

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2026.163>



# 鄂尔多斯盆地宜川地区薄层煤岩气 富集主控因素及有利区评价

崔广智<sup>1</sup>, 张 扬<sup>1\*</sup>, 王珣尧<sup>2</sup>, 于 翔<sup>1</sup>, 迟润龙<sup>1</sup>, 刘 硕<sup>1</sup>

1. 中国石油辽河油田分公司勘探开发研究院, 辽宁盘锦 124010

2. 中国地质大学(武汉)资源学院, 湖北武汉 430074

**摘要:** 鄂尔多斯盆地东南部宜川地区煤岩发育稳定, 但煤层厚度较盆地主体薄. 薄煤岩地质特征及富集规律认识不足, 制约了规模化勘探与开发. 针对本溪组 8<sup>#</sup>煤和山西组 5<sup>#</sup>煤, 利用取心、测井、实验测试等手段, 开展薄煤岩地质特征及富集主控因素研究. 研究表明: (1) 8<sup>#</sup>煤、5<sup>#</sup>煤成熟度高于盆地主体, 为过成熟高阶煤, 镜质组含量高, 生气能力强. 以微孔为主, 割理十分发育. (2) 8<sup>#</sup>煤发育于潮坪-潟湖环境, 煤层连续性好、发育稳定; 5<sup>#</sup>煤形成于三角洲前缘-滨海过渡相环境, 受沉积旋回与砂体叠置影响, 煤层厚度整体减薄. (3) 煤岩含气量高于盆地主体, 8<sup>#</sup>煤平均含气量为 28.8 m<sup>3</sup>/t, 5<sup>#</sup>煤平均含气量为 28.0 m<sup>3</sup>/t, 气体以吸附态为主, 游离气占比约 22%. (4) 在地质和工程等参数约束下, 建立了 I、II、III 类有利区评价标准, 其中 8<sup>#</sup>煤以 II 类有利区为主, 5<sup>#</sup>煤以 III 类有利区为主. 试采实践表明, 在高煤阶、高含气量条件下, 通过水平井与体积压裂技术, 薄煤岩亦可实现高产稳产, 试验水平井井均日产气量可达 2×10<sup>4</sup> m<sup>3</sup>以上. 研究成果表明, 煤层厚度并非煤岩气开发的决定性约束因素, 宜川地区薄层煤岩具备规模开发潜力, 为鄂尔多斯盆地及类似地区煤岩气勘探提供了重要借鉴.

**关键词:** 煤炭; 煤岩气; 储层; 有利区评价; 宜川地区; 鄂尔多斯盆地.

中图分类号: P64

文章编号: 1000-2383(2026)05-1908-16

收稿日期: 2026-03-04

## Main Controlling Factors of Gas Enrichment in Thin Coal Seams and Evaluation of Favorable Zones in Yichuan Area of Ordos Basin

Cui Guangzhi<sup>1</sup>, Zhang Yang<sup>1\*</sup>, Wang Xuniao<sup>2</sup>, Yu Xiang<sup>1</sup>, Chi Runlong<sup>1</sup>, Liu Shuo<sup>1</sup>

1. Exploration and Development Research Institute, PetroChina Liaohe Oilfield Company, Panjin 124010, China

2. School of Earth Resources, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan 430074, China

**Abstract:** Coal seams are laterally stable in the Yichuan area, but generally thinner than those in the main body of the Ordos basin. However, the gas enrichment mechanisms and the geological characteristics of these thin seams are still to be fully elucidated, thereby constraining large-scale development. To bridge this gap, this study integrates core, well log, and laboratory data from the Benxi Formation No.8 coal seam and the Shanxi Formation No.5 coal seam to systematically evaluate the geological characteristics and primary controls on gas accumulation in these atypical thin seams. The results reveal follows. (1) The No.8 and No.5 coal

**基金项目:** 国家重大专项项目“渤海湾超级盆地油气富集规律与新领域勘探技术”(No.2024ZD1400100); 中国石油天然气股份有限公司科技项目“深地煤岩气赋存特征及成藏机理研究”(No.2023ZZ18YJ02).

**作者简介:** 崔广智(1987—), 男, 高级工程师, 地质工程专业, 主要从事综合地质研究及油气勘探开发部署工作. ORCID: 0009-0005-2485-8356. E-mail: cuiguangzhi1@petrochina.com.cn

\* 通讯作者: 张扬, ORCID: 0009-0005-0934-164X. E-mail: zy0110@petrochina.com.cn

**引用格式:** 崔广智, 张扬, 王珣尧, 于翔, 迟润龙, 刘硕, 2026. 鄂尔多斯盆地宜川地区薄层煤岩气富集主控因素及有利区评价. 地球科学, 51(5): 1908—1923.

**Citation:** Cui Guangzhi, Zhang Yang, Wang Xuniao, Yu Xiang, Chi Runlong, Liu Shuo, 2026. Main Controlling Factors of Gas Enrichment in Thin Coal Seams and Evaluation of Favorable Zones in Yichuan Area of Ordos Basin. *Earth Science*, 51(5): 1908—1923.

seams exhibit elevated higher thermal maturity than those in the main basin, representing over-mature, high-rank coals with high vitrinite content and robust gas generation potential. The pore system is dominated by micropores, and cleats are highly developed. (2) The No.8 seam deposited in a tidal flat-lagoon environment, displays good continuity and stable thickness. In contrast, the No.5 coal seam formed in a delta front-coastal transitional environment, where its overall thickness is reduced due to the influence of sedimentary cycles and sandbody stacking. (3) The gas content of these coals is higher than the main basin. The average gas contents of the No.8 and No. 5 coal seams are  $28.8 \text{ m}^3/\text{t}$  and  $28.0 \text{ m}^3/\text{t}$ , respectively. The gas exists primarily in an adsorbed state, with free gas accounting for approximately 22%. (4) Based on geological and engineering parameters, evaluation criteria for Class I, II, and III favorable areas were established. The No.8 coal seam is dominated by Class II favorable area, whereas the No.5 coal seam is predominantly characterized by Class III favorable area. Pilot production practices demonstrate that under conditions of high coal rank and high gas content, thin coal seams can also achieve high and stable yields through the application of horizontal drilling and stimulated reservoir volume fracturing technologies. The average daily gas production of the pilot horizontal wells exceeds  $2 \times 10^4 \text{ m}^3$ . These findings demonstrate that coal seam thickness is not the determining constraint for coal seam gas development. The thin coal seams in the Yichuan area possess significant potential for large-scale development, providing an important reference for coal seam gas exploration in the Ordos basin and other analogous regions.

**Key words:** coal; coal-rock gas; reservoirs; evaluation of favorable zone; Yichuan area; Ordos basin.

随着我国油气勘探向深层、非常规领域进军,鄂尔多斯盆地深层煤岩气(埋深 $>1500 \text{ m}$ )已成为继致密气、页岩油之后的战略性接替领域(徐凤银等,2023;Li *et al.*, 2025).煤岩气作为介于煤层气与页岩气之间的一类特殊非常规天然气资源(赵伟波等,2024),是一种以中高阶煤岩自身生成或从其他气源运移而赋存于煤岩储层中,通过储层改造可快速产气并能规模开采的烃类气体(赵喆等,2024,2026).近年来,鄂尔多斯盆地大宁-吉县、神府、纳林河等区块相继获得重大勘探突破,证实了深层煤岩气规模开发的可行性(Shi *et al.*, 2024;李国欣等,2024;邓泽等,2025;伊伟等,2025),也推动对深层煤岩气富集机理与成藏规律的深入研究.与浅层煤层气相比,深层煤岩气在高温高压及高吸附性的多重因素耦合下(秦勇,2023),呈现出游离气与吸附气并存,富含游离气的复杂赋存状态(李国欣等,2024;邓泽等,2025),其富集过程受到沉积、构造、煤质与成烃-储集条件等多因素的共同控制(李国欣等,2024;周立宏等,2024;何智同等,2026).

本溪组 $8^{\#}$ 煤与山西组 $5^{\#}$ 煤是鄂尔多斯盆地煤岩气的两套主力煤层,厚度大、分布广、连续性好,是目前深层煤岩气勘探的核心目的层系(喻健等,2025;Li *et al.*, 2026;杨智等,2026).然而,位于盆地东南缘的宜川地区,受沉积相带变化与成煤旋回控制(伊伟等,2025),本溪组 $8^{\#}$ 煤与山西组 $5^{\#}$ 煤单层厚度普遍偏薄,多在 $2\sim 4 \text{ m}$ .相较于厚层煤岩气,薄层煤岩横向变化快、纵向非均质性强,厚度预测精度低,有效储层的精细识别与空间刻画难度极大;此外,薄层条件下煤岩总

生气量有限,游离气与吸附气的赋存比例、含气量分布规律及其主控因素尚不明确,含气性定量评价体系尚不成熟.上述难点相互叠加,导致薄层煤岩气的富集规律认识不清、有利靶区难以有效圈定,严重制约了该类资源的规模勘探部署.为此本文基于岩心实验、测井解释与地震资料,开展薄层煤岩储层特征、含气性评价与富集主控因素分析,建立适用于薄层煤岩气的有利区综合评价体系,为宜川地区薄层煤岩气勘探部署提供地质依据,同时为鄂尔多斯盆地乃至类似地质条件下薄层煤岩气的勘探评价提供参考与借鉴.

## 1 区域地质背景

鄂尔多斯盆地位于华北克拉通西部,东连吕梁山,西至腾里格沙漠,北起阴山,南至秦岭,整体呈北北东向展布的稳定台内构造格局(高云飞,2020).盆地内部根据构造样式可划分为六个一级构造单元,包括西部的天环坳陷和西缘逆冲带、中部的伊陕斜坡、东部晋西挠褶带,以及北部伊盟隆起与南部渭北隆起(图1).其中伊陕斜坡构造稳定、断裂发育弱,是鄂尔多斯盆地深层煤岩气的重要富集区.宜川地区位于伊陕斜坡东南部,为东高西低的平缓单斜构造,整体构造简单,有利于煤岩气的聚集与保存.

研究区内上古生界自下而上发育石炭统本溪组、下二叠统太原组、山西组及中二叠统石盒子组,构成鄂尔多斯盆地东南部深层煤系的重要沉积序列.在本溪组-太原组沉积期,海水由盆地东西两侧侵入中央古隆起,形成广阔的陆表海环境.本溪组

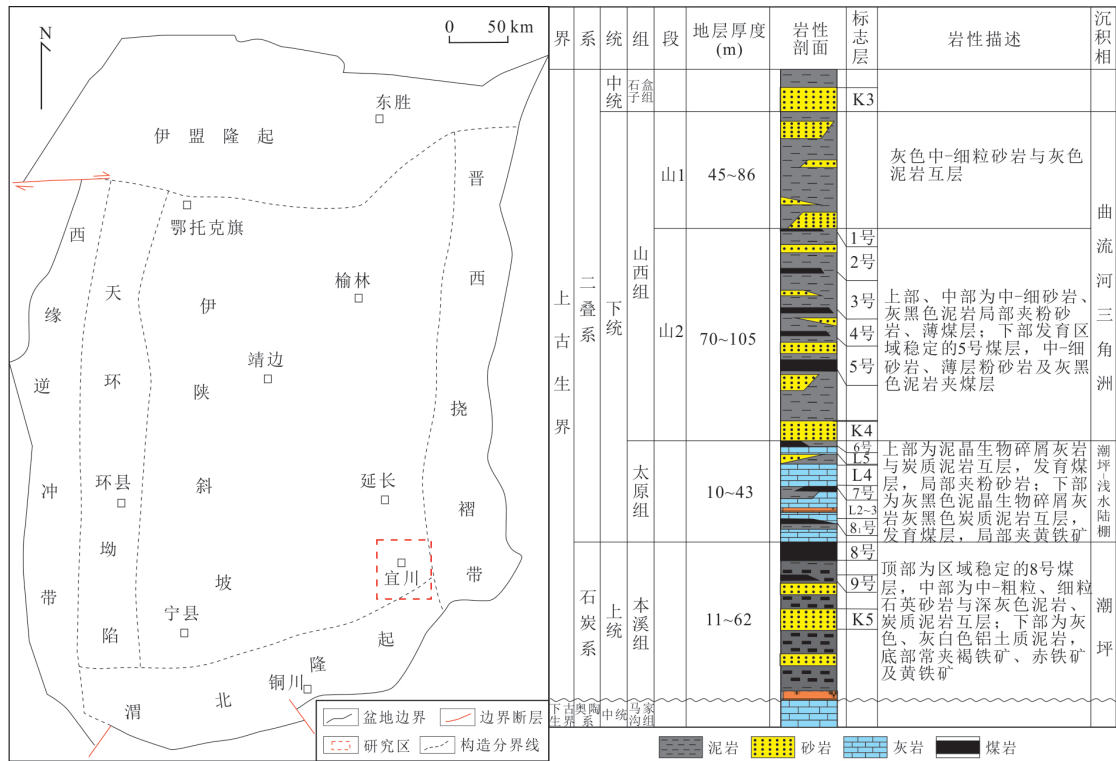


图 1 研究区构造位置和上古生界地层特征

Fig.1 Structural position and Upper Paleozoic strata characteristics of the study area

沉积期潮坪-潟湖相分布广泛,水体深度浅、能量低,再加上区域构造活动弱、沉积速率稳定,使泥炭得以多旋回堆积,形成了厚度较大、分布连续的区域性8<sup>#</sup>煤层(王若谷等,2021).山西组沉积期则经历了从由滨浅海向陆相三角洲的逐渐转变的过程,反映了华北地块在兴蒙海槽海西晚期闭合后整体抬升的区域构造变化.尤其在鄂尔多斯盆地东南部地区,山西组沉积普遍呈现陆相三角洲-滨海过渡相的特点(王译羚等,2025).研究区位于南北物源过渡带,为典型的三角洲前缘-滨海沉积相(匡立春等,2020).山西组自下而上划分为山2段和山1段:山2段沉积期构造作用强烈,气候温暖潮湿,受快速海侵和海退的影响,河间洼地普遍发育沼泽,形成了一套“煤-泥-砂”多旋回叠置体系,是研究区5<sup>#</sup>煤层的主要成煤时期;山1段沉积期,盆地进入相对稳定沉降阶段,主要发育缓坡性曲流河三角洲沉积体系(郭艳琴等,2019;赵振宇等,2012),为煤岩气储层的发育与含气性差异提供了重要的沉积基础.

前人研究表明,鄂尔多斯盆地本溪组8<sup>#</sup>煤、山西组5<sup>#</sup>煤广泛发育,8<sup>#</sup>煤厚度平均值为7.8 m,5<sup>#</sup>煤厚度平均值为4.2 m.煤岩宏观煤型均以光亮煤和半亮煤为主,煤岩结构以原生结构为主.煤

岩有机质丰度高、显微组分以镜质组为主,生气能力强.煤岩储层储集性能好,8<sup>#</sup>煤平均孔隙度为6.3%,平均渗透率为 $2.21 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ;储集空间以有机质微孔为主,占比约为70%,宏孔和割理裂缝大量发育,为游离气提供了大量富集场所(范立勇等,2024;周立宏等,2025;何智同等,2026).

## 2 煤岩储层精细表征

### 2.1 煤岩煤质特征

(1)宏观煤岩特征.煤岩结构类型对储层压裂可改造性具有重要影响,原生结构煤岩完整性较好,孔隙、裂缝系统相对发育,脆性系数较高,压裂时易形成贯通性良好的缝网;而碎裂结构煤岩因受构造作用破坏,煤体破碎严重,压裂过程中裂缝易沿破碎带无序延伸,难以形成有效渗流通道(李小刚等,2024).宜川地区宏观煤岩类型主要为光亮煤和半亮煤,局部为半暗煤和暗煤.光亮煤呈金属或玻璃光泽,断口多表现为阶梯状或贝壳状结构,反映其镜质组含量高、原生组织保存完好.从煤岩结构类型上看,研究区煤岩结构以原生结构煤与轻度碎裂煤为主(图2),较易形成复杂压裂网,为煤岩气开发提供有利条件.

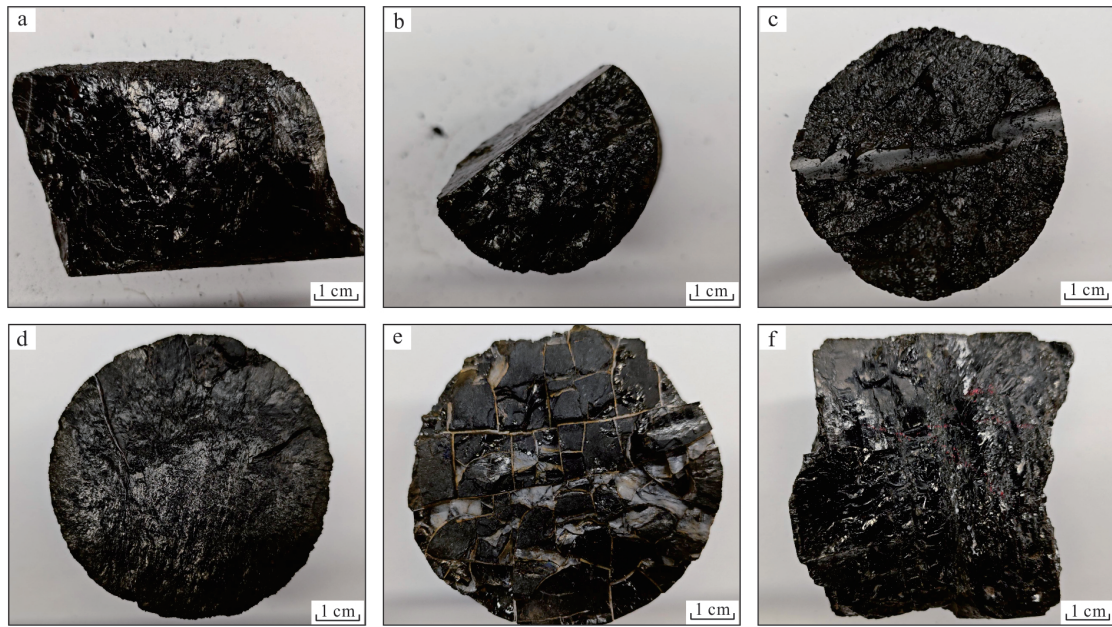


图2 宜川地区煤岩岩心照片

Fig.2 Photographs of coal cores in the Yichuan area

a.Y23-56X8井,2 345.0 m,山西组 5<sup>#</sup>煤,光亮煤,原生结构;b.Y23-56X8井,2 346.0 m,山西组 5<sup>#</sup>煤,光亮煤,原生结构;c.Y23-56X6井,2 245.3 m,山西组 5<sup>#</sup>煤,半亮煤,原生结构;d.Y23-56X7井,2 296.5 m,本溪组 8<sup>#</sup>煤,半亮煤,原生结构;e.Y116-1井,2 253.6 m,本溪组 8<sup>#</sup>煤,半暗煤,原生结构,割理发育,充填有方解石;f.Y23-56X6井,2 287.0 m,本溪组 8<sup>#</sup>煤,光亮煤,原生结构

表1 宜川地区煤岩工业组分数据

Table 1 Proximate analysis of coals in the Yichuan area

工业组分	本溪组 8 <sup>#</sup> 煤	山西组 5 <sup>#</sup> 煤
固定碳	67.37%~85.37%,平均值为 76.36%	71.36%~84.20%,平均值为 77.61%
灰分	6.95%~23.20%,平均值为 14.69%	7.01%~19.66%,平均值为 13.20%
水分	0.58%~1.65%,平均值为 0.91%	0.73%~1.84%,平均值为 1.19%
挥发分	6.67%~12.02%,平均值为 8.07%	7.04%~8.53%,平均值为 8.01%

(2)显微组分.煤岩显微组分是煤岩吸附气富集的重要物质基础,镜质组越丰富,煤岩具越高的比表面积与微孔体积,吸附气越富集(邓泽等,2022;罗京等,2025;任鹏飞等,2025).显微组分统计显示,研究区 8<sup>#</sup>煤有机组分含量高,平均达 93.0%,其中镜质组含量平均值为 84.7%;5<sup>#</sup>煤有机组分平均值为 92.1%,镜质组含量约为 79.4%.两套煤层均以镜质组为主,惰质组含量较低,这类高镜质组煤具有较强的生气能力.

(3)工业组分.工业组分是煤岩最基本的物质表征,综合反映了煤岩在沉积成岩过程中的古环境演化与物质富集规律,决定了煤岩气的开发潜力.宜川地区煤岩工业组分测试结果表明(表1),煤岩整体表现为高固定碳、低水分、低灰分、低挥发分的工业组分特征,具有较强的吸附甲烷能力、稳定的孔隙结构和良好的保存条件,与盆地主体深层煤岩特征一致.

(4)煤阶特征.煤阶用于表征煤岩热演化程度,基于镜质体反射率( $R_o$ )划分为低阶煤( $R_o < 0.65\%$ )、中阶煤( $0.62\% < R_o < 2.0\%$ )和高阶煤( $R_o > 2.0\%$ ),煤岩煤阶越高,生烃能力越强.低阶煤几乎不生烃,中阶气煤、肥煤主要以生油为主,在焦煤阶段开始大量生气,以干气为主;演化至高阶贫煤、无烟煤,煤岩生油逐渐减少,持续大规模生成干气,且生气能力增强(戴金星和戚厚发,1981).鄂尔多斯盆地在早白垩世构造热事件后整体地温梯度升高,导致煤岩热演化显著增强,除去盆地东北部煤岩热演化程度低之外,山西组和本溪组煤岩整体热演化度都达到了中、高阶煤.平面上,热演化程度表现为南高北低,与伊陕斜坡构造背景及深层埋藏过程一致(任战利等,2017;范文田等,2019).宜川地区镜质体反射率( $R_o$ )测试结果显示,8<sup>#</sup>煤  $R_o$  为 2.51%~3.18%,平均值为 2.93%;5<sup>#</sup>煤  $R_o$  为 2.47%~2.97%,平均值为 2.80%,

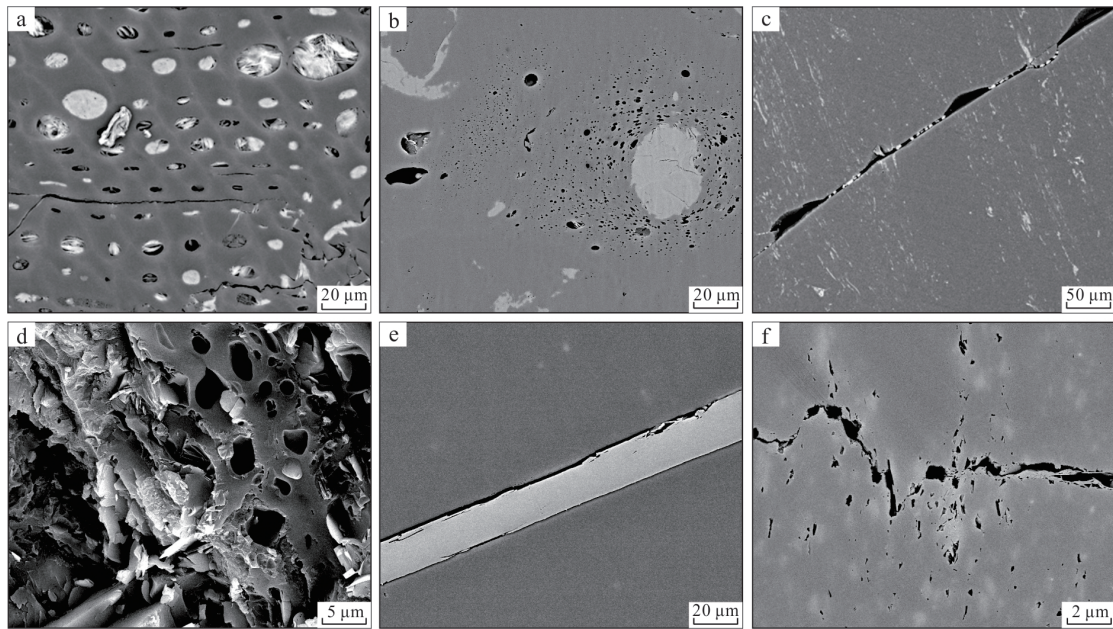


图3 宜川地区煤岩储层微观特征

Fig.3 Microscopic reservoir characteristics of coal rocks in the Yichuan area

a.YQ1井,1 976.1 m,本溪组8<sup>#</sup>煤,有机质孔发育,部分被黏土矿物充填;b.Y23-56X6井,2 285.83 m,本溪组8<sup>#</sup>煤,组织孔集群分布,气孔孤立状分布;c.YQ19井,2 257.32 m,本溪组8<sup>#</sup>煤,微裂缝发育;d.Y23-56X6井,2 246.0 m,山西组5<sup>#</sup>煤,有机质孔发育,充填高岭石等黏土矿物;e.Y23-56X6井,2 241.8 m,山西组5<sup>#</sup>煤,微裂缝被黏土矿物充填,残余有机质边缘缝;f.Y23-56X6井,2 243.2 m,山西组5<sup>#</sup>煤,有机质孔与微裂缝连通

均达到高阶无烟煤阶段.高演化、高镜质组、低挥发分的煤质特征决定了研究区煤岩以生干气为主,并具备较强的吸附能力与储气能力.

## 2.2 储集空间特征

煤岩的储集空间主要为基质孔隙和裂缝,基质孔隙可分为有机质孔和无机矿物孔两类.有机质孔包括气泡孔、残留植物组织孔;无机质孔包括晶间孔、粒间孔、粒内孔等.裂缝主要为煤岩内生割理和外力作用形成的微裂缝(赵喆等,2024).煤岩储层微孔主导吸附气赋存空间,决定煤岩储层中吸附气量,宏孔及微裂缝主导游离气赋存空间,在保存条件良好的前提下,宏孔及微裂缝越发育则游离气含量越高(朱文涛等,2024).

(1)基质孔隙结构特征.宜川地区8<sup>#</sup>煤和5<sup>#</sup>煤岩孔隙类型主要以残留植物组织孔(图3b)和有机质气泡孔为主(图3a,3d),部分孔隙被黏土矿物和黄铁矿充填.通过CO<sub>2</sub>、N<sub>2</sub>吸附与高压压汞联合测试,开展煤岩基质孔隙结构表征,其中微孔(<2 nm)占比最高,平均占比为84.5%,其次为宏孔(>50 nm),占比为14%,介孔(2~50 nm)最少,占比为1.5%,表明煤岩孔隙结构具有微孔、宏孔为主的特征.

(2)裂缝发育特征.裂缝系统是深层煤岩游离气与解吸气的重要流动通道,其发育程度直接

影响煤岩渗透性(刘翰林等,2026).宏观上,宜川地区8<sup>#</sup>煤与5<sup>#</sup>煤岩心截面上可见大量割理和裂缝,呈线状、网状展布特征.微观上,8<sup>#</sup>煤和5<sup>#</sup>煤储层微裂缝皆十分发育(图3c,3f),部分微裂缝存在矿物充填(图3e).微裂缝密度统计显示,光亮煤微裂缝平均112条/9 cm<sup>2</sup>,半亮煤微裂缝平均83条/9 cm<sup>2</sup>,半暗煤和暗煤微裂缝平均35条/9 cm<sup>2</sup>,表明煤岩微裂缝的发育与煤岩宏观煤型存在一定的相关性,即宏观煤型越好,微裂缝越发育.

(3)煤岩物性特征.目前一般采用煤岩压汞、氦密度法、密度法和测井等手段来获取煤层孔隙度.通过岩心氦气法测试,宜川地区8<sup>#</sup>煤测试孔隙度为1.86%~8.14%,平均值为4.93%;5<sup>#</sup>煤测试孔隙度为3.10%~6.75%,平均值为4.86%,整体上都属于低孔隙度储层.8<sup>#</sup>煤测试渗透率为0.013~0.401 mD,平均值为0.152 mD;5<sup>#</sup>煤测试渗透率为0.007~0.660 mD,平均值为0.297 mD,均为特低渗透率储层.深层煤岩由于高热演化作用,基质孔隙多为微孔,渗透率较低,但裂缝发育可显著改善渗透性能.因此,研究区煤岩储层呈典型的“微孔控储、裂缝控流”特征,对后期储层压裂改造与产能释放具有一定的控制作用.

### 3 成煤环境与煤岩厚度平面展布

#### 3.1 成煤环境

成煤环境是影响煤岩厚度、煤岩品质的直接因素之一,煤相分析是被广泛用来研究成煤环境的常用方法(李勇等,2026),目前常用的煤相参数有结构保存指数(TPI)、凝胶化指数(GI)、地下水流动指数(GWI)、植被指数(VI)等,本文研究主要选取TPI和GI进行表征.TPI主要表征成煤植物体遭受搬运及氧化作用的程度,TPI值越高,成煤植物结构保存越好.GI用于表征植物遗体遭受凝胶化作用的程度,凝胶化作用越强,越有利于形成厚度大、品质好的煤岩.TPI、GI计算公式如下:

结构保存指数(TPI)=

$$\frac{\text{镜质结构体} + \text{胶质结构体} + \text{丝质体} + \text{半丝质体}}{\text{碎屑镜质体} + \text{凝胶镜质体} + \text{惰质碎屑体} + \text{粗粒体}}$$

凝胶化指数(GI)=

$$\frac{\text{粗粒体} + \text{镜质组}}{\text{丝质体} + \text{半丝质体} + \text{惰质碎屑体}}$$

宜川地区GI值主要分布于5~20、TPI值主要分布于0.5~2,反映了研究区成煤植物主要为草本和木本植物,成煤环境为水体较深、强还原的沼泽环境(图4).不同煤相对应一定的沉积环境、成煤植被及煤岩特征,根据宜川地区TPI-GI相图,研究区成煤环境以覆水森林沼泽相和深水草本沼泽相为主,其中8<sup>#</sup>煤少量为湿地草本沼泽相,5<sup>#</sup>煤少量为湿地森林沼泽相.覆水森林沼泽相、深水草本沼泽相反映水体较深的还原沉积环境,植物碎屑供给充足,促使煤岩显微组分以镜质体为主,有利于形成光亮煤和厚煤层(范立勇等,2024;邵龙义等,2026;李勇等,2026).此外,两套煤岩存在一定差异,TPI-GI相图反映8<sup>#</sup>煤沉积水体较5<sup>#</sup>煤更深,8<sup>#</sup>煤成煤植物中草本植物占比较5<sup>#</sup>煤更高.总体而言,宜川地区成煤环境以较深、还原性的水体环境为主,成煤植物供给充足,镜质组含量高,为优质煤岩的生成提供了良好条件.

两套煤岩受控于不同的沉积构造背景,在煤相分布平面展布具有显著差异.宜川地区本溪组8<sup>#</sup>煤(图5a)较浅覆水森林沼泽相在研究区内呈大面积连续分布,主要集中于研究区中部、东部和南部的大部分区域,是该区主体成煤背景;较深覆水森林沼泽相呈孤岛状分布于浅水相内部,整体分布范围较局限,未形成大面积连片,反映这些位置可能存在古地貌微洼陷或沉降中心;深水草本沼泽相主要分布在研

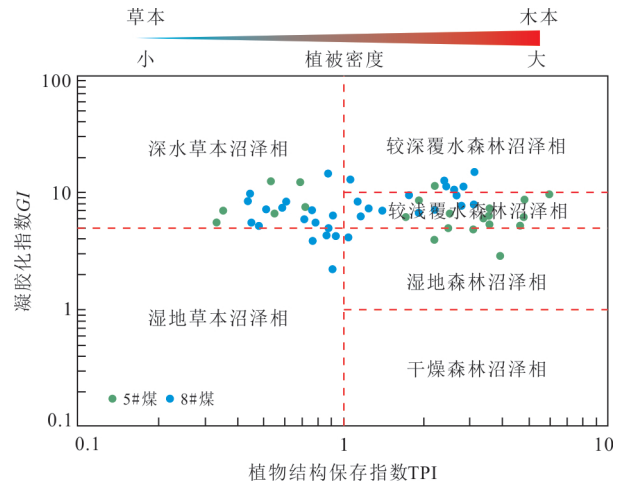


图4 宜川地区煤岩TPI-GI煤相图(据邵龙义等,2026,有修改)

Fig.4 Coal facies diagram of TPI-GI for coal rocks in Yichuan area (modified from Shao *et al.*, 2020)

究区东西两侧,在西部呈带状展布,指示了研究区东西部边缘的水体深度显著大于中部区域,成煤植物以耐深水的草本植物为主.总体而言,本溪组8<sup>#</sup>煤展布特征揭示了研究区8<sup>#</sup>煤成煤期整体水体较浅且稳定,但向西部边缘水体逐渐变深、植被类型由木本向草本演替的古地理格局,这与本溪组处于海侵高峰-海退初期的潮坪-潟湖宏观沉积背景高度一致.

相比之下,山西组5<sup>#</sup>煤层(图5b)的煤相展布呈现更强的相带分异性,深水草本沼泽相以中西部的条带状展布和中东部的大面积连续分布为主,反映其成煤期研究区存在明显的南北向深水凹陷带,水体较深且波动频繁;较浅覆水森林沼泽相与深水草本沼泽相交替分布,发育于研究区的东南部、正南部以及西北部局部区域,表明这些区域成煤期水位相对较浅,主要生长木本植物;较深覆水森林沼泽相分布少,零星散布.这种相带分布组合反映了5<sup>#</sup>煤形成于频繁的海退-海侵旋回影响下的三角洲-潮坪沉积体系,水位变化较大,成煤环境在浅水森林与深水草本之间反复切换,沉积环境的变化显著强于8<sup>#</sup>煤,导致5<sup>#</sup>煤内部存在多旋回结构,“煤-泥-砂”叠置现象普遍.

#### 3.2 煤岩厚度展布

煤相展布特征揭示了成煤环境的差异,从根本上制约了主力煤层的空间连续性与厚度展布规律.基于成煤环境的定性分析,利用测井精细解释手段对煤岩厚度进行了定量表征,系统揭示了不同成煤背景下厚度分布的差异.在岩心标定基础上建立了

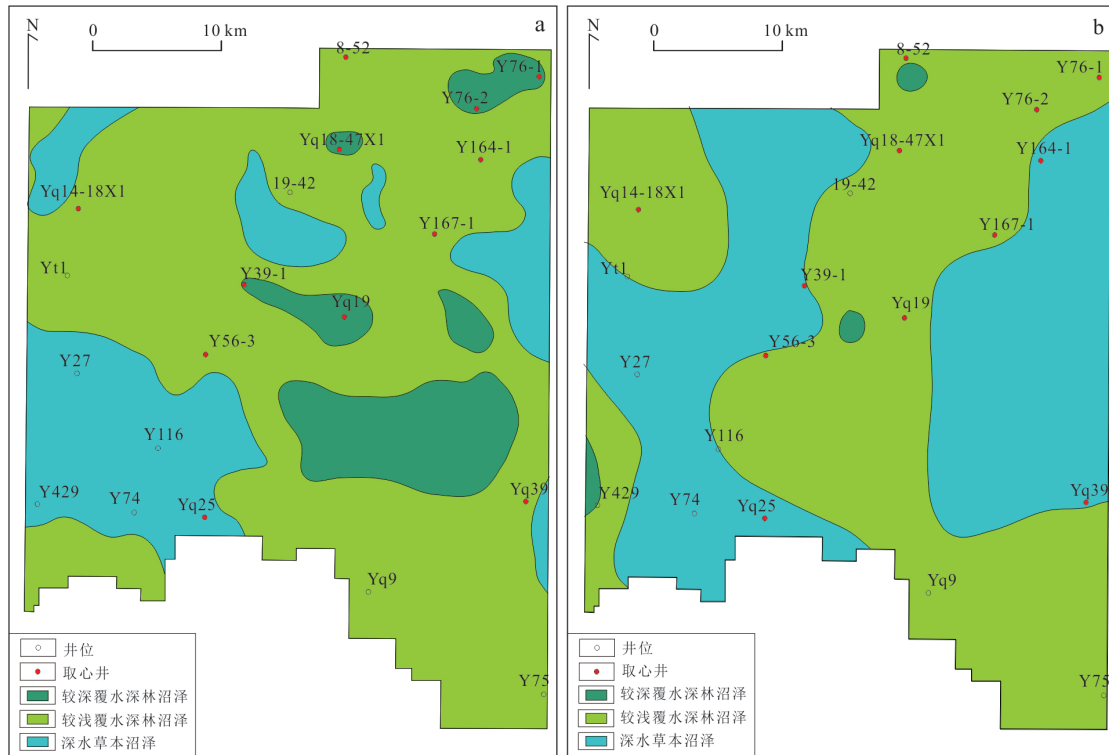


图 5 宜川地区本溪组 8<sup>#</sup>煤(a)与山西组 5<sup>#</sup>煤(b)煤相分布

Fig.5 Distribution of coal facies of the No.8 coal seam in the Benxi Formation (a) and the No.5 coal seam in the Shanxi Formation (b) in the Yichuan area

表 2 鄂尔多斯盆地宜川地区不同岩性测井识别标准

Table 2 Logging identification criteria for different lithologies in the Yichuan area, Ordos basin

岩性	DEN(g/cm <sup>3</sup> )	GR(API)	RT(Ω·m)	CNL(P.U.)	AC(μs/m)
煤岩	1.20~1.70	20~120	400~100 000	35~55	330~500
灰岩	2.60~2.75	20~80	2 000~70 000	0~7	150~200
砂岩	2.40~2.70	50~120	20~400	7~20	190~250
泥岩	2.55~2.71	130.0~200	10~200	12~32	210~240

研究区煤岩、砂岩、泥岩及灰岩的测井识别标准(表 2)。煤岩具有低 GR、低 DEN、高 RT、高 CNL、高 AC 的典型特征(图 6), 与非煤岩差异明显, 而煤岩夹矸则在 GR 和 DEN 上显著增大, 并伴随声波时差与中子降低(李明宅等, 2024)。利用测井资料精细解释研究区 230 余口完钻井煤岩净煤厚, 结果显示宜川地区 8<sup>#</sup>煤净垂厚为 0.9~9.5 m, 主体分布在 2.0~5.0 m, 平均值为 4.0 m; 5<sup>#</sup>煤净垂厚为 0.45~6.0 m, 主体厚度为 2.0~4.0 m, 平均值为 3.0 m。相较于鄂尔多斯盆地主体本溪组 8<sup>#</sup>煤厚度(平均值为 7.8 m)偏薄(喻健等, 2025)。

基于煤相平面特征, 结合测井煤岩识别绘制了煤岩厚度平面图。其结果显示 8<sup>#</sup>煤整体厚度大于 5<sup>#</sup>煤, 连续性强。8<sup>#</sup>煤呈现出广泛发育、连片增厚、局部

受限的特征, 其厚值区高度集中于研究区东部及中东部, 呈大面积连片展布(图 7a)。呈现出的东厚西薄格局与前述潮坪-潟湖背景下稳定、低能的覆水森林沼泽相分布高度契合。成煤期稳定的水体环境与东高西低的古地貌(牛小兵等, 2024)保障了泥炭积累的持续性, 使得 8<sup>#</sup>煤在海侵高峰至海退初期的滞水沉积体系中实现了规模化聚积, 西部的减薄对应了水体加深导致的草本沼泽相。整体而言, 8<sup>#</sup>煤均质性强、连续性好的厚度分布, 为其形成规模化深层煤岩气储层奠定了物质基础。相比之下, 山西组 5<sup>#</sup>煤岩厚度展布表现出更强的条带状分异与多中心聚积特征, 厚值中心呈近南北向条带状贯穿研究区中西部, 而向东西两侧减薄(图 7b), 主要对应于前

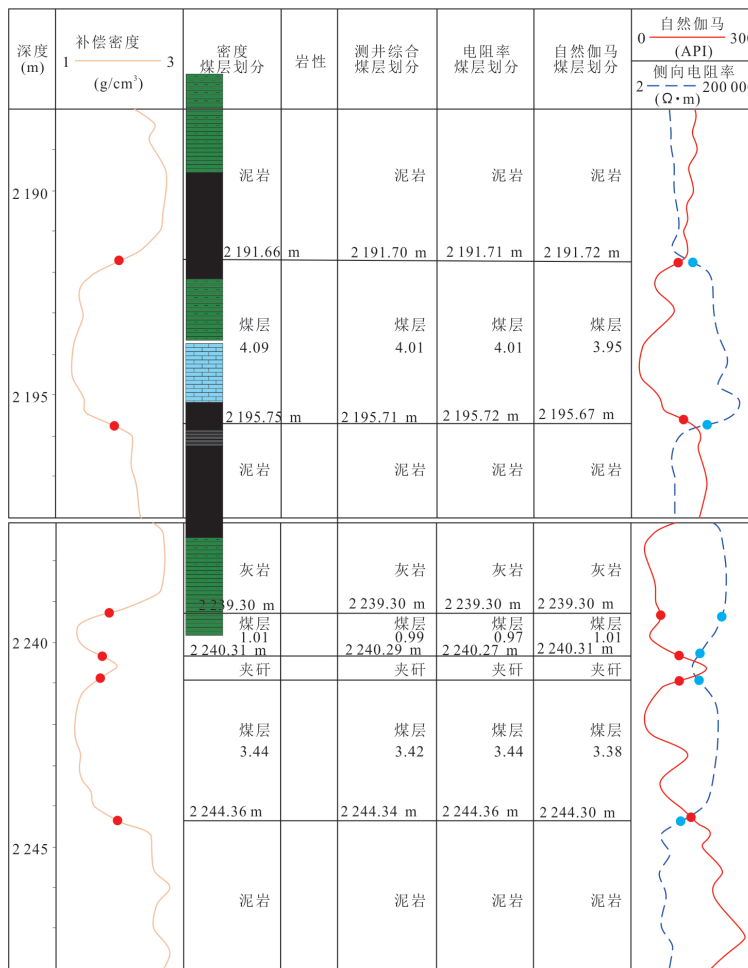


图 6 Y156-2井煤岩综合测井柱状图

Fig.6 Composite well log of coal seams in Well Y156-2

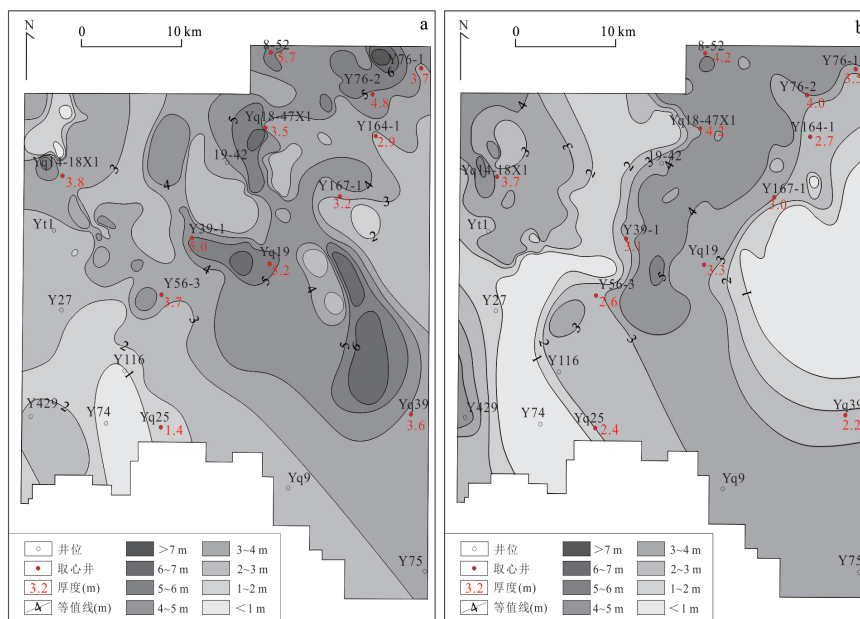


图 7 宜川地区本溪组 8#煤(a)与山西组 5#煤(b)厚度等值线

Fig.7 Isopach maps of the No.8 coal seam in the Benxi Formation (a) and the No.5 coal seam in the Shanxi Formation (b) in the Yichuan area

述南北向的深水草本沼泽相。煤岩厚度分布受控于山 2 段频繁海侵-海退旋回与三角洲砂体反复叠置,成煤的沼泽环境呈现“多旋回发育-间歇性聚积”的特征,厚度增大区通常对应三角洲前缘滞水洼地或河间洼地,泥炭积累环境持续;而厚度减薄区多处于微隆部位或砂体作用强烈区域。

综合两套煤岩厚度展布特征可见,成煤环境是决定煤岩厚度变化的主控因素:8<sup>#</sup>煤受潮坪-潟湖稳定环境控制,厚度连续、范围广;5<sup>#</sup>煤受三角洲前缘迁移控制更显著,厚度变化多中心化,空间差异更强。成煤体系类型和古地貌格局共同主导了煤岩厚度的广覆式发育及局部变薄特征,厚度分布为后续煤岩气富集区预测的重要地质依据。

## 4 含气量与富集主控因素

### 4.1 含气量及赋存特征

通过现场保压及绳索取心含气量测试,研究区本溪组 8<sup>#</sup>煤含气量为 24.3~33.8 m<sup>3</sup>/t,平均值为 28.8 m<sup>3</sup>/t;5<sup>#</sup>煤含气量为 24.2~31.4 m<sup>3</sup>/t,平均值为 28.0 m<sup>3</sup>/t,较鄂尔多斯盆地主体含气量(平均约 20 m<sup>3</sup>/t)高(李明宅等,2024)。两套煤岩的含气饱和度高达 71%~100%,处于高度饱和状态,与鄂尔多斯盆地主体煤岩气储层的普遍特征一致。因此,宜川地区煤岩厚度虽薄,但是整体含气量高,具备形成规模化煤岩气藏的资源潜力。

利用实测含气量与测井参数开展相关性分析,以 GR 和 DEN 曲线建立含气量多元回归模型如下:

本溪组 8<sup>#</sup>煤:  $C_{ad}=59.454\ 5-0.071\ 2\times GR-17.335\times DEN$  ( $R^2=0.89$ ),

山西组 5<sup>#</sup>煤:  $C_{ad}=74.247\ 4-0.051\ 8\times GR-28.889\ 6\times DEN$  ( $R^2=0.92$ )。

基于上述模型预测了 230 余口井均含气量,结果显示 8<sup>#</sup>煤含气量为 23.4~31.3 m<sup>3</sup>/t,平均值为 26.5 m<sup>3</sup>/t,误差平均值为 3.8%;5<sup>#</sup>煤含气量为 22.6~31.1 m<sup>3</sup>/t,平均值为 25.4 m<sup>3</sup>/t,误差平均值为 4.7%(表 2)。平面上呈现由北向南递减趋势,含气量高值区主要分布在东北部和西北部地区(图 8)。

与中浅层煤岩储层中以吸附气为主赋存状态不同,深层煤岩中游离气占比明显增加,表现为吸附气和游离气形式共存,如在鄂尔多斯盆地东缘深层煤岩中游离气平均可达 20%(李明宅等,2024;田文广等,2025)。游离气与吸附气的比例及其转化还受控于地层温压、应力及构造条件等多因素等影响(秦勇,2023;唐书恒等,2025)。宜川地区本溪组 8<sup>#</sup>煤层埋深为 1 840~2 500 m,平均值为 2 165 m,山西组 5<sup>#</sup>煤层埋深 1 800~2 450 m,平均值为 2 122 m,整体埋深及温压条件有利于吸附气向游离气转化(邓泽等,2025)。为了定量表征宜川地区煤岩气中游离气含量及占比,开展了现场取心游离气测试,结果表明 8<sup>#</sup>煤游离气含量为 2.6~9.87 m<sup>3</sup>/t,平均值为 5.74 m<sup>3</sup>/t,游离气占比为 12.5%~43.6%,平均占比为 22.2%;5<sup>#</sup>煤游离气含量为 2.2~10.9 m<sup>3</sup>/t,平均值为 5.26 m<sup>3</sup>/t,游离气占比为 11.5%~36.8%,平均占比为 21.8%。两套薄煤岩游离气平均占比与鄂尔多斯盆地整体基本一致,进一步揭示了宜川地区深层煤岩气具备良好的资源潜力。煤岩储层的高游离气占比,决定了煤岩气开井投产即见气的生产特征,也为其高效开发提供了重要基础保障。

表 3 宜川地区煤岩实测含气量与测井计算含气量对比表

Table 3 Comparison between measured gas content and logging-calculated gas content of coal rocks in the Yichuan area

样品号	实测含气量(m <sup>3</sup> /t)	计算含气量(m <sup>3</sup> /t)	模型绝对误差(m <sup>3</sup> /t)	模型相对误差
Y76-2-1	34.27	34.10	-0.17	-0.5
Y164-1-1	29.38	27.58	-1.80	-6.1
Y167-1-1	26.1	26.44	0.34	1.3
Y167-1-2	23.90	24.51	0.61	2.6
Y76-1-1	28.15	30.58	2.43	8.6
Y56-3-1	30.33	31.77	1.44	4.7
Y56-3-2	24.59	23.21	-1.38	-5.6
Y56-3-3	30.56	31.80	1.24	4.1
Y23-1-1	35.10	35.89	0.79	2.3
Y23-1-2	29.16	28.44	-0.72	-2.5

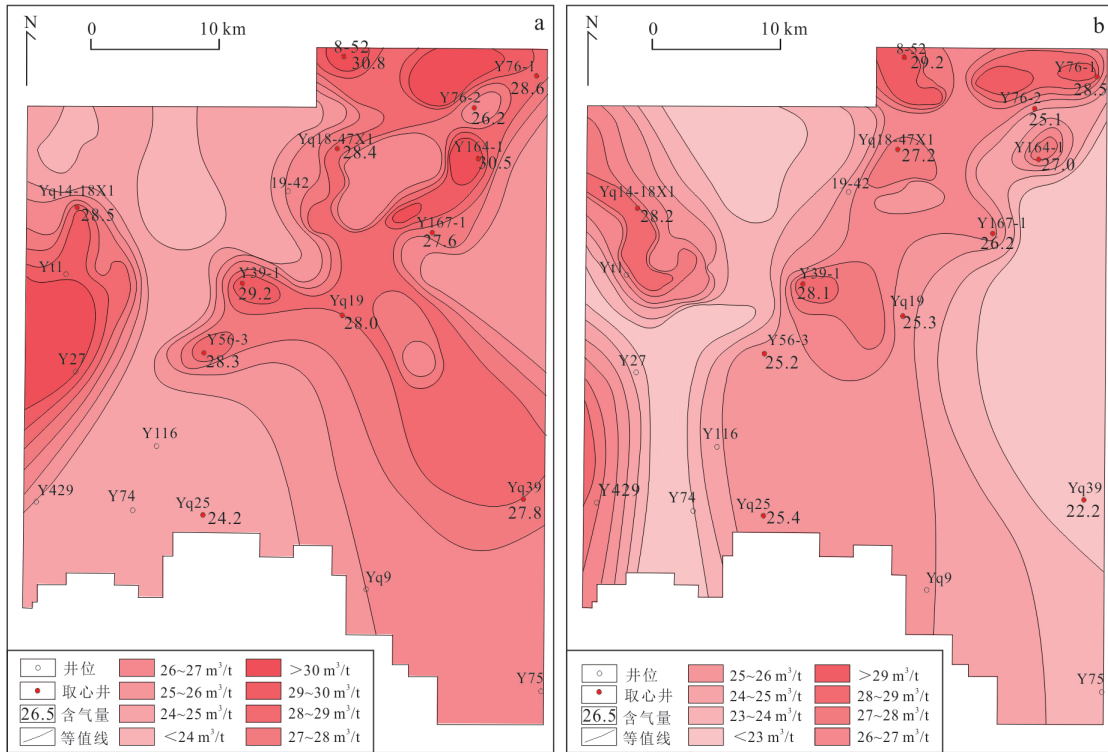


图 8 宜川地区本溪组 8<sup>#</sup>煤(a)与山西组 5<sup>#</sup>煤(b)含气量等值线

Fig.8 Gas content contour maps of the No.8 coal seam in the Benxi Formation (a) and the No.5 coal seam in the Shanxi Formation (b) in the Yichuan area

### 4.2 富集主控因素

深层煤岩气的富集涉及沉积、构造和储层物性多因素耦合.宜川地区煤岩气富集的主控因素主要包括成煤环境、储层物性、顶底板封闭性和微幅构造.(1)成煤环境控制煤岩厚度与含气性.宜川地区本溪组 8<sup>#</sup>煤发育于稳定的潮坪-潟湖背景下的覆水森林沼泽,受东高西低的古地貌控制,在海侵高峰至海退初期的稳定水体中实现了规模化聚积,形成了厚度大、分布连续且均质性强的特征;高镜质组含量(平均值为 84.7%)为其提供了极佳的吸附生气基础.相比之下,山西组 5<sup>#</sup>煤受控于频繁海侵-海退旋回下的三角洲前缘沼泽,泥炭呈间歇性聚积,导致厚度表现出显著的条带状分异与多中心特征,含气量受成煤环境的限制略低于 8<sup>#</sup>煤.(2)储层物性控制赋存相态与储集空间.研究区煤岩储层整体处于高演化( $R_o > 2.5\%$ )阶段,大量生成干气.在气源供给充足的条件下,煤岩储层微孔、宏孔以及微裂缝大量发育构成了复杂的“双重介质”储集体系.微孔作为吸附气的主要赋存空间(占比达 84.5%),宏孔与微裂缝则主导了游离气的赋存空间.(3)顶底板封闭性是富集关键.煤岩气封存能力高度依赖顶底板类型与物性.宜川地区实钻井显示,8<sup>#</sup>煤顶板主要以

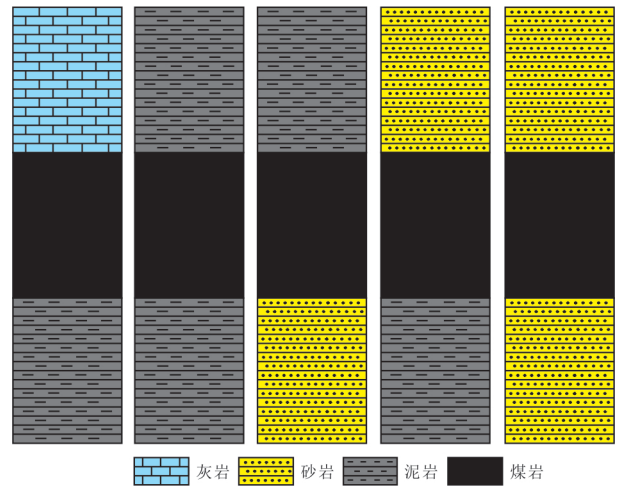


图 9 宜川地区煤岩顶底板不同岩性组合

Fig.9 Different lithological combinations of the roof and floor of coal seams in the Yichuan area

灰岩为主,局部为泥岩,底板以泥岩为主,5<sup>#</sup>煤顶底板以泥岩为主,局部砂岩,总结为五种顶底板组合(图 9),不同组合决定了煤岩气差异化封闭能力,8<sup>#</sup>煤主要为“灰-煤-泥”和“泥-煤-泥”岩性组合.顶板灰岩致密,渗透率低,可有效封闭煤岩气,因此“灰-煤-泥”组合封闭性最佳(王成旺等,2024),对应钻

井气测平均 75%。5<sup>#</sup>煤主要发育“泥-煤-泥”岩性组合,局部为“泥-煤-砂”、“砂-煤-泥”和“砂-煤-砂”岩性组合,“泥-煤-泥”、“泥-煤-砂”组合封闭性良好,对应钻井气测井均 45%~61%,东北部“砂-煤-砂”、“砂-煤-泥”组合封闭性差,气测均值仅 35%,煤岩气明显散失。(4)微幅构造调节游离气局部聚集成藏。深层煤岩气在构造上呈现正向微幅构造较负向构造游离气更加富集的差异性。研究区统计表明:正向微幅游离气含量为 6.5~10.0 m<sup>3</sup>/t,占比为 20%~30%。负向构造游离气仅 1.0~3.5 m<sup>3</sup>/t,占比 <20%。正向构造对天然裂缝发育具有优势作用,有利于游离气聚集与保存。而负向构造多为低应力区或应力封闭区,不利于深层煤岩裂缝系统形成。根据上述认识初步形成了宜川地区薄煤岩的“生控源、储层控储、保存控藏、构造控富”的富集模式。

## 5 有利区评价与试采实践

### 5.1 有利区评价标准建立

在前述煤岩地质特征系统研究的基础上,结合鄂尔多斯盆地煤岩气开发实践与深层薄煤岩开发特点,构建了宜川地区煤岩气有利区综合评价体系。煤岩气富集与高产受控于煤岩资源丰度、有效厚度、含气量及构造条件等多因素耦合(李曙光等,2022),其中资源丰度与净厚度决定可动用资源规模,含气量决定气源基础,而构造条件则控制气体保存与工程可实施性。

基于上述认识,本文在充分考虑研究区煤层整体偏薄但煤阶高、含气性好的实际情况,选取资源丰度、煤岩净厚度、平均含气量、构造条件以及力学参数作为核心评价参数,建立 I 类、II 类和 III 类有利区划分标准(表 4),该分级体系兼顾了地质与工程的可行性,能较好的适应深层薄煤岩差异化开发需求。

### 5.2 有利区优选结果

在评价标准约束下,对宜川地区本溪组 8<sup>#</sup>煤与山西组 5<sup>#</sup>煤进行有利区综合评价与空间叠合分析,8<sup>#</sup>煤有利区类型以 II 类有利区为主,其资源量占比约 75%,主要分布于研究区中部-东北部;III 类有利区资源量占比约 17%,多位于研究区边缘部位;I 类有利区规模相对较小,占比约 8%,呈局部斑块状分布(图 10a)。尽管 I 类有利区面积有限,但其煤岩净厚度、含气量及封闭条件均优越,是优先部署水平井和规模开发的核心区段。5<sup>#</sup>煤有利区类型以 III 类有利区为主,资源量占比约 78%,反映出该层位煤岩厚度相对较薄、空间非均质性较强的特点;II 类有利区主要集中在研究区东北部,资源量占比约 22%,该区煤层厚度相对稳定、含气量较高,具备一定开发潜力(图 10b)。总体来看,5<sup>#</sup>煤有利区质量整体略低于 8<sup>#</sup>煤,但在局部条件叠加区仍可形成可动用资源。研究区煤岩整体净厚度低于鄂尔多斯盆地主体区,但由于煤岩热演化程度高( $R_o > 2.5\%$ )、镜质组含量高、含气量普遍高于盆地平均水平,使得薄煤岩在气源条件和储集能力良好的情况下也具备较好的勘探开发前景。因此,仅以煤层厚度作为否定性指标将低估薄煤岩勘探及开发潜力。

### 5.3 试采实践验证

为验证有利区评价结果的可靠性,研究区开展了多口煤岩气先导试验井,对薄煤岩开发可行性进行了工程实践检验。在 8<sup>#</sup>煤与 5<sup>#</sup>煤合采试验中,共实施试验井 9 口,单井 8<sup>#</sup>煤与 5<sup>#</sup>煤累计有效厚度约 7.7 m。试验结果显示,首年井均日产气量约为  $1.0 \times 10^4$  m<sup>3</sup>,目前单井日产气量为  $0.3 \times 10^4 \sim 1.6 \times 10^4$  m<sup>3</sup>,井均  $0.8 \times 10^4$  m<sup>3</sup>,证实高煤阶、高含气量条件下,即便煤岩厚度偏薄,仍可实现煤岩气的有效动用(图 11)。

在此基础上,进一步在 I、II 类有利区内部署 8<sup>#</sup>煤水平井 5 口。水平井平均水平段长度为 1 427 m,

表 4 宜川地区煤岩气有利区优选地质参数

Table 4 Geological parameters for optimal selection of favorable zones for coal-rock gas in the Ordos basin

地质评价参数	I 类	II 类	III 类
资源丰度(亿方/km <sup>2</sup> )	≥2.0	1.5~2.0	<1.5
煤岩净厚度(m)	≥7	5~7	<5
平均含气量(方/t)	≥22	19~22	<19
构造条件	地层平缓带,地层倾角小于 3°	地层平缓,局部发育微幅构造	构造陡坡带,地层倾角大于 3°
水平两向应力差(MPa)	≤4	4~5	>5
煤层与顶底板应力差(MPa)	≥6	6~7	<7

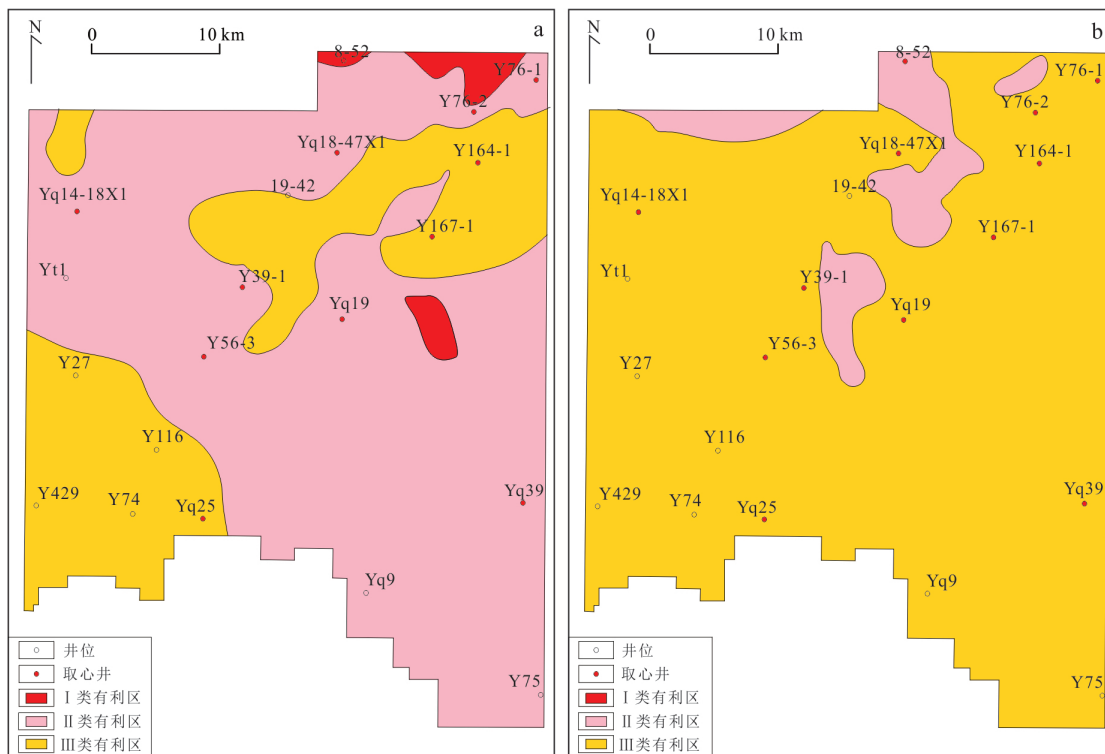


图 10 宜川地区本溪组 8<sup>号</sup>煤(a)与山西组 5<sup>号</sup>煤(b)有利区分布

Fig.10 Distribution of favorable zones for the No.8 coal seam in the Benxi Formation (a) and the No.5 coal seam in the Shanxi Formation (b) in the Yichuan area

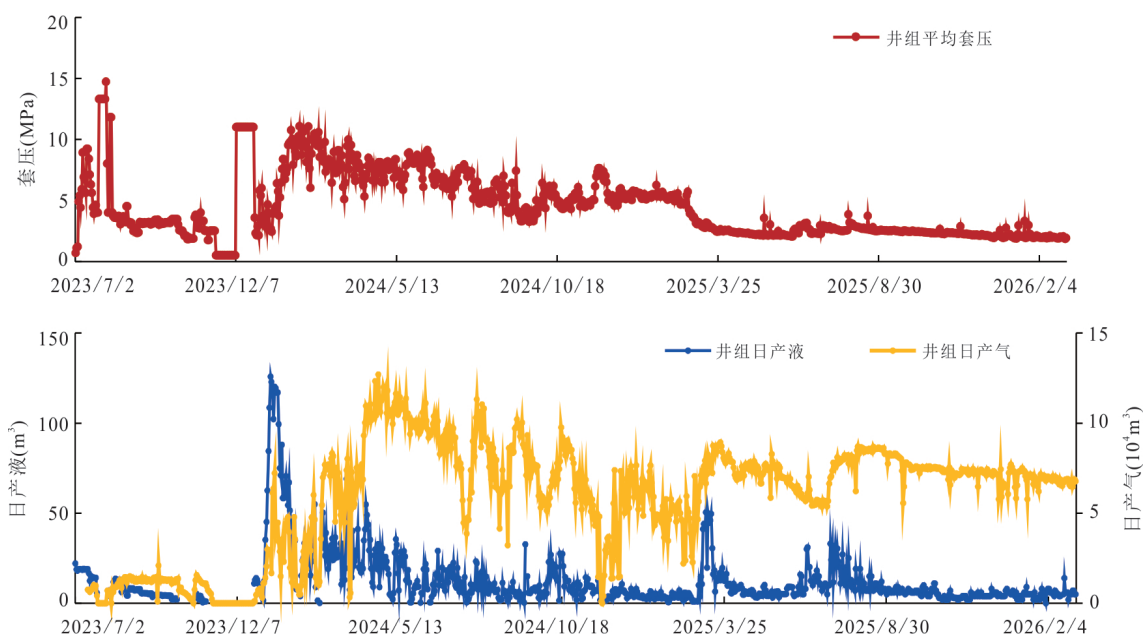


图 11 A 井组直/定向井生产曲线

Fig.11 Production curves of vertical/directional wells in Well Pad A

煤岩钻遇率高达 93.3%。目前单井日产气量为  $1.3 \times 10^4 \sim 3.7 \times 10^4 \text{ m}^3$ , 平均值为  $2.2 \times 10^4 \text{ m}^3$ , 井均累产气量约为  $2\,500 \times 10^4 \text{ m}^3$ , 显示出良好的稳产能力和经济效益(图 12)。该成果充分证明,在高煤阶、高含气

量、良好封闭条件叠加区,通过水平井与体积压裂技术,可实现薄煤岩气的规模化、经济性开发。综合地质评价与试采实践结果表明,宜川地区煤岩气富集区具有“薄煤岩-高煤阶-高含气量-可动用”的特征。

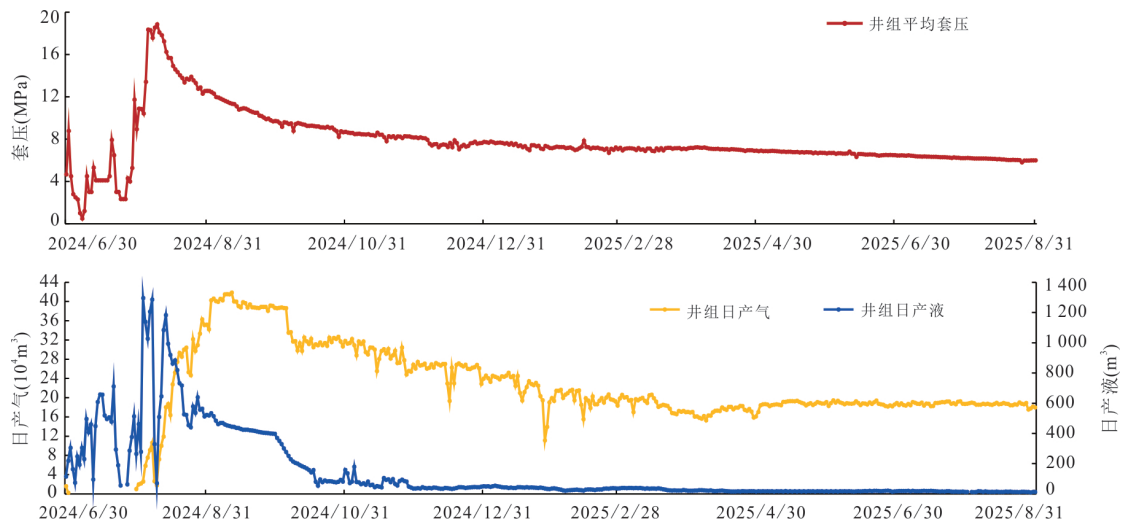


图12 B井组水平井生产曲线

Fig.12 Production curves of horizontal wells in Well Pad B

## 6 结论

基于鄂尔多斯盆地宜川地区本溪组 $8^{\#}$ 煤与山西组 $5^{\#}$ 煤的煤岩储层特征、成煤环境、含气性及有利区评价研究,结合多口试验井勘探实践,本文形成以下主要认识:

(1)高演化煤岩形成“微孔-裂缝”双介质储层.研究区煤岩整体处于高阶煤阶段,镜质组含量高,工业组分表现为“三低一高”特征,具备优良的生气与储气基础.煤岩储集空间以微孔为主,微孔占比超过80%,比表面积贡献超过90%,为吸附气赋存提供了绝对优势空间;同时煤岩中宏孔、割理及微裂缝普遍发育,构成良好的裂缝系统,是游离气富集与运移的主要通道.由此形成以“微孔控储、裂缝控流”为特征的双介质煤岩储层结构,为深层煤岩气的高含气性和可动性奠定了物理基础.

(2)成煤环境控制煤相展布与厚度差异.本溪组 $8^{\#}$ 煤发育于潮坪-潟湖沉积环境,水体相对较深且稳定,泥炭沼泽发育连续,煤层展布范围广、连续性好;山西组 $5^{\#}$ 煤形成于三角洲前缘-滨海过渡相沉积体系,受海侵-海退旋回及砂体叠置影响显著,成煤环境波动性较强,煤层厚度与煤相分布呈现明显的空间差异.

(3)多因素耦合控制煤岩气富集与高产.宜川地区煤岩气富集受成煤环境、孔隙结构、顶底板封闭性及微幅构造等多因素共同控制.厚度较大、连续性好的煤层有利于形成高含气区;致密灰岩或厚层泥岩可有效封闭煤岩气,形成“灰-煤-泥”、“泥-煤-泥”等聚气组合;正向微幅构造

裂缝相对发育,有利于游离气聚集,而负向构造区游离气含量明显偏低.总体上,研究区煤岩气以吸附气为主,游离气占比约22%,表现出煤岩气“见气快、初期产量高”的生产特征.

(4)有利区评价与试采实践验证薄煤岩可有效开发.在系统地质认识基础上,本文建立了地质、工程双甜点的I、II、III类有利区评价体系.评价结果表明, $8^{\#}$ 煤以II类有利区为主, $5^{\#}$ 煤以III类有利区为主,但研究区整体煤岩品质好、含气量高,弥补了煤层偏薄的不利条件.试采实践显示,通过合采井及水平井试验,在煤层单层厚度小于6 m、累计厚度不足10 m的条件下,仍可实现直/定向井单井日产气量 $0.5 \times 10^4 \sim 1.0 \times 10^4 \text{ m}^3$ ,水平井单井日产气量达 $1 \times 10^4 \sim 4 \times 10^4 \text{ m}^3$ ,证实高煤阶、高含气量条件下薄煤岩具备规模化、经济性开发潜力.

## References

- Dai, J. X., Qi, H. F., 1981. Calculation of Natural Gas Production in Coal Measures Strata. *Natural Gas Industry*, 1(3): 49–54 (in Chinese with English abstract).
- Deng, Z., Wang, H. Y., Jiang, Z. X., et al., 2022. Pore Structure Differences between Shale and Coal and Their Gas Migration Mechanisms. *Natural Gas Industry*, 42(11): 37–49 (in Chinese with English abstract).
- Deng, Z., Zhao, Q., Fan, L. Y., et al., 2025. Key Controlling Factors of Coal-Rock Gas of Benxi Formation in Ordos Basin and Its Practical Significance. *Coal Science and Technology*, 53(S1): 233–251 (in Chinese with English abstract).

- Fan, L. Y., Shi, Y. H., Dong, G. D., et al., 2024. Geochemical Characteristics and Coal-Forming Environments of Deep Coal Rocks of Permian Shanxi Formation in Central and Eastern Ordos Basin. *Natural Gas Industry*, 44(10): 113–125 (in Chinese with English abstract).
- Fan, W. T., Hu, G. H., Wang, T., 2019. A Simulation of Thermal Evolution History in Southeastern Margin of Ordos Basin. *China Science Paper*, 14(5): 492–496, 505 (in Chinese with English abstract).
- Gao, Y. F., 2020. Characteristics and Control Factors of Sandstone Reservoir of Shan 2 Member in the East and West of Daning-Jixian Block (Dissertation). China University of Geosciences, Beijing (in Chinese with English abstract).
- Guo, Y. Q., Li, W. H., Guo, B. C., et al., 2019. Sedimentary System and paleogeographic Evolution of Ordos Basin. *Journal of Palaeogeography*, 21(2): 293–320 (in Chinese).
- He, Z. T., Li, Y., Hou, Y. T., et al., 2026. Geological Characteristics and Controlling Factors for Enrichment of Coal-Rock Gas in the No.8 Coal, Benxi Formation, Ordos Basin. *Natural Gas Geoscience*, 37(1): 110–125 (in Chinese with English abstract).
- Kuang, L. C., Dong, D. Z., He, W. Y., et al., 2020. Geological Characteristics and Development Potential of Transitional Shale Gas in the East Margin of the Ordos Basin, NW China. *Petroleum Exploration and Development*, 47(3): 471–482 (in Chinese with English abstract). [https://doi.org/10.1016/s1876-3804\(20\)60066-0](https://doi.org/10.1016/s1876-3804(20)60066-0)
- Li, G., Wang, G. T., Feng, N. C., et al., 2025. Deep Coal-Rock Gas in China: A Review of Distribution, Geological Characteristics, and Its Enrichment Conditions. *ACS Omega*, 10(22): 23472–23491. <https://doi.org/10.1021/acsomega.5c02056>
- Li, G. X., Chen, R. Y., Wen, Z. X., et al., 2026. Global Coal-Rock Gas Resource Potential and Distribution. *Petroleum Exploration and Development*, 53(1): 16–30. [https://doi.org/10.1016/S1876-3804\(26\)60672-6](https://doi.org/10.1016/S1876-3804(26)60672-6)
- Li, G. X., Zhang, S. C., He, H. Q., et al., 2024. Coal-Rock Gas: Concept, Connotation and Classification Criteria. *Petroleum Exploration and Development*, 51(4): 897–911 (in Chinese with English abstract). [https://doi.org/10.1016/S1876-3804\(24\)60514-8](https://doi.org/10.1016/S1876-3804(24)60514-8)
- Li, M. Z., Cao, Y. M., Ding, R., et al., 2024. Gas Occurrence and Production Characteristics of Deep Coal Measure Gas and Reserve Estimation Method and Indicators in Daning-Jixian Block. *China Petroleum Exploration*, 29(4): 142–155 (in Chinese with English abstract).
- Li, S. G., Wang, C. W., Wang, H. N., et al., 2022. Reservoir Forming Characteristics and Favorable Area Evaluation of Deep Coalbed Methane in Daning-Jixian Block. *Coal Geology & Exploration*, 50(9): 59–67 (in Chinese with English abstract).
- Li, X. G., Tang, Z., Zhu, J. Y., et al., 2024. Research Progress and Prospect of Deep Coalrock Fracturing. *Natural Gas Industry*, 44(10): 126–139 (in Chinese with English abstract).
- Li, Y., Zou, C. N., Liang, T. Q., et al., 2026. Classification of Coal-Forming Environments and the Formation and Evolution of Coal. *Petroleum Exploration and Development*, 53(1): 125–137 (in Chinese with English abstract). [https://doi.org/10.1016/s1876-3804\(26\)60679-9](https://doi.org/10.1016/s1876-3804(26)60679-9)
- Liu, H. L., Zou, C. N., Deng, Z., et al., 2026. Pore Characteristics and Coalbed Gas Reservoir Formation Characteristics of Coal Reservoir of No.8 Coal Seam in Well Suide 1H, Ordos Basin. *Earth Science*, 51(1): 284–302 (in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.3799/dqkx.2025.231>
- Luo, J., Zhang, L., Zhang, J. W., et al., 2025. Pore Structure and Reservoir Properties of Deep Coals: A Case Study of No.5 Coal Rock of Shanxi Formation in Southwestern Ordos Basin. *Xinjiang Petroleum Geology*, 46(5): 531–543 (in Chinese with English abstract).
- Niu, X. B., Yu, J., Xu, W. L., et al., 2024. Reservoir-Forming Geological Conditions and Exploration Directions of Upper Paleozoic Coal-Rock Gas in the Ordos Basin. *Natural Gas Industry*, 44(10): 33–50 (in Chinese with English abstract).
- Qin, Y., 2023. Progress on Geological Research of Deep Coalbed Methane in China. *Acta Petrolei Sinica*, 44(11): 1791–1811 (in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.7623/syxb202311004>
- Ren, P. F., Chen, L., Luo, W. Q., et al., 2025. Pore Structure and Heterogeneity Characteristics of Deep Coal Reservoirs Constrained by Coal Macrolithotypes. *Natural Gas Geoscience*, 36(9): 1706–1717 (in Chinese with English abstract).
- Ren, Z. L., Yu, Q., Cui, J. P., et al., 2017. Thermal History and Its Controls on Oil and Gas of the Ordos Basin. *Earth Science Frontiers*, 24(3): 137–148 (in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.13745/j.esf.2017.03.012>
- Shao, L. Y., Qi, Z. H., Tang, Y. G., et al., 2026. Progress of Coal Facies Analysis in China and Discussion on Related Issues. *Journal of Palaeogeography (Chinese Edition)*, 28(1): 44–67 (in Chinese with English abstract).

- <https://doi.org/10.7605/gdxb.2026.003>
- Shi, Y. J., He, Y. F., Wan, J. B., et al., 2024. The Primary Controlling Factors of the Occurrence State of Deep High-Rank Coalbed Methane in Eastern Ordos Basin. *Frontiers in Earth Science*, 12: 1340523. <https://doi.org/10.3389/feart.2024.1340523>
- Tang, S. H., Xi, Z. D., Zhang, S. H., et al., 2025. Occurrence Phase and Gas-Bearing Evolution of Deep Coalbed Methane. *Coal Science and Technology*, 53(3): 91–100 (in Chinese with English abstract).
- Tian, W. G., Deng, Z., Zhang, Z., et al., 2025. Dynamic Evolution of Free Gas-Adsorbed Gas in Deep Coal Reservoirs and Its Geological Control: Taking Daning-Jixian Block in Ordos Basin as an Example. *Earth Science*, 1–16 (in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.3799/dqkx.2025.217>
- Wang, C. W., Liu, X. W., Li, S. G., et al., 2024. Analysis of Main Controlling Factors of Deep Coalbed Methane Enrichment and Evaluation of Geological and Engineering Sweet Areas in Daning - Jixian Block. *Journal of Xi'an Shiyou University (Natural Science Edition)*, 39(4): 1–9 (in Chinese with English abstract).
- Wang, R. G., Zhou, J. S., Du, Y. H., et al., 2021. Deposition Evolution Model of the Carboniferous-Permian in Yan'an Gas Field, the Southeastern Ordos Basin. *Chinese Journal of Geology (Scientia Geologica Sinica)*, 56(4): 1088–1105 (in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.12017/dzjx.2021.058>
- Wang, Y. L., Zhang, C. G., Hu, J. L., et al., 2025. Sedimentary Characteristics and Constitutive Pattern of the Deltaic Sand Body in Shanxi Formation—The 8th Member of Lower Shihezi Formation in Southeastern Ordos Basin. *Geological Review*, 71(5): 1441–1460 (in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.16509/j.georeview.2025.02.002>
- Xu, F. Y., Hou, W., Xiong, X. Y., et al., 2023. The Status and Development Strategy of Coalbed Methane Industry in China. *Petroleum Exploration and Development*, 50(4): 765–783 (in Chinese with English abstract). [https://doi.org/10.1016/s1876-3804\(23\)60427-6](https://doi.org/10.1016/s1876-3804(23)60427-6)
- Yang, Z., Zou, C. N., Fan, Y. C., et al., 2026. Source Rock Oil and Gas: The New Engine of the Ordos Super Energy Basin. *World Petroleum Industry*, 33(1): 142–159 (in Chinese with English abstract).
- Yi, W., Nie, Z. H., Xing, X. J., et al., 2025. Characteristics of Deep Coal-Rock Gas Reservoirs in the Carboniferous Benxi Formation, Yichuan Area, Ordos Basin. *Natural Gas Geoscience*, 36(9): 1618–1630 (in Chinese with English abstract).
- Yu, J., Shi, Y. H., Zhang, T., et al., 2025. New Geological Understanding and Key Engineering Technologies for Deep Coal-Rock Gas in Ordos Basin. *China Petroleum Exploration*, 30(4): 59–77 (in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.3969/j.issn.1672-7703.2025.04.005>
- Zhao, W. B., Liu, H. L., Wang, H. C., et al., 2024. 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. *Coal Science and Technology*, 52(6): 142–154 (in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.12438/est.2023-1112>
- Zhao, Z., Huang, D. J., Hu, J. L., et al., 2026. Hydrocarbon Generation and Pore Evolution Simulation of Coals in the Benxi Formation, Ordos Basin. *Natural Gas Geoscience*, 37(2): 207–221 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, Z., Xu, W. L., Zhao, Z. Y., et al., 2024. Geological Characteristics and Exploration Breakthroughs of Coal Rock Gas in Carboniferous Benxi Formation, Ordos Basin, NW China. *Petroleum Exploration and Development*, 51(2): 262–278 (in Chinese with English abstract). [https://doi.org/10.1016/s1876-3804\(24\)60022-4](https://doi.org/10.1016/s1876-3804(24)60022-4)
- Zhao, Z. Y., Guo, Y. R., Wang, Y., et al., 2012. Study Progress in Tectonic Evolution and Paleogeography of Ordos Basin. *Special Oil & Gas Reservoirs*, 19(5): 15–20, 151 (in Chinese with English abstract).
- Zhou, L. H., Xiong, X. Y., Ding, R., et al., 2025. Connotation, Enrichment Mechanism and Practical Significance of Coal-Rock Gas. *Natural Gas Industry*, 45(3): 1–15 (in Chinese with English abstract).
- Zhu, W. T., Li, X. G., Ren, Y., et al., 2024. Full Pore Size Characterization of Coal Pore Structure Based on CT Scanning. *Special Oil & Gas Reservoirs*, 31(4): 71–80 (in Chinese with English abstract).

## 中文参考文献

- 戴金星, 戚厚发, 1981. 关于煤系地层生成天然气量的计算. *天然气工业*, 1(3): 49–54.
- 邓泽, 王红岩, 姜振学, 等, 2022. 页岩和煤岩的孔隙结构差异及其天然气运移机理. *天然气工业*, 42(11): 37–49.
- 邓泽, 赵群, 范立勇, 等, 2025. 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. *煤炭科学技术*, 53(S1): 233–251.
- 范立勇, 史云鹤, 董国栋, 等, 2024. 鄂尔多斯盆地中东部二叠系山西组深层煤岩地球化学特征及成煤环境. *天然*

- 气工业, 44(10): 113—125.
- 范文田, 胡国华, 王涛, 2019. 鄂尔多斯盆地东南缘热演化史模拟. 中国科技论文, 14(5): 492—496, 505.
- 高云飞, 2020. 大宁-吉县区块东、西部山2段砂岩储层特征差异与控制因素(硕士学位论文). 北京: 中国地质大学(北京).
- 郭艳琴, 李文厚, 郭彬程, 等, 2019. 鄂尔多斯盆地沉积体系与古地理演化. 古地理学报, 21(2): 293—320.
- 何智同, 李勇, 侯雨庭, 等, 2026. 鄂尔多斯盆地本溪组8#煤煤岩气地质特征及富集控制因素. 天然气地球科学, 37(1): 110—125.
- 匡立春, 董大忠, 何文渊, 等, 2020. 鄂尔多斯盆地东缘海陆过渡相页岩气地质特征及勘探开发前景. 石油勘探与开发, 47(3): 435—446.
- 李国欣, 张水昌, 何海清, 等, 2024. 煤岩气: 概念、内涵与分类标准. 石油勘探与开发, 51(4): 783—795.
- 李明宅, 曹毅民, 丁蓉, 等, 2024. 大宁-吉县区块深层煤岩气赋存产气特征与储量估算方法指标探讨. 中国石油勘探, 29(4): 142—155.
- 李曙光, 王成旺, 王红娜, 等, 2022. 大宁-吉县区块深层煤层气成藏特征及有利区评价. 煤田地质与勘探, 50(9): 59—67.
- 李小刚, 唐政, 朱静怡, 等, 2024. 深层煤岩气压裂研究进展与展望. 天然气工业, 44(10): 126—139.
- 李勇, 邹才能, 梁天琦, 等, 2026. 成煤环境分类及煤岩形成演化. 石油勘探与开发, 53(1): 107—118.
- 刘翰林, 邹才能, 邓泽, 等, 2026. 鄂尔多斯盆地绥德1H井8#煤储层孔隙特征及煤岩气成藏特征. 地球科学, 51(1): 284—302.
- 罗京, 张雷, 张建伍, 等, 2025. 深层煤岩储集层孔隙结构和储集性能: 以鄂尔多斯盆地西南部山西组深层5号煤岩为例. 新疆石油地质, 46(5): 531—543.
- 牛小兵, 喻健, 徐旺林, 等, 2024. 鄂尔多斯盆地上古生界煤岩气成藏地质条件及勘探方向. 天然气工业, 44(10): 33—50.
- 秦勇, 2023. 中国深部煤层气地质研究进展. 石油学报, 44(11): 1791—1811.
- 任鹏飞, 陈龙, 罗文琴, 等, 2025. 宏观煤岩类型制约下的深部煤储层孔隙结构及非均质性特征. 天然气地球科学, 36(9): 1706—1717.
- 任战利, 于强, 崔军平, 等, 2017. 鄂尔多斯盆地热演化史及其对油气的控制作用. 地学前缘, 24(3): 137—148.
- 邵龙义, 齐争辉, 唐跃刚, 等, 2026. 中国煤相研究进展及相关问题探讨. 古地理学报, 28(1): 44—67.
- 唐书恒, 郝兆栋, 张松航, 等, 2025. 深部煤层气赋存相态与含气性演化. 煤炭科学技术, 53(3): 91—100.
- 田文广, 邓泽, 张政, 等, 2025. 深部煤储层游离气-吸附气动态演化规律及其地质控制-以鄂尔多斯盆地大宁-吉县区块为例. 地球科学, 1—16.
- 王成旺, 刘新伟, 李曙光, 等, 2024. 大宁-吉县区块深部煤层气富集主控因素分析及地质工程甜点区评价. 西安石油大学学报(自然科学版), 39(4): 1—9.
- 王若谷, 周进松, 杜永慧, 等, 2021. 鄂尔多斯盆地东南部延安气田石炭系-二叠系沉积演化模式. 地质科学, 56(4): 1088—1105.
- 王译羚, 张成弓, 虎建玲, 等, 2025. 鄂尔多斯盆地东南部山西组-下石盒子组8段三角洲砂体沉积特征及构型模式. 地质论评, 71(5): 1441—1460.
- 徐凤银, 侯伟, 熊先钺, 等, 2023. 中国煤层气产业现状与发展战略. 石油勘探与开发, 50(4): 669—682.
- 杨智, 邹才能, 范雨辰, 等, 2026. 非常规源油气: 鄂尔多斯超级能源盆地的新引擎. 世界石油工业, 33(1): 142—159.
- 伊伟, 聂志宏, 邢雪杰, 等, 2025. 鄂尔多斯盆地宜川地区石炭系本溪组深层煤岩气储层特征. 天然气地球科学, 36(9): 1618—1630.
- 喻健, 史云鹤, 张涛, 等, 2025. 鄂尔多斯盆地深层煤岩气地质认识进展与关键工程技术. 中国石油勘探, 30(4): 59—77.
- 赵伟波, 刘洪林, 王怀厂, 等, 2024. 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. 煤炭科学技术, 52(6): 142—154.
- 赵喆, 黄道军, 虎建玲, 等, 2026. 鄂尔多斯盆地本溪组煤岩生烃-孔隙演化模拟. 天然气地球科学, 37(2): 207—221.
- 赵喆, 徐旺林, 赵振宇, 等, 2024. 鄂尔多斯盆地石炭系本溪组煤岩气地质特征与勘探突破. 石油勘探与开发, 51(2): 262—278.
- 赵振宇, 郭彦如, 王艳, 等, 2012. 鄂尔多斯盆地构造演化及古地理特征研究进展. 特种油气藏, 19(5): 15—20, 151.
- 周立宏, 熊先钺, 丁蓉, 等, 2025. 煤岩气内涵、富集机理及实践意义. 天然气工业, 45(3): 1—15.
- 朱文涛, 李小刚, 任勇, 等, 2024. 基于CT扫描的煤岩孔隙结构全孔径表征. 特种油气藏, 31(4): 71—80.