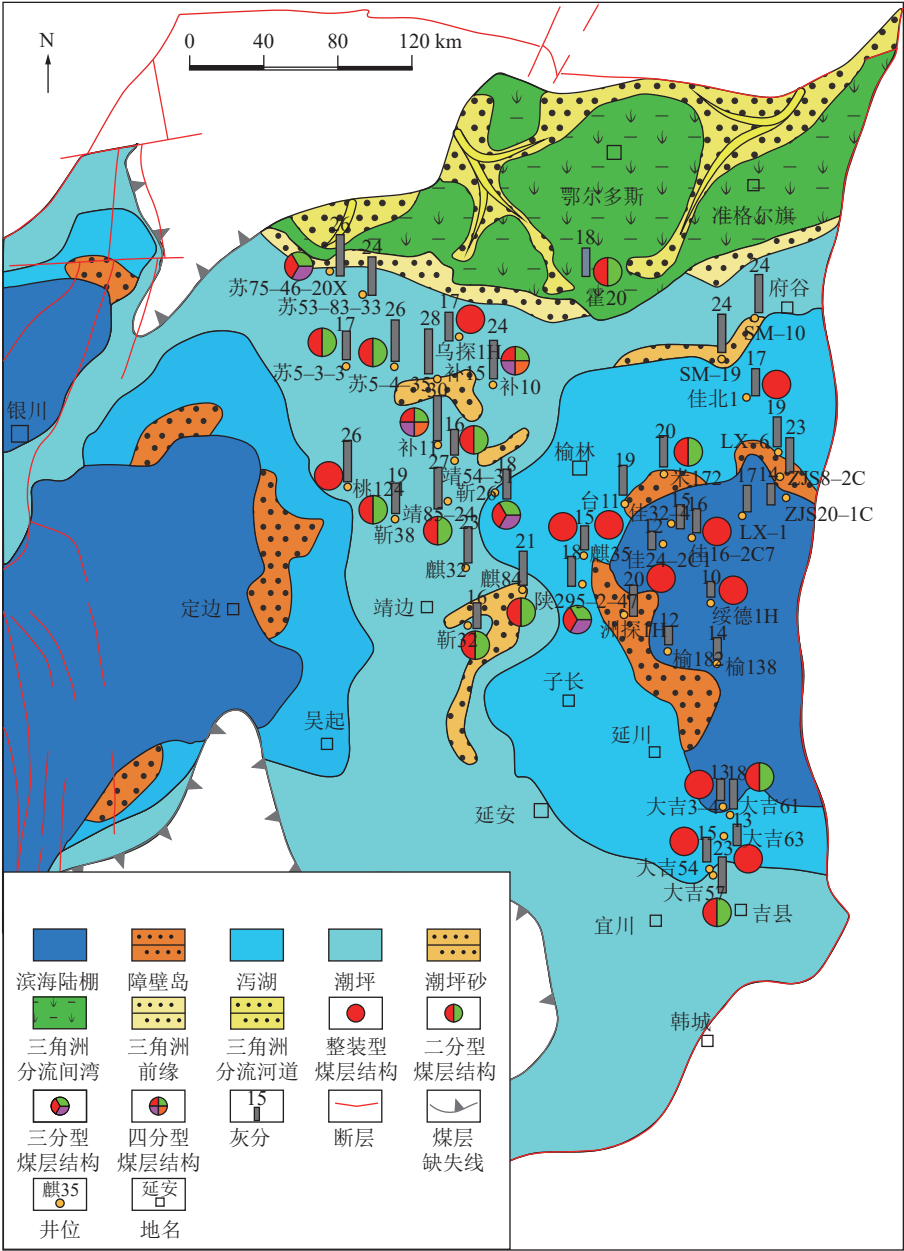


图 3 不同沉积相带中的煤层结构和灰分含量

Fig.3 Coal seam structure and ash content of different sedimentary facies zones

17%, 平均为 14%。由此可见, 潮坪、障壁岛等水体动荡或者高能环境, 灰分含量相对较大, 煤层也容易分叉。泻湖、滨海陆棚陆源碎屑供应较少且为静水环境, 煤岩灰分含量整体偏低, 煤层连续稳定发育。沉积相带控制了煤质的平面分布特征, 如图 3 所示。

2) 煤质的纵向差异分布

煤质的纵向差异分布主要与成煤沼泽环境相关。煤相及相关地球化学参数是指示古泥炭沉积环境的重要标志。以绥德 1H 井为例, 利用全硫含量(S_T)、锶钡比(Sr/Ba)、钒镍比($V/(V+Ni)$)来反映泥炭沼泽的古环境特征; 用凝胶化指数(GI)、组织保存指数(TPI)、地下水流动指数(GWI)、搬运指数(TI)来

分析煤相类型^[32], 数据见表 1。 S_T 分析可知, 除了 SD8-3-1 以外, 整个聚煤期普遍受到海水影响, 聚煤初期受海水影响非常大, 后期受海水影响减弱, SD8-3-1 显示出陆相特征。 Sr/Ba 分析可知, 聚煤早期为咸水环境, 中、后期则为咸水、半咸水和淡水环境的交替, 表明受到海水频繁进退的影响。 $V/(V+Ni)$ 参数分析可知, 聚煤早期为缺氧环境, 聚煤后期则为弱氧环境。GI 分析可知, 聚煤初期凝胶化作用强, SD8-3-2 为中等凝胶化作用, 其余时期都是弱凝胶化作用。TPI 分析可知, SD8-3-1 呈现出木本植物特征, 其余都为草本植物。GWI 和 TI 数据显示, SD8-3-1 和 SD8-4-3 沼泽水体活跃, 受地下水影响较大。

表 1 泥炭沼泽环境判别指标

Table 1 Indicators for recognizing peat swamp environment

古环境指标				煤相指标			
$S_r/\%$	低硫	中硫	高硫	$GI/\%$	强凝胶化	中凝胶化	弱凝胶化
	<1	1~3	>3		>10	5~10	<5
$Sr/Ba/\%$	淡水	半咸水	咸水	$TPI/\%$	保存不完整		保存完整
	<0.6	0.6~1.0	>1.0		<1		>1
$V/(V+Ni)/\%$	缺氧	弱氧	氧化	$GWI/\%$	值越大代表地下水影响越大		
	>0.6	0.45~0.6	<0.45	$TI/\%$	值越大代表水体活动越强		

综合古环境和煤相参数,绥德 1H 聚煤期的沼泽环境演化特征概括如下:聚煤初期为受海水影响大的深覆水咸水还原环境,由于沼泽水位低,地下水携带了大量矿物质输入沼泽,生长草本植物,归纳为开阔水域草本沼泽(SD8-4-3)。随后地下水位波动式变浅,演化为受海水影响较弱的覆水还原环境,由于此时沼泽水位仍然较低,地下水活跃程度减弱但仍维持了一定的矿物输入,由低位草本沼泽-低位覆水草

沼泽一度演化为低位潮湿森林沼泽。聚煤中期,随着泥炭的不断堆积,沼泽水位变高,地下水对沼泽的补给和矿物供应减弱,大气降水对沼泽水体的补给作用增强,此时沼泽呈现出弱氧化特征,演化为高位湿地草本沼泽。聚煤中后期,沼泽地下水位缓慢波动上升,沼泽覆水深度、水体还原性、凝胶化作用、矿物输入量都有所回升,聚煤末期演化为开阔水域草本沼泽,如图 4 所示。

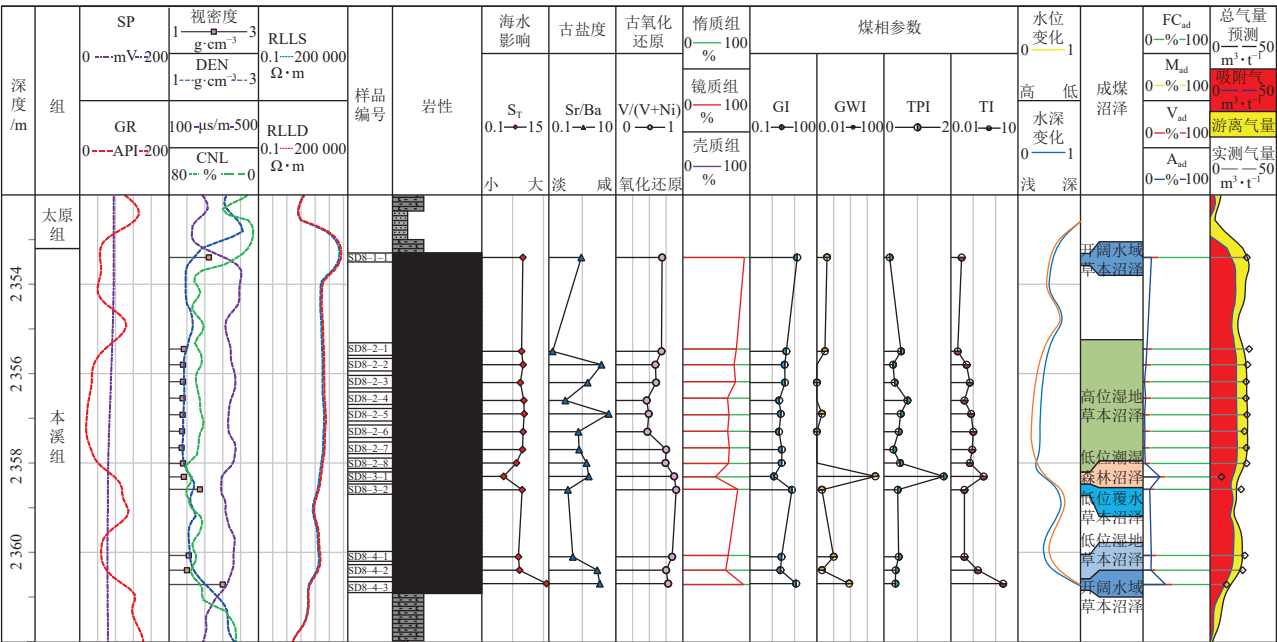


图 4 绥德 1H 井成煤环境制约下的 8 号煤的煤质、含气性纵向特征

Fig.4 Vertical characteristics of coal quality and gas content of No. 8 coal of Suide1H well as constrained by coal-forming environments

对比分析成煤沼泽与煤质的关系可知,开阔水域草本沼泽灰分含量最高,低位沼泽(包括低位覆水草本沼泽、低位湿地草本沼泽、低位潮湿森林沼泽)次之,高位草本沼泽的灰分含量最低。镜质组是煤岩主要的生烃有机显微组分,覆水深度较大的开阔水域草本沼泽、低位覆水草本沼泽环境,镜质组的占比相对较高。由此可见,高位沼泽有机质组分含量

高,但镜质组比例并不是最高,开阔水域及低位沼泽有机质含量低,但镜质组比例较高。

2.1.4 煤岩煤质对含气量的影响特征

沉积环境和成煤环境共同决定了煤岩煤质特征。随着灰分含量的增加,实测总气量、饱和吸附气量、游离气量及游离气比例都呈减小趋势,如图 5 所示。这是由于随着灰分含量的增加,煤岩有机组分就会

相应降低。煤中有机显微组分是煤岩的主要生气组分,同时也提供气体的赋存空间。因此,有机显微组分含量越高,生气量也越大,吸附性能越强,存储空间也更充足,吸附气量、总气量也越大。当镜质组的含量较大时,游离气量及游离气的比例都较大,如图 6 所示。镜质组含量越高,代表凝胶化作用越强,割理的发育程度增加,游离气的赋存空间增大,游离气量增加。值得注意的是,游离气的比例随灰分降

低的趋势弱于游离气量随灰分的减小趋势。这一现象蕴含着两层含义,一是灰分含量由水动力条件和覆水深度共同决定,在水动力条件一定时,灰分的增加意味着镜质组比例的提高(这一现象在绥德 1H 井已经得到了证实),也会有一些割理产生,这在一定程度上缓减了有机质含量降低引起的游离气赋存空间的降低;二是表明灰分含量并非游离气比例的关键控制因素。

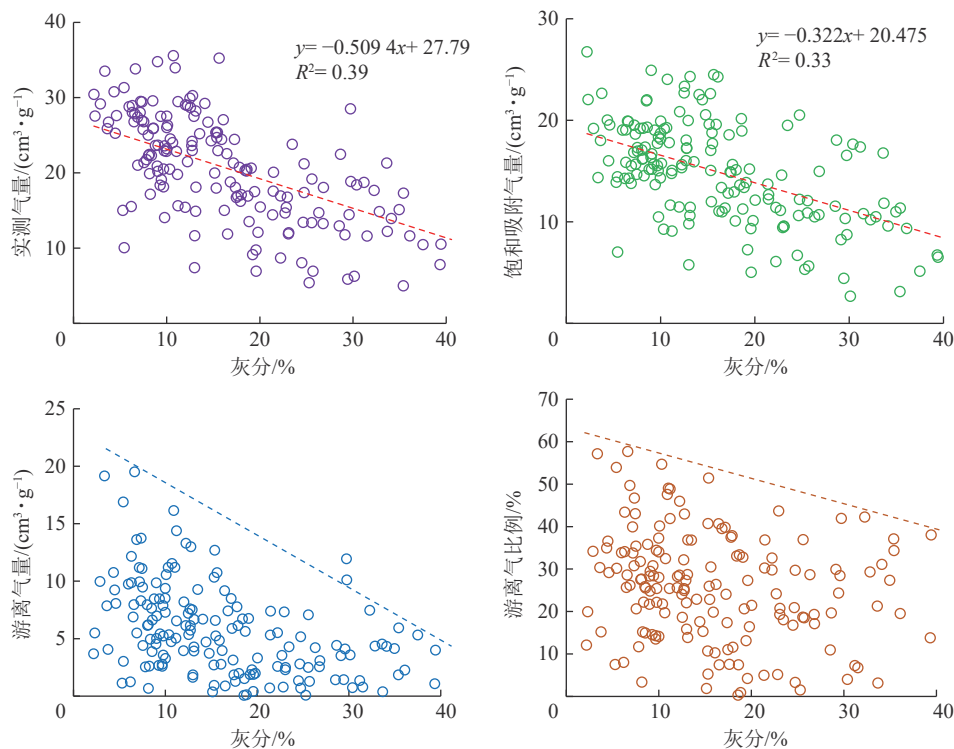


图 5 8 号煤含气量与灰分的关系

Fig.5 Relationship between gas content and ash content of No. 8 coal

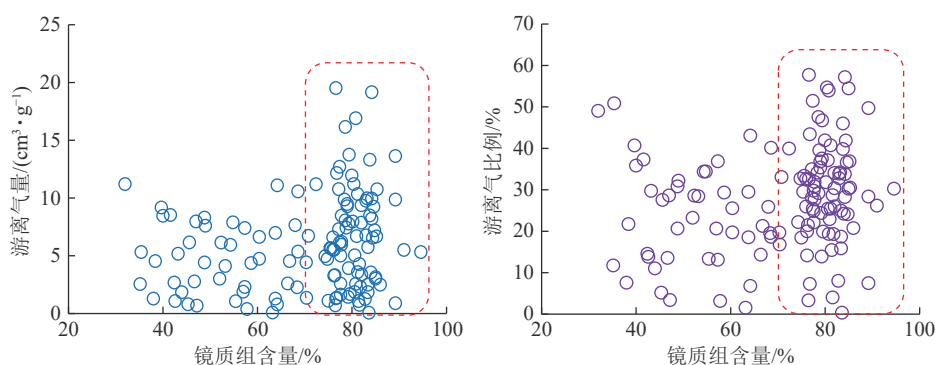


图 6 镜质组含量与游离气量及其比例与的关系

Fig.6 Relationship between vitrinite content and free gas content and its ratio

2.1.5 煤、岩组合对含气量的影响特征

1) 煤、岩组合特征及封闭性评价

聚煤前后的沉积环境决定了煤、岩组合特征。盆地本溪组 8 号煤的底板主要为泥岩,其次为砂岩+

泥岩和砂岩,零散分布少量的灰岩底板。煤层顶板主要为灰岩、灰岩+泥岩,其次为砂岩+泥岩、泥岩以及砂岩,如图 7 所示。因此,煤层与顶底板的组合类型(底-煤-顶)主要可概括为泥-煤-灰、泥-煤-灰+

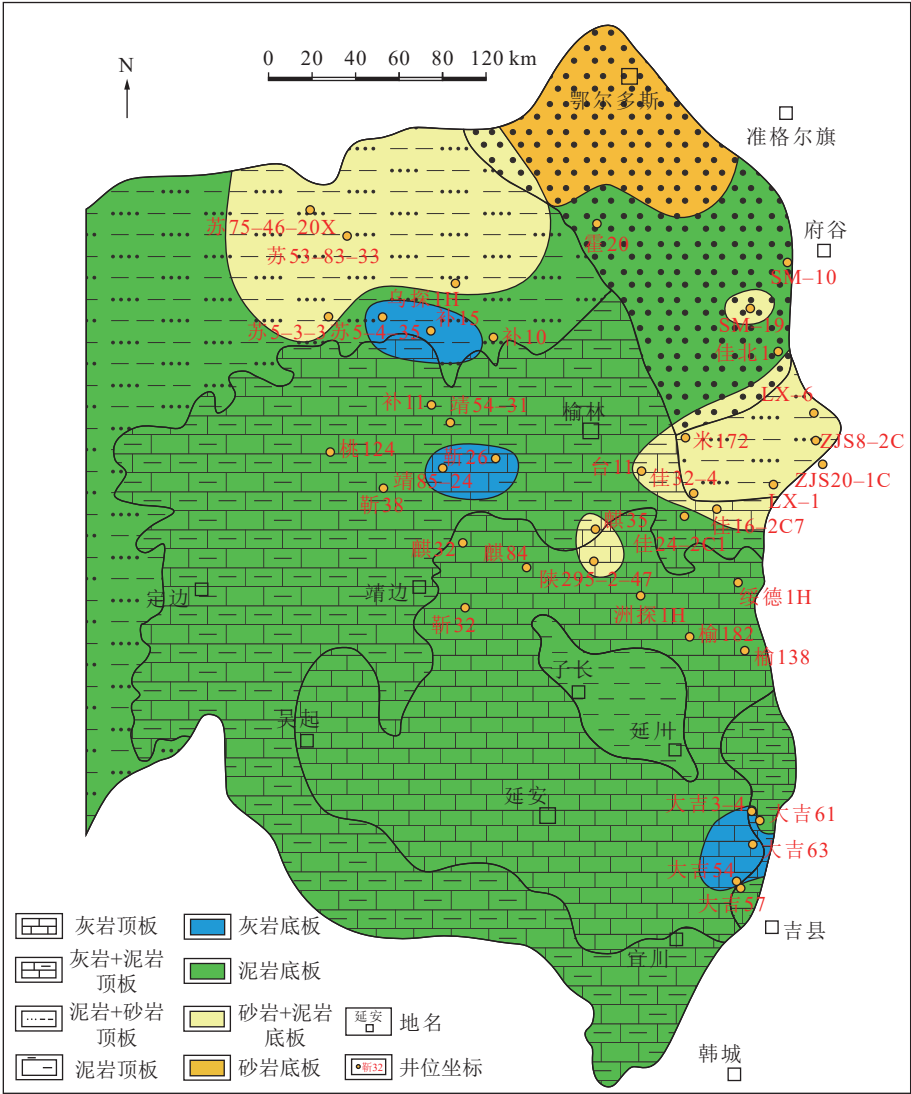


图 7 本溪组 8 号煤、岩组合特征

Fig.7 Assemblage characteristics of No. 8 coal and surrounding rock of Benxi Formation

泥、泥-煤-泥+砂、泥-煤-砂、泥+砂-煤-泥+砂 5 种类型。对盆地不同岩性的突破压力和排驱压力测试表明,灰岩的封闭性好,突破压力平均为 27 MPa;泥岩的封闭性次之,突破压力平均为 22 MPa;致密砂岩的封闭性最差,突破压力平均为 11 MPa。考虑到部分煤层的直接顶底板厚度较小,故引入围岩封闭系数来评价围岩对煤岩气的封存能力。顶板/底板单一岩层的封闭系数计算公式如下:

$$F_i = \left(1 - \frac{H}{10}\right) M_i P \quad (1)$$

式中, F_i 为顶板/底板单一岩层的封闭系数, $\text{MPa} \cdot \text{m}^2$; M_i 为统计厚度范围内的单一岩层的厚度, m ; H 为单一岩层厚度中心与煤层顶/底的距离, m ; $\left(1 - \frac{H}{10}\right)$ 则为单一岩层封闭性的权重,即距离煤层越近,该岩

层的封闭性权重越大; P 为该单一岩层突破压力, MPa 。

顶板/底板围岩封闭性是煤层顶/底 10 m 范围内所有岩性封闭性的加和,围岩整体的封闭系数则取顶、底板围岩封闭系数的均值。

2)煤、岩组合对含气量的影响

依据式(1),对盆地不同井位围岩的封闭性进行计算。通过围岩封闭系数与含气量的相关性分析可知,随着封闭系数的增大,游离气和总气量都呈增大趋势,如图 8 所示。这是由于围岩的封闭性能对于气藏调整期气体的保存具有重要的意义,围岩封闭性越好,现今残存的气量越大。另外,煤岩气是吸附气和游离气共存,煤层顶、底板的封闭性对游离气的保存至关重要,围岩封闭性越好,游离气含量越高,相应的总气量也越大。

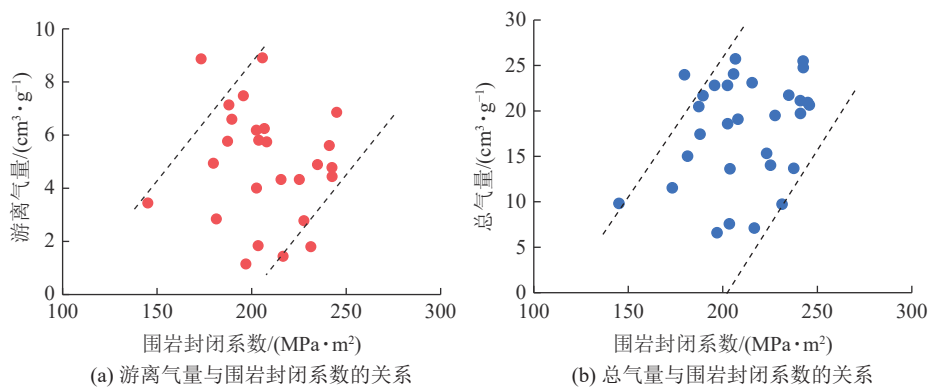


图 8 本溪组 8 号煤围岩封闭性对含气量的影响

Fig.8 Impact of surrounding strata sealing on gas content of No. 8 coal of Benxi Formation

2.2 煤阶控制下的含气量特征

2.2.1 不同煤阶煤岩生烃强度

煤阶用于描述煤变质程度,反映煤化作用进行的程度,决定了煤岩的生烃强度,分为低煤阶($R_o < 0.65\%$)、中煤阶($0.65\% < R_o < 2.0\%$)和高煤阶($2.0\% < R_o$)。盆地由东北向西南和南部,煤阶有升高趋势,南部延安一带变质程度最高($R_o > 3.0\%$),以无烟煤为特征, R_o 局部高值区的多点分布表明大地古热流的不均一性,也导致不同区域生烃演化存在差

异,如图 1 所示。根据生烃热模拟实验可知,当 R_o 超过 1.0% 时,煤岩开始快速生烃;当 R_o 大于 1.3% 时,煤岩开始大量生气,如图 9 所示。整体而言,盆地 8 号煤岩普遍进入了生烃成熟期,中北部处于成熟—高成熟阶段,中部处于高成熟阶段,南部处于过成熟阶段,即盆地大部分区域有大量的干气生成。

2.2.2 不同煤阶煤岩孔裂隙结构特征

煤岩是由多尺度孔裂隙组成的介质,根据煤中气体的存储、运移特征,煤中的孔裂隙可以分为微孔

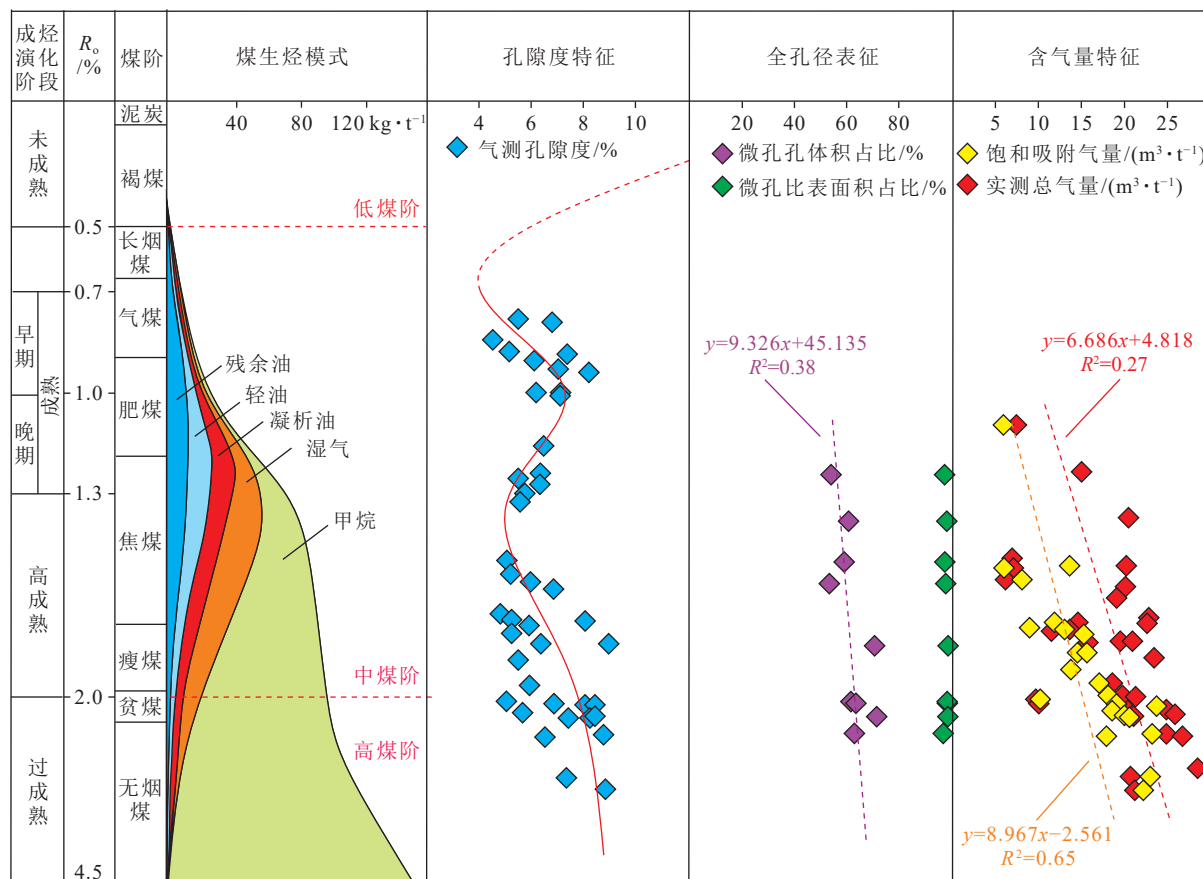


图 9 不同煤阶煤岩的生烃模式、孔隙演化及储气性能

Fig.9 Hydrocarbon generation modes, pore evolution, and gas storage performance of coal at different coal ranks

(<2 nm)、介孔(2~50 nm)和宏孔(>50 nm)3 种类型。利用气测孔隙度来反映总孔隙度的变化。依据 CO_2 吸附、 N_2 吸附、高压压汞、微米 CT 等手段对不同尺度的孔裂隙进行表征,进而实现孔裂隙结构的全孔径刻画。不同变质程度($R_o > 0.7\%$)煤岩的气测孔隙度显示,总孔隙度随着 R_o 的增大呈先增大后减小再增大的趋势,如图 9 所示。该趋势是压实和生烃共同作用的结果。在不受热事件影响时,埋深的增加伴随着煤变质程度的增加,即煤阶的变化与煤层的埋藏演化过程密切相关。当 $R_o < 0.7\%$ 时,煤岩随着地层的快速沉降,此时以压实减孔作用为主,孔隙度持续减小;当 $0.7\% < R_o < 1.0\%$ 时,煤岩生烃作用增强,此时生烃增孔强于压实减孔;当 R_o 为 $1.0\% \sim 1.3\%$ 时,随着地层的再次快速埋藏,压实减孔作用再次占主导(压缩的主要为次生孔隙);当 R_o 超过 1.3% 时,煤岩开始大量生气,生气增孔强于压实减孔。不同变质程度($R_o > 1.0\%$)煤岩的孔隙结构测试显示, R_o 与煤岩微孔的孔体积和比表面积、总孔的孔体积和比

表面积呈正相关,与介孔的孔体积和比表面积、宏孔的孔体积和比表面积呈负相关,如图 10 所示。这是因为盆地煤岩变质程度主要受控于历史最大埋深,即 R_o 的高低意味着煤岩所经历的历史最大埋深的差异。煤变质程度越高,表明历史埋深越大,也暗示煤储层经历了更强的压实减孔作用^[16],但不同尺度的孔隙对压实作用的响应不同。一般孔径越大的孔隙遭受的压实减孔作用更强,且较大的孔隙会被压缩演变为较小的孔隙^[33]。此外,随着煤变质程度的增加,煤岩的芳构化程度逐渐增加,侧链和官能团则慢慢脱落,大分子排列的更加紧凑,导致煤岩的孔径逐渐减小。且随煤变质程度的增加,生气强度也增加,而气孔一般以微孔和介孔为主。上述因素的综合作用导致微孔的孔体积和比表面积随 R_o 的增大而显著增大,宏孔的孔体积和比表面积随 R_o 的增大显著减小,而介孔的孔体积和比表面积随 R_o 的增大分散式减小,总孔容和总比表面积受微孔的影响随 R_o 的增大有增大的趋势。

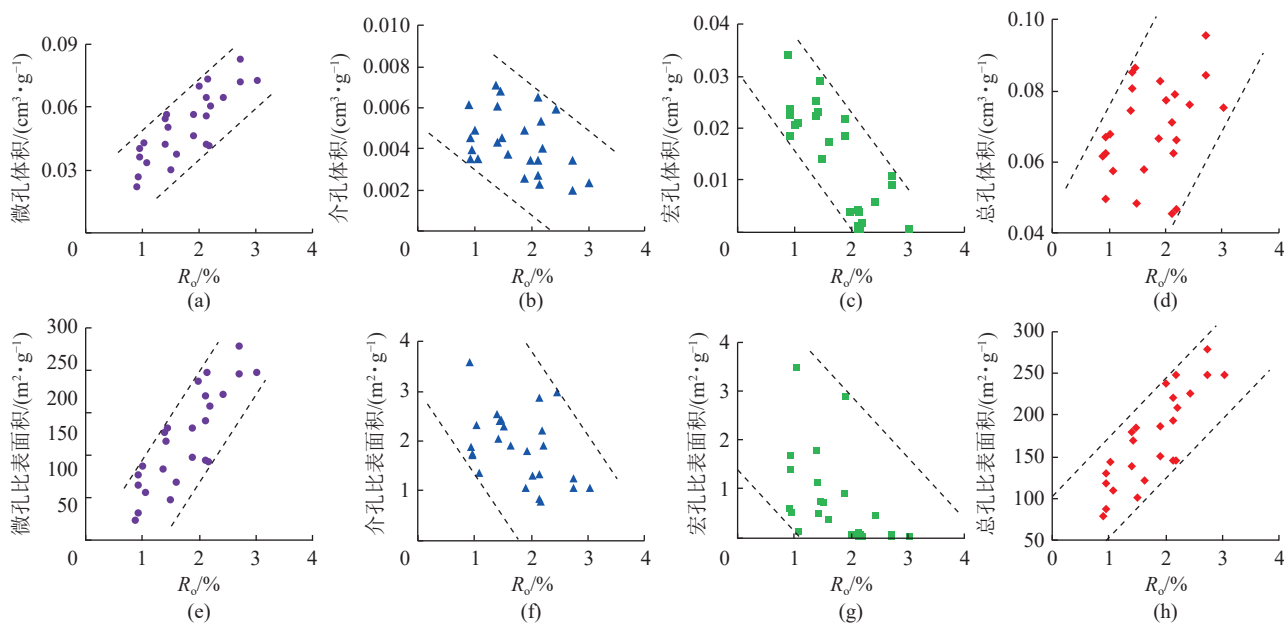


图 10 本溪组 8 号煤的 R_o 和孔隙结构参数的关系

Fig.10 Relationship between R_o and pore structure parameters of No. 8 coal of Benxi Formation

2.2.3 煤阶对含气性的影响

煤阶对煤岩气成藏的控制主要体现在其对生烃量、储存空间、储集性能的影响。煤在热成因变质阶段具有持续生烃能力,但不同煤阶对应的生烃强度不同,其累积生气量差异较大,尤其是当 R_o 小于 1.0% 时,累积生气量较小,这也是盆地东北部含气量较低的重要原因之一。尽管总孔隙度随煤阶的变化规律复杂,但微孔的孔体积及其比例随煤阶的升高

而持续增大,煤基质对气体的吸附性能持续增强。随着煤阶的升高,吸附气量呈线性增大,总气量在吸附气的带动下也有增大的趋势,如图 9 所示。对比处于相同沉积相带的大宁—吉县地区和榆林地区发现,大宁—吉县地区煤岩总气量为 $12.3 \sim 24.8 \text{ cm}^3/\text{g}$, 平均为 $23.55 \text{ cm}^3/\text{g}$, 其中吸附气的占比为 $71.7\% \sim 99.7\%$, 平均为 83.0% 。榆林地区煤岩总气量为 $10.70 \sim 33.96 \text{ cm}^3/\text{g}$, 平均为 $24.24 \text{ cm}^3/\text{g}$, 其中吸附气

的占比为 63.4%~96.6%，平均为 72.1%。大宁—吉县地区煤岩吸附气比例高于榆林地区。

2.3 埋藏演化及埋深对含气量的影响

2.3.1 埋藏演化过程

鄂尔多斯盆地 8 号煤层在晚石炭世早期就开始沉积,随后快速沉降保存,伴随着强烈的压实作用。当进入生烃门限后,煤层开始生烃,直到三叠纪末期,印支运动使地层抬升,煤层的持续埋藏停止,生烃也随之中止。在经历了抬升、沉降波动后,晚侏罗世煤层进入第 1 次生烃高峰。晚侏罗—早白垩地层再次快速沉降,达到历史最大埋深,煤层也达到了最大生烃强度^[34]。煤层累积生气量远远超过了储层现在的含气量,持续生烃导致储层处于超压状态。此时的储层温度高,煤岩吸附能力低,孔裂隙中的煤岩气以压缩态的游离气为主。白垩纪末期,构造运动导致地层开始持续抬升,煤岩生烃作用结束,开始了大规模的气藏调整,主要表现为气体的大量逸散。随着

地层的不断抬升,储层温度和压力同时减小,煤储层中的气体由于温、压的减小而发生赋存状态的动态变化,游离气向吸附气持续转变。尽管整个盆地的埋藏演化史类似,但是不同区域沉降和抬升幅度不同,造就了不同的生烃演化模式,可以概括为 3 种类型:深埋深藏型(历史最大埋深和现今埋深都处于深层环境,如大宁—吉县区块)、深埋浅藏型(历史最大埋深到现今埋深经历了深浅转换,如延川南区块)、浅埋浅藏型(历史最大埋深与现今埋深都处于浅层环境,如保德区块)^[35]。深埋深藏型在地层抬升过程中游离气向吸附气转换,但由于现今埋深仍处于临界深度以下,煤储层是饱和吸附状态,含游离气。深埋浅藏型是历史最大埋深在临界深度以下,现今埋深在临界深度以上,现今煤储层是欠饱和吸附,不含游离气。浅埋浅藏型煤岩变质程度低,累积生烃量小,历史最大埋深时大于或接近于临界深度,随着地层抬升含气饱和度逐渐降至较低水平,如图 11 所示。

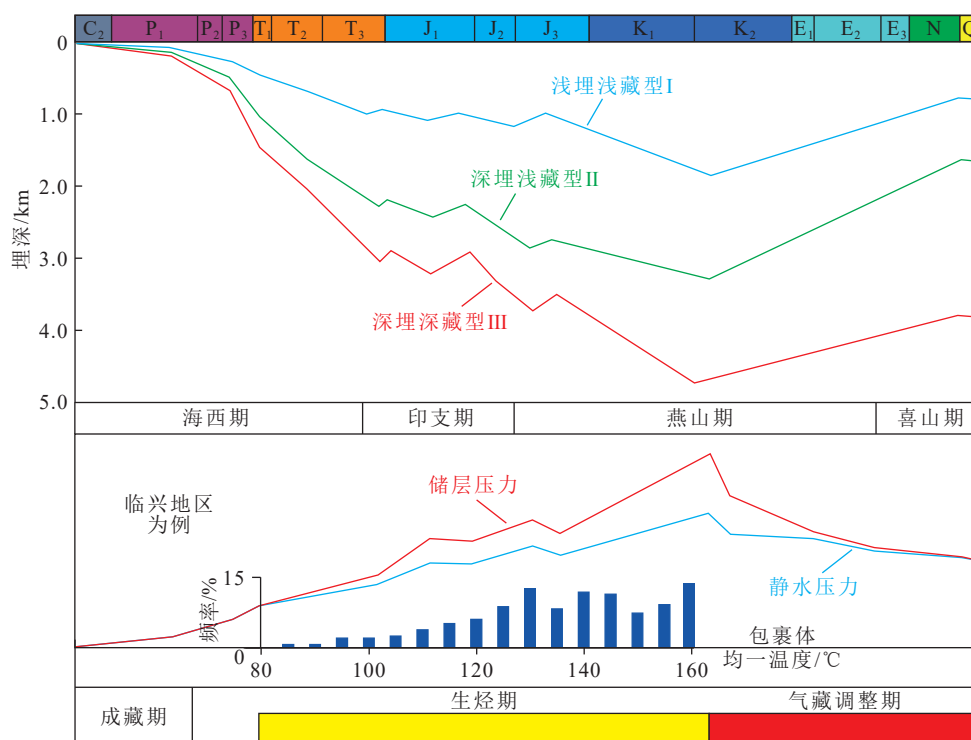


图 11 本溪组 8 号煤成藏演化过程^[35]

Fig.11 Process of hydrocarbon accumulation and evolution of No. 8 coal of Benxi Formation^[35]

2.3.2 埋深对含气量的影响

通过 165 样次的数据统计可知,随着埋深的增加,在温度和压力的协同作用下,饱和和吸附气量逐渐减小,即温度的负效应大于压力的正效应,埋深处于压力正效应的临界深度以下,也从侧面表明煤岩气的饱和临界深度小于 1 800 m。现有研究认为,临界

深度随煤阶的变化而变化,对于中高阶煤,其临界深度为 1 500~1 800 m。由于处于临界深度以下,温度的负效应大于压力的正效应,且随着埋深的增加,温度的负效应更加显著,煤岩的吸附性能进一步降低,游离气的比例持续增高,这也是游离气的比例并未随灰分的增加而明显降低的原因之一。总气量随埋

深的增加有降低的趋势,这与埋深增加导致煤岩孔隙整体压缩有关,但受游离气的影响,总气量随埋

深的增加(3 000 m 以浅)得以缓慢降低,3 000 m 以深的快速降低叠加了高灰分的影响,如图 12 所示。

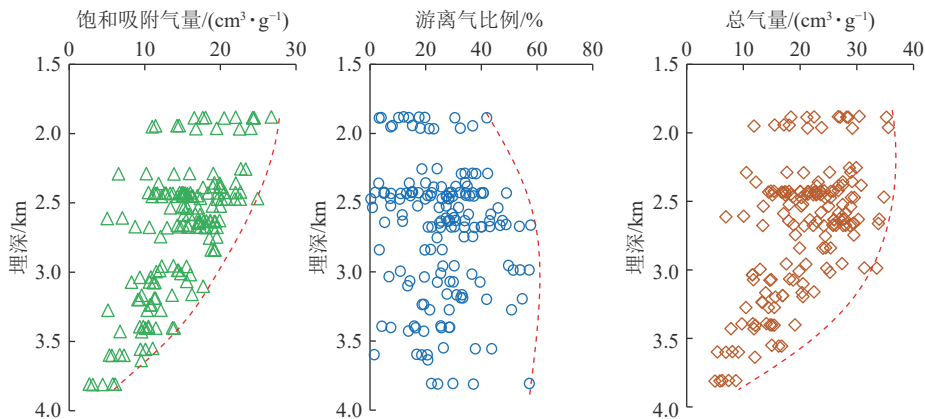


图 12 本溪组 8 号煤含气量随埋深的变化规律

Fig. 12 Variation pattern of gas content with burial depth of No. 8 coal of Benxi Formation

2.4 构造控气

煤岩气在赋存和成藏机制上与浅层煤层气存在显著差异^[36]。煤岩气以吸附气和游离气共存为特征。游离气的存在使得煤岩气与常规天然气具有一定的相似性,即局部微运移是必然存在的。盆地本溪组煤岩气主体位于伊陕斜坡上,地层倾角小,构造简单,因此,微幅构造高部位作为煤岩气的潜在富集区得到重视。由于构造高部位裂隙的密度和开度都有增加,这为吸附气的解吸和游离气的赋存提供了便利条件,在气体上浮力的作用下,煤岩气可在此富集。同时,构造高部位在一定程度上改善了储层物性条件,这也为该部位煤岩气的高产奠定了基础。如大宁—吉县区块,2020 年 10 口致密气老井直井试采 8 号煤的煤岩气,其中,正向微构造区的单井平均稳产气量为 $4\,500\text{ m}^3\cdot\text{d}^{-1}$,平缓构造区单井平均稳产气量为 $2\,000\text{ m}^3\cdot\text{d}^{-1}$,负向微构造区的单井平均稳产气量为 $1\,433\text{ m}^3\cdot\text{d}^{-1}$,构造陡变区的平均稳产气量为 0,水平挤压区的单井平均稳产气量为 $1\,325\text{ m}^3\cdot\text{d}^{-1}$ ^[22]。首次发现了煤岩气有利微构造部位和压裂改造规模对产能的重要影响,指导了后期大吉先导试验区、先导试验扩大区的建成。因此,在宽缓斜坡寻找相对构造高部位是未来煤岩气勘探与开发的一个重要方向,如图 13 所示。

3 煤岩气富集规律

3.1 煤层气与煤岩气对比

鄂尔多斯盆地本溪组 8 号煤层全区稳定发育,自东向西连续分布,煤层气与煤岩气接替分布,但煤层气与煤岩气富集成藏规律差异显著,具有明显的

分带性,如图 14 所示。

从煤层分布来看,盆地北部整体为三角洲平原环境,煤层厚度大,且没有太大差异。盆地中北部,自东向西由泻湖相演变为潮坪相,煤层厚度由厚到薄,煤层结构由整装型向二分型演变,灰分含量由低到高,浅层煤储层生烃母质条件优于深层煤储层。盆地中部及南部,沉积环境由滨海陆棚相演变为泻湖相再到潮坪相,决定了煤层厚度由薄到厚再到薄的变化趋势。煤层结构由整装型向二分型演变,灰分含量东低西高。总体上,中部煤层生烃物质基础最好,其次为东部煤层,西部煤层最差。盆地煤岩变质程度与埋深有一定的正相关性,自东向西煤变质程度增加,即浅层煤储层的生烃强度整体低于深层煤储层。盖层在不同的东西向剖面上有所差异,中北部自东向西盖层由砂岩+泥岩演变为灰岩+泥岩再到砂岩+泥岩。中部和南部,自东向西煤岩盖层由灰岩演变为灰岩+泥岩到泥岩+砂岩。

从埋深分布来看,自东向西随着埋深的增加,在温度和压力的协同作用下,煤层气以吸附态为主,煤岩气是吸附、游离态共存。煤层气区,随着埋深的增加,总气量减小,游离气的比例增加。煤层气区,随着埋深的增加,总气量增加,即吸附气量增加。

从构造-水动力条件来看,煤层气分布在浅部陡坡带及过渡带,陡坡带断裂发育,过渡带发育少量的断裂。受构造影响,浅部陡坡带构成地下水的补给区和径流区,煤层气受地下水的冲刷携带作用明显。过渡带则为地下水的滞留区,滞留区的水压封堵控气作用显著,以吸附态为主的煤层气则在该区的向斜部位相对富集,即向斜富气。煤岩气分布在缓坡

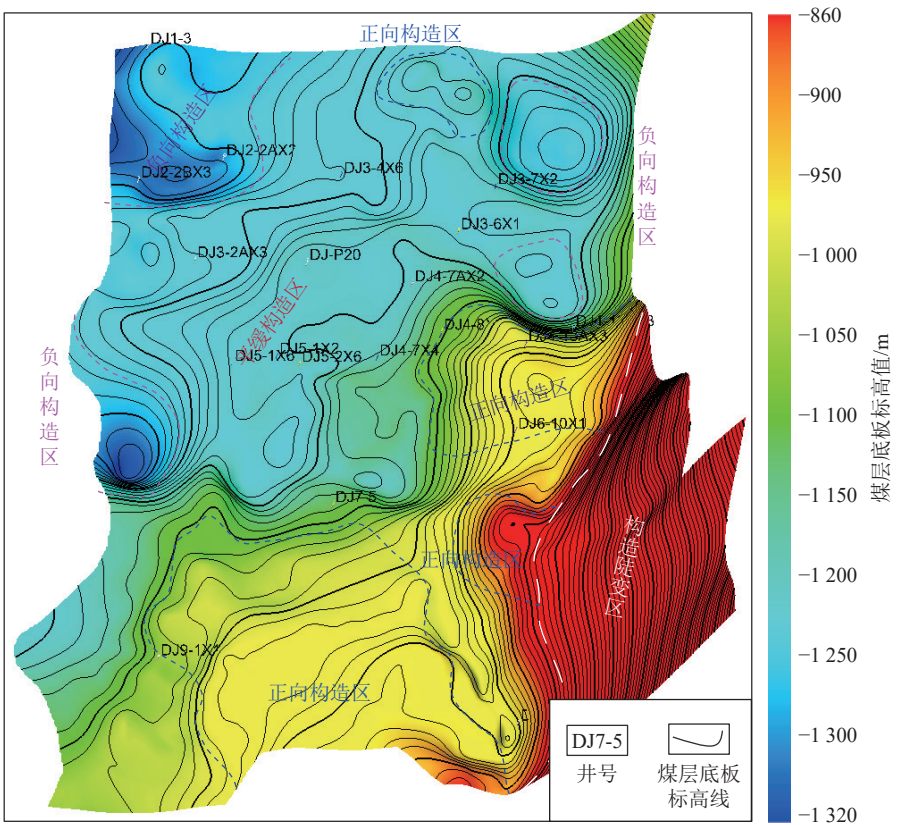


图 13 大宁—吉县区块储量申报区微幅构造划分^[22]

Fig.13 Microstructural tectonic division of reserve declaration area in Daning—Jixian block^[22]

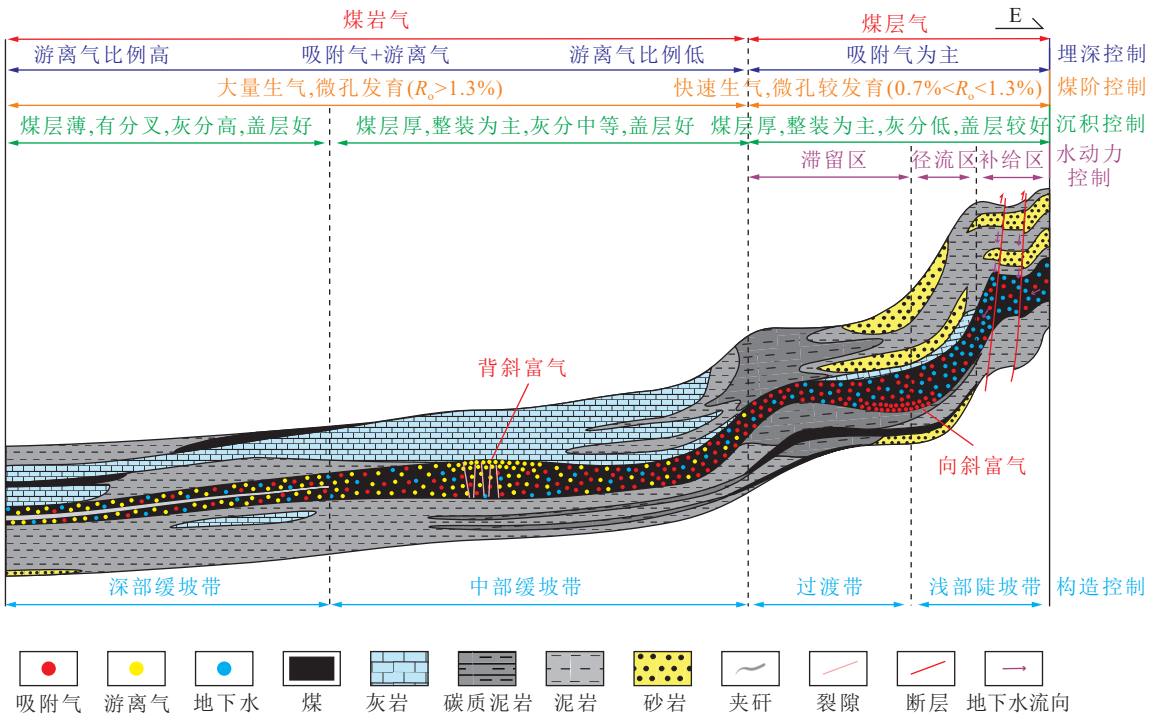


图 14 鄂尔多斯盆地煤层气与煤岩气地质条件对比

Fig.14 Comparison of geological conditions between coalbed methane and coal-rock gas in Ordos Basin

带,构造非常简单,断裂不发育。缓坡带可细分为中部缓坡带和深部缓坡带。缓坡带自由地下水自东向

西逐渐减少,以高矿化度束缚水为主,水压封堵作用消失。缓坡带气、水在重力、浮力以及毛细管力的共

同控制下,游离气通过微距运移在高部位相对聚集,形成层内及平面上的煤岩气的差异富集,因此要重视评价区构造高点的刻画。

3.2 煤岩气富集规律

盆地煤岩气的差异富集是生、储、保协同作用的结果。生烃条件方面,鄂尔多斯盆地本溪组 8 号煤层全区稳定发育,横向连续性强,具备广泛生烃的物质基础。尽管煤层普遍发育,但煤质决定了生烃的效能,灰分含量越低,生烃效能越高。变质程度决定了生烃强度,当 $R_o > 1.3\%$ 时,煤岩开始大量生气。煤质和煤阶的叠合结果是泻湖和滨海陆棚环境处于高成熟—过成熟区域的煤层具有较好的生气潜力。储存条件方面,盆地煤岩气为自生自储型气体,即煤岩气的赋存取决于煤岩自身孔裂隙发育特征,处于缓坡带的煤岩孔裂隙结构主要受煤质、煤阶和埋深控制。由于煤岩孔裂隙主要依赖于有机质,所以煤质还决定了煤岩气总体的赋存空间。灰分含量越低,气体赋存空间越大。镜质组含量越高,割理也相对发育,游离气的赋存空间也更大。煤变质程度的增加会进一步增加微孔的孔体积和比表面积,强化煤岩对气体的吸附。因此,生气潜力较好的区域,煤岩气的赋存空间是比较充足的。随着埋深的加大,煤层孔裂隙被整体压缩,气体赋存空间减小,即埋深过大不利于气体的赋存,根据埋深与含气量的关系可知,有利的深度范围为 1 800 ~ 3 000 m。保存条件方面,煤、岩组合情况决定了煤岩气的保存条件,生、储有利区封闭性较差的煤、岩组合是泥—煤—砂(底—煤—顶),因此,保存条件较好的边界以顶板砂岩边界为限。

生、储、保有利条件的叠合奠定了煤层含气量的整体格局,圈定了煤岩气的相对富集区。对于缓坡带,构造高点则起到在局部富气的作用,尤其是对游离气的富集。盆地煤岩气的富集区是从榆林向南到宜川的南北向条带,该富集区的优势深度范围为 1 800 ~ 2 500 m,煤岩气的含量为 20 ~ 28 cm³/g,平均为 23 cm³/g,含气量较大,如图 15 所示。

4 煤岩气资源条件评价及勘探开发意义

4.1 评价体系

基于鄂尔多斯盆地本溪组煤层含气量主控因素的系统分析,提炼煤岩气资源关键控制因素有煤层厚度、煤质、变质程度、埋深、煤、岩组合等地质条件。基于煤岩气开发的实践认识,以 4 m 和 10 m 为界将煤层厚度分为 3 个等级。煤岩灰分含量为

10% ~ 30%,以灰分 20% 为界将煤质分为 2 个等级。 R_o 指示了煤岩生气强度,以处于生气早期($0.65\% < R_o < 1\%$)、快速生气期($1.0\% < R_o < 1.3\%$)、大量生气期($1.3\% < R_o$),将煤岩变质程度划分为 3 个等级。埋深主要控制吸附气和游离气的比例,也影响着总的含气量,盆地煤岩气的深度上限为 1 500 m 左右,1 500 ~ 1 800 m 表现为煤层气和煤岩气的过渡带,以吸附气为主;当埋深大于 1 800 m 时,全部显示为煤岩气,且随着埋深的增加,游离气的比例持续增大;当埋深为 1 800 ~ 3 000 m 时,煤岩气为游离—吸附型,且保持了较高的含气量;当埋深为 3 000 ~ 3 750 m 时,煤岩气为游离—吸附型,但总气量降低;当埋深大于 3 750 m 时,地层温度的负效应显著大于压力的正效应,煤岩气为吸附—游离型,总气量进一步降低^[21]。从煤、岩组合来看,煤层底板主要为泥岩,顶板岩性变化相对较大,因此,以煤层及其顶板构成的储盖组合表征保存条件。盖层的封闭性能整体上可以归纳为三大类,灰岩、泥岩和灰岩+泥岩的封闭性都较好,归为好的盖层,砂岩盖层为较差等级,砂岩+泥岩的封闭性能居中。依据上述指标及其分类标准,构建煤岩气资源条件评价体系,见表 2。

4.2 评价结果及勘探开发意义

根据上述煤岩气资源条件评价体系,鄂尔多斯盆地本溪组深层煤储层可划分为 4 类 13 个区带,如图 16 所示,盆地煤岩气的勘探开发可按照 I、II、III、IV 的顺序有序展开,但不同分区内,其勘探开发策略也不一样。

I 类区是全区煤岩气资源条件最好的区域,煤层厚度属于 4 ~ 10 m 级,煤层结构为整装型。灰分含量小于 20%,且煤层进入大量生气期。煤层埋深为 2 000 ~ 3 000 m,煤岩气类型是游离—吸附型。I-A 和 I-B 的区别在于:I-A 的顶板为灰岩、灰岩+泥岩,顶板封闭性好;I-B 的顶板为砂岩,封闭性较差,但煤层厚度大于 I-A 区,整体评价仅次于 I-A 区。该区煤岩气资源量约为 $50\,875.1 \times 10^8$ m³,适合进行整层的规模压裂。煤岩气的产出方式是游离气产出带动吸附气的降压解吸,产出过程要注意游离气向吸附气的降压传导,以寻求二者协同下的煤岩气的高效规模产出。

II 类区由 3 个小区构成(西边 2 个,东边 1 个)。西边的 II 类小区煤层厚度、变质程度、埋深都与 I 类区相近,二者的差异是煤层结构和灰分含量。II 类区煤层出现分叉(夹矸厚度为 0.2 ~ 5.4 m),灰分含量大于 20%。西边的 2 个 II 类小区的差异在于盖层。

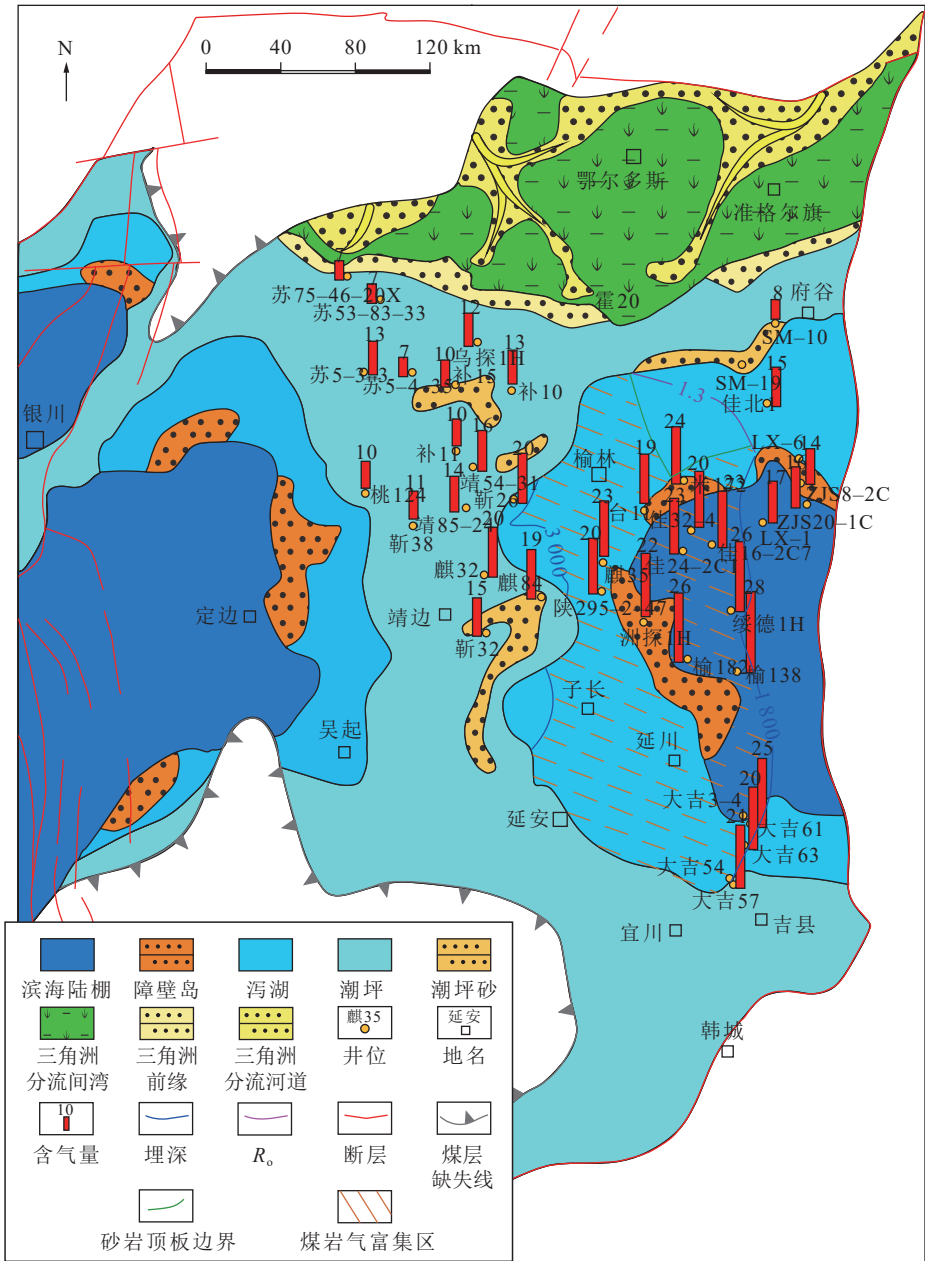


图 15 鄂尔多斯盆地本溪组 8 号煤煤岩气富集区分布
Fig.15 Distribution of coal-rock gas enrichment zones of No. 8 coal of Benxi Formation in Ordos Basin

表 2 鄂尔多斯盆地本溪组煤岩气资源条件评价指标体系

Table 2 Evaluation index system for coal-rock gas resource conditions in Benxi Formation of Ordos Basin

关键参数	好	中	差
厚度/m	>10	4 ~ 10	<4
灰分/%	<20		>20
R_o /%	>1.3	1.0 ~ 1.3	0.65 ~ 1.0
埋深/m	1 800 ~ 3 000	3 000 ~ 3 750	>3 750; 1 500 ~ 1 800
煤、岩组合类型	煤-灰岩、煤-泥岩、煤-灰岩+泥岩	煤-砂岩+泥岩	煤-砂岩

Ⅱ-A 的盖层为灰岩+泥岩，Ⅱ-B 的盖层为泥岩+砂岩。东边的Ⅱ-A 区与西边的Ⅱ-A 区相比，尽管煤层处于快速生气期，但其灰分含量小于 20%，且煤层

厚度大，弥补了变质程度较低带来的资源不足。该区煤岩气资源量为 $13\,680.2 \times 10^8 \text{ m}^3$ ，产出方式与Ⅰ类区一样，但要根据夹矸及储层特征决定是采用穿层

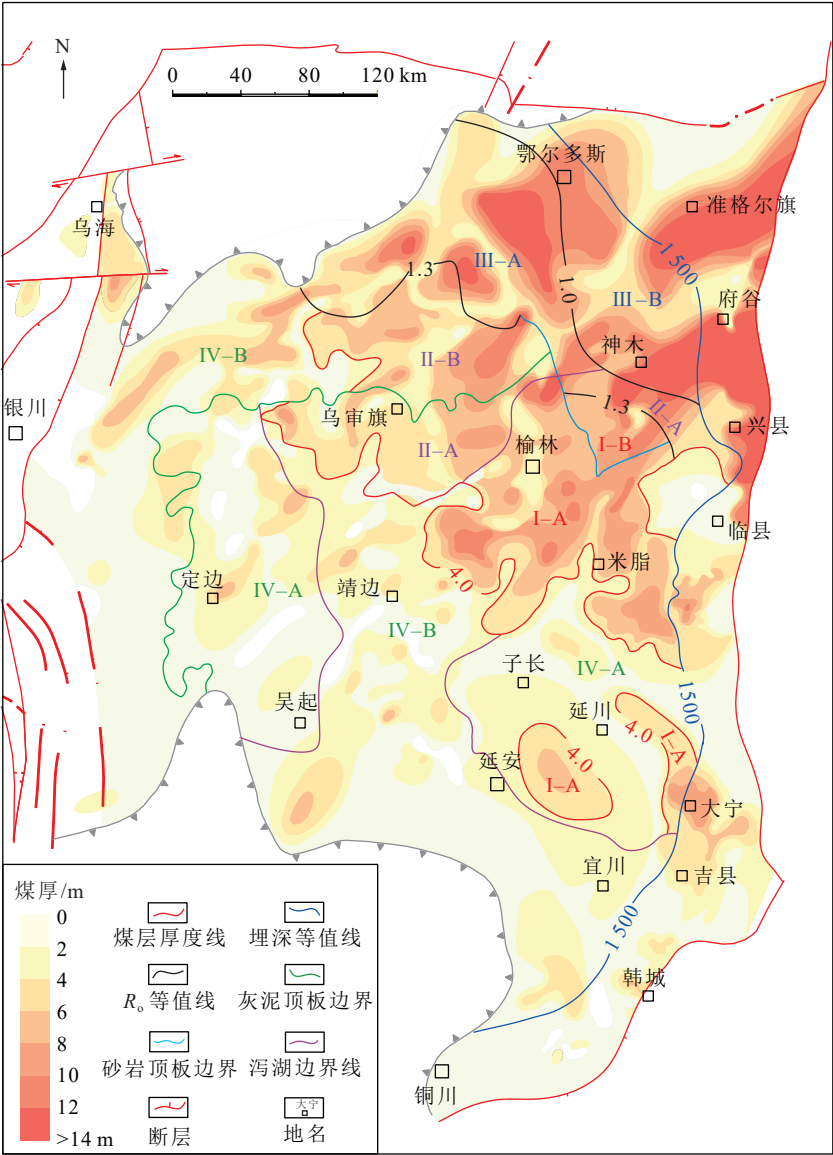


图 16 鄂尔多斯盆地本溪组煤岩气资源条件评价结果

Fig.16 Evaluation results of coal-rock gas resource conditions of Benxi Formation in Ordos Basin

压裂还是分层压裂,开发方式是合层开发还是分层开发。

Ⅲ类区的显著特征是煤层厚度大(整体>10 m),变质程度低($R_o<1.3\%$),盖层条件差(砂岩/砂岩+泥岩),含气量低。该区煤岩宏孔和介孔比例高,含水饱和度比其他几个区要大。Ⅲ-A 与Ⅲ-B 的差别是Ⅲ-A 的煤层处于快速生气期,而Ⅲ-B 则处于生气早期。该区煤岩气资源量为 $22\,977.1\times10^8\text{ m}^3$,产出仍以排水降压为主,但该区煤层厚度大,煤层的射孔及压裂要在有利层段评价及筛选的基础上开展。另外,该区煤层顶板以砂岩为主,存在煤岩气向上运移成藏的可能,因此,应注意煤岩气与致密砂岩气的共采。

Ⅳ类区煤岩变质程度高,但由于煤层厚度小

(<4 m),埋深大,资源条件整体评价最差。Ⅳ-A 与Ⅳ-B 的分区标准是灰分差异,Ⅳ-A 的灰分含量低于Ⅳ-B。该区煤岩气资源量为 $40\,682.2\times10^8\text{ m}^3$,表现为吸附-游离型,游离气比例较高,由于其成藏特征兼具一定的常规油气属性,煤岩气的勘探要重视对圈闭的寻找。该区较小的煤层厚度导致煤岩气单独开发的经济效益低,而较高的游离气比例使其与煤系页岩和致密砂岩共采兼容性更强,因此,该区煤岩气应该以“三气”共采的视角进行勘探开发设计与部署。

5 结 论

1)沉积环境对煤层厚度、结构、煤岩煤质及煤、岩组合的平面分布控制作用显著。泻湖和滨海陆棚

环境煤岩含气量大。成煤环境演化则决定了煤岩煤质的纵向差异分布。开阔水域及低位沼泽,含气量低,高位沼泽含气量大。

2)煤阶不仅控制了煤岩生气强度,而且还影响着煤岩吸附性能及储存空间。随着变质程度的增加,煤岩生气强度加大,吸附性能增强,吸附气量和总气量呈增大趋势。

3)埋藏演化影响下的现今埋深主要影响煤岩气的吸附气和游离气比例,在临界深度以下,随着埋深的增加,游离气的比例增加,总气量有减小的趋势。

4)综合考虑生、储、保的有利条件,明确煤岩气的富集区为榆林到宜川的埋深为1 800~3 000 m的南北条带,平均含气量高达23 cm³/g。

5)盆地本溪组8号煤储层划分为4大类13个小区。Ⅰ类区适合进行整装压裂,产出方式是游离气带动吸附气的降压解吸。Ⅱ类区要根据夹矸及情况决定是合层开发还是分层开发。Ⅲ类区应注意煤岩气与致密砂岩气的共探共采。Ⅳ类区应该以“三气”共采的视角进行勘探开发设计与部署。

参考文献(References):

- [1] 徐凤银,王勃,赵欣,等.“双碳”目标下推进中国煤层气业务高质量发展的思考与建议[J].中国石油勘探,2021,26(3):9-18.
XU Fengyin, WANG Bo, ZHAO Xin, et al. Thoughts and suggestions on promoting high quality development of China's CBM business under the goal of “double carbon” [J]. China Petroleum Exploration, 2021, 26(3): 9-18.
- [2] 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 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, 262.
- [3] 李辛子,王运海,姜昭琛,等.深部煤层气勘探开发进展与研究[J].煤炭学报,2016,41(1):24-31.
LI Xinzi, WANG Yunhai, JIANG Zhaochen, et al. Progress and study on exploration and production for deep coalbed methane[J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(1): 24-31.
- [4] 郭广山,柳迎红,吕玉民.中国深部煤层气勘探开发前景初探[J].洁净煤技术,2015,21(1):125-128.
GUO Guangshan, LIU Yinghong, LYU Yumin. Preliminary exploration and development prospects on deep coalbed methane in China[J]. Clean Coal Technology, 2015, 21(1): 125-128.
- [5] 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.
- [6] 余琪祥,罗宇,曹倩,等.准噶尔盆地东北缘深层煤层气勘探前景[J].天然气地球科学,2023,34(5):888-899.
YU Qixiang, LUO Yu, CAO Qian, et al. Exploration prospect of deep coalbed methane in the northeastern margin of Junggar Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2023, 34(5): 888-899.
- [7] 高丽军,谢英刚,潘新志,等.临兴深部煤层气含气性及开发地质模式分析[J].煤炭学报,2018,43(6):1634-1640.
GAO Lijun, XIE Yinggang, PAN Xinshi, et al. Gas analysis of deep coalbed methane and its geological model for development in Linxing Block[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(6): 1634-1640.
- [8] 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.
- [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] 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.
- [12] 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.
- [13] 郭涛.深部煤层气赋存态及其含量预测模型[D].徐州:中国矿业大学,2021.
GUO Tao. Occurrence and content prediction model of deep coalbed methane[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2021.
- [14] 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,2018.
JIA Xiaobao. Study on physical properties of deep coal reservoirs

- in Daning-Jixian area[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2018.
- [15] 陈刚, 胡宗全. 鄂尔多斯盆地东南缘延川南深层煤层气富集高产模式探讨[J]. 煤炭学报, 2018, 43(6): 1572–1579.
- CHEN Gang, HU Zongquan. Discussion on the model of enrichment and high yield of deep coalbed methane in Yanchuannan area at Southeastern Ordos Basin[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(6): 1572–1579.
- [16] 高向东. 临兴深部煤储层孔渗成因演化机制及压裂可改造性研究[D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2019.
- GAO Xiangdong. Study on genetic evolution mechanism of porosity and permeability and fracturing reconstructability of Linxing deep coal reservoir[D]. Beijing: China University of Mining & Technology, Beijing, 2019.
- [17] 梁冰, 石迎爽, 孙维吉, 等. 中国煤系“三气”成藏特征及共采可能性[J]. 煤炭学报, 2016, 41(1): 167–173.
- LIANG Bing, SHI Yingshuang, SUN Weiji, et al. Reservoir forming characteristics of “the three gases” in coal measure and the possibility of commingling in China[J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(1): 167–173.
- [18] 秦勇, 申建, 沈玉林. 叠置含气系统共采兼容性: 煤系“三气”及深部煤层气开采中的共性地质问题[J]. 煤炭学报, 2016, 41(1): 14–23.
- QIN Yong, SHEN Jian, SHEN Yulin. Joint mining compatibility of superposed gas-bearing systems: A general geological problem for extraction of three natural gases and deep CBM in coal series[J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(1): 14–23.
- [19] 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.
- [20] 康永尚, 邓泽, 皇甫玉慧, 等. 中煤阶煤层气高饱和一超饱和带的成藏模式和勘探方向[J]. 石油学报, 2020, 41(12): 1555–1566.
- KANG Yongshang, DENG Ze, HUANGFU Yuhui, et al. Accumulation model and exploration direction of high-to over-saturation zone of the midium-rank coalbed methane[J]. Acta Petrolei Sinica, 2020, 41(12): 1555–1566.
- [21] 孙粉锦, 周国晓, 田文广, 等. 煤层气系统的定义、内涵、形成及应用: 以鄂尔多斯盆地石炭系: 二叠系煤层为例[J]. 天然气工业, 2024, 44(7): 42–53.
- SUN Fenjin, ZHOU Guoxiao, TIAN Wenguang, et al. Definition, connotation, formation and application of coalbed methane system: A case study on the Carboniferous-Permian coal seams in the Ordos Basin[J]. Natural Gas Industry, 2024, 44(7): 42–53.
- [22] 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.
- [23] 何发岐, 董昭雄, 赵兰, 等. 深部煤层游离气形成机理及资源意义[J]. 断块油气田, 2021, 28(5): 604–608, 613.
- HE Faqi, DONG Zhaoxiong, ZHAO Lan, et al. Formation mechanism and resource significance of free gas in deep coalbed[J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2021, 28(5): 604–608, 613.
- [24] 李国欣, 张水昌, 何海清, 等. 煤岩气: 概念、内涵与分类标准[J]. 石油勘探与开发, 2024, 51(4): 783–795.
- LI Guoxin, ZHANG Shuichang, HE Haiqing, et al. Coal-rock gas: Concept, connotation and classification criteria[J]. Petroleum Exploration and Development, 2024, 51(4): 783–795.
- [25] 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.
- [26] 周立宏, 熊先钺, 丁蓉, 等. 煤岩气内涵、富集机理及实践意义[J]. 天然气工业, 2025, 45(3): 1–15.
- ZHOU Lihong, XIONG Xianyu, DING Rong, et al. Connotation, enrichment mechanism and practical significance of coal-rock gas[J]. Natural Gas Industry, 2025, 45(3): 1–15.
- [27] 牛小兵, 赵伟波, 史云鹤, 等. 鄂尔多斯盆地本溪组天然气成藏条件及勘探潜力[J]. 石油学报, 2023, 44(8): 1240–1257.
- NIU Xiaobing, ZHAO Weibo, SHI Yunhe, et al. Natural gas accumulation conditions and exploration potential of Benxi Formation in Ordos Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2023, 44(8): 1240–1257.
- [28] 杨秀春, 徐凤银, 王虹雅, 等. 鄂尔多斯盆地东缘煤层气勘探开发历程与启示[J]. 煤田地质与勘探, 2022, 50(3): 30–41.
- YANG Xiuchun, XU Fengyin, WANG Hongya, et al. Exploration and development process of coalbed methane in eastern margin of Ordos Basin and its enlightenment[J]. Coal Geology & Exploration, 2022, 50(3): 30–41.
- [29] 江同文, 熊先钺, 金亦秋. 深部煤层气地质特征与开发对策[J]. 石油学报, 2023, 44(11): 1918–1930.
- JIANG Tongwen, XIONG Xianyu, JIN Yiqiu. Geological characteristics and development countermeasures of deep coalbed methane[J]. Acta Petrolei Sinica, 2023, 44(11): 1918–1930.
- [30] 鲁静, 邵龙义, 孙斌, 等. 鄂尔多斯盆地东缘石炭-二叠纪煤系层序-古地理与聚煤作用[J]. 煤炭学报, 2012, 37(5): 747–754.
- LU Jing, SHAO Longyi, SUN Bin, et al. Sequence-paleogeography and coal accumulation of Carboniferous-Permian coal measures in the Eastern Ordos Basin[J]. Journal of China Coal Society, 2012, 37(5): 747–754.

- [31] 李勇. 鄂尔多斯盆地东缘煤层气富集成藏规律研究 [D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2015.
- LI Yong. Study on the law of coalbed methane enrichment and accumulation in the eastern margin of Ordos basin[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2015.
- [32] 赵伟波, 刘洪林, 王怀厂, 等. 煤层微观孔隙特征及沉积环境对孔隙结构的控制作用—以鄂尔多斯盆地 8 号煤层为例[J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(6): 142–154.
- ZHAO Weibo, LIU Honglin, WANG Huaichang, et al. Microscopic pore characteristics of coal seam and the controlling effect of sedimentary environment on pore structure in No. 8 coal seam of the Ordos Basin[J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(6): 142–154.
- [33] LI S, TANG D Z, PAN Z J, et al. Evaluation of coalbed methane potential of different reservoirs in western Guizhou and eastern Yunnan, China[J]. Fuel, 2015, 139: 257–267.
- [34] 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), 2019.
- TAO Chuanqi. Study on the law of deep coalbed methane accumulation in Linxing area, eastern margin of Ordos Basin[D]. Beijing: China University of Mining & Technology, Beijing, 2019.
- [35] 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.
- [36] 范立勇, 周国晓, 杨兆彪, 等. 鄂尔多斯盆地深部煤层气差异富集的地质控制[J]. 煤炭科学技术, 2025, 53(1): 203–215.
- FAN Liyong, ZHOU Guoxiao, YANG Zhaobiao, et al. Geological control of differential enrichment of deep coalbed methane in the Ordos Basin[J]. Coal Science and Technology, 2025, 53(1): 203–215.