

沁水盆地北缘晋中区块深部煤层气 富集规律及有利区优选

郑永旺^{1,2}, 李超^{1,2}, 吴剑^{1,2}, 郭涛^{1,2}, 周亚彤^{1,2}, 金晓波^{1,2}, 彭兴平^{1,2},
唐宁^{1,2}, 吴财芳^{3,4}, 赵鹏^{3,4}

(1. 中国石化深层煤层气勘探开发重点实验室, 江苏南京 210011; 2. 中国石化华东油气分公司, 江苏南京 210011; 3. 中国矿业大学煤层气资源与成藏过程教育部重点实验室, 江苏徐州 221008; 4. 中国矿业大学资源与地球科学学院, 江苏徐州 221116)

摘要:综合利用地质、实验测试及试井、测井等资料,以晋中区块太原组15#煤层为研究对象,从煤层气地质特征、沉积、构造和水文控气作用等方面,阐明晋中区块深部煤层气地质特征及富集规律。结果表明:晋中区块太原组15#煤层埋深呈中部浅和向西北、东南逐渐加深的特征,厚度平均为6.14 m,煤体结构以原生一碎裂煤为主,煤岩类型以光亮煤和半亮煤为主,工业组分和显微组分中镜质组、固定碳占绝对优势,最大镜质体反射率介于2.49%~3.00%,属于高成熟度优质无烟煤,有利于煤层气生储;孔隙度、渗透率平均分别为5.48%和 $0.40 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,属于高渗透深部煤储层;宏观裂隙、显微裂隙较发育,孔隙以微孔为主导,Langmuir体积平均为33.65 m³/t,煤储层吸附集能力强,含气量平均为17.69 m³/t。晋中区块整体构造由中部北东走向背斜轴部及西北、东南侧向斜单翼组成,西北部断裂发育,中部—东南部断裂相对不发育;煤层顶板多发育高厚度泥岩;水动力条件由西北部向东南部逐渐减弱。构建包括含气量、煤层厚度、埋深、顶底板岩性、断裂发育程度及水动力条件参数的评价指标体系,划分I类和II类深部煤层气富集有利区。该结果可为晋中区块深部煤层气有利区优选和高效开发提供指导。

关键词:沁水盆地北缘;晋中区块;地质特征;深部煤层气;富集规律;有利区

中图分类号:TE121 **文献标识码:**A **文章编号:**2095-4107(2025)06-0085-13

0 引言

沁水盆地煤层气资源丰富,全国煤层气资源评价结果显示,盆地内埋深1~2 km的资源储量达 $18\ 691.55 \times 10^8 \text{ m}^3$,开发前景广阔^[1-2]。近年来,沁水盆地煤层气勘探开发取得积极进展^[3-4],开发区域多集中于盆地南缘^[5-11]。晋中区块位于沁水盆地北缘,深部煤层气资源特征、成藏地质条件及富集规律缺乏系统性研究,一定程度上延缓煤层气开发进程。

人们对深部煤层气富集规律方面开展研究^[12-20]。张道锋等^[21]、徐长贵等^[22]分析成藏地质特征对煤层气富集的影响,确定煤层气富集地质评价参数,建立深层煤层气富集区地质评价方法,指导鄂尔多斯中—东部及临兴—神府地区的煤层气富集有利区优选。郭广山等^[23]、王成旺等^[24]认为沉积环境、构造、煤层厚度、埋深、顶底板岩性及煤质特征为煤层气富集主控因素,建立地质—工程有利区评价体系。杨延辉等^[25]将沉积作用、构造作用、含气量及水文地质作为深部煤层气富集评价要素,提出沁水盆地南部安泽区块高煤阶甜点区优选标准,划分煤层气富集有利区。从煤储层特征及岩石力学特征方面,常辉^[26]分析晋中区块深层煤层气藏储层地质特征,认为晋中区块具有良好的煤层气勘探开发潜力。

晋中区块地质条件复杂,各单元间构造特征差异明显,煤层非均质性强^[27-28],煤层气富集相关研究匮乏。基于晋中区块勘探开发资料,笔者探讨煤层气地质条件、沉积、构造及水文控气等要素对深部煤层气富集的影响,构建晋中区块深部煤层气富集有利区评价指标体系,为晋中区块深部煤层气有利区优选与高效开发提供指导。

收稿日期:2025-07-17;编辑:关开澄

基金项目:中国石化科技攻关项目(P23205);中国石化科技攻关项目(P23230);中国石化科技攻关项目(P24118)

作者简介:郑永旺(1984—),男,高级工程师,主要从事非常规油气勘探开发方面的研究。

通信作者:赵鹏,E-mail:892422486@qq.com

1 区域地质概况

晋中区块位于沁水盆地北部的山西省太谷县、祁县、平遥县、榆社县一带(见图 1),地处黄土高原东部边缘、沁水盆地西北部,地势东高西低,大部分地区海拔在 1 km 以上,地形以丘陵、平原为主。区块基本构造面貌为背斜加宽缓复式向斜,东南部是沁水盆地北东走向的向斜翼部,中部是沁水盆地北东走向的背斜轴部一部分,西北部为晋中地堑。区块断裂及圈闭具有明显的继承性,山西组、太原组及石盒子组底部构造由西北至东南呈两边低、中间高的特征。区块断层以逆断层为主,4 个主要断裂规模较大,将晋中区块划分为 5 个构造单元(见图 2)。其中,晋中断陷、太谷斜坡构造破碎;太谷凸起主断裂及局部构造发育,相对较破碎;武乡凹陷构造较发育;榆社斜坡断裂不发育,构造相对稳定。

晋中区块地层发育完整,含煤地层主要为石炭—二叠系的太原组和山西组,煤层发育广泛且分布稳定,埋深介于 1 400~2 200 m,由西北部晋中断陷至东南部武乡凹陷呈先浅后深的变化趋势,总厚度约为 15 m,自上而下可划分为 1[#]~16[#]煤层。太原组为区块最主要含煤地层,厚度平均约为 100 m,岩石类型主要为灰岩、(粉)砂岩、泥岩和煤层。煤层气井采样位置及层位信息见图 3。

2 煤层气地质特征

2.1 储层特征

晋中区块主力煤储层为山西组 3[#]煤层及太原组 15[#]煤层,其基础参数见表 1。15[#]煤层为晋中区块最主要可采煤层,发育在太原组下段顶端,埋深为 1 600~2 200 m,厚度平均为 6.14 m,夹矸 1~3 层,具有分布普遍、厚度稳定等特点。顶底板主要发育高厚度泥岩,封盖性强。煤体结构识别结果显示,15[#]煤层煤体结构以原生—碎裂煤为主(见表 2),有利于煤层气富集。

2.2 煤层物性

煤岩取心观测结果表明,15[#]煤岩外观呈钢灰色,条痕为黑色,宏观煤岩类型以光亮煤和半亮煤为主。根据 GB/T 8899—2013《煤的显微组分和矿物测定方法》,15[#]煤岩镜质组、惰质组、矿物组分平均分别为 75.43%、18.53%、5.12%,壳质组几乎不可见,属于高镜质组含量煤层,有利于割理裂隙发育,改善储层物性。密度测定及测井解释结果显示,15[#]煤岩的真密度、视密度平均分别为 1.54、1.41 g/cm³,泊松比为 0.20~0.34,杨氏模量为 0.58~3.06 GPa。探井注入/压降测试结果显示,15[#]煤层储层压力介于 6.8~12.7 MPa,压力梯度为(0.70~0.85)×10⁻² MPa/m,属于欠压储层。SY/T 6132—2013《煤岩中甲烷等温吸附量测定干燥基容量法》,等温吸附测试结果见图 4。试验温度为 50℃,15[#]煤岩干燥无灰基样品测得 Langmuir 体积平均为 34.65 cm³/g,Langmuir 压力平均为 1.2 MPa,属于高 VL、低 PL 型煤层,吸附能力强,有利于气体吸附储集,但气体解吸所需压降大,开发需采取针对性改造工艺。15[#]煤层孔隙度平均为 5.48%,渗透率平均为 0.40×10⁻³ μm²,对比大宁—吉县区块的 8 号煤层((0.001~0.130)×10⁻³ μm²)、临兴—神府区块的 8、9 号煤层((0.02~0.08)×10⁻³ μm²)等^[22-24]深部煤储层,15[#]煤层属于高渗透深部储层,具有良好的开发潜力。

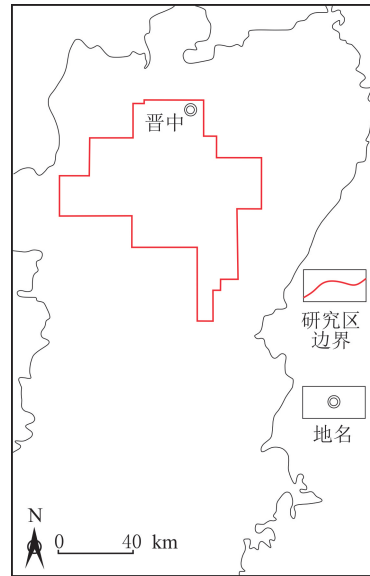


图 1 晋中区块位置
Fig. 1 The location of the Jinzhong Block

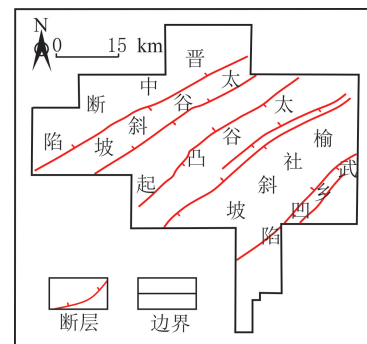


图 2 晋中区块构造单元划分
Fig. 2 Division of construction units in Jinzhong Block

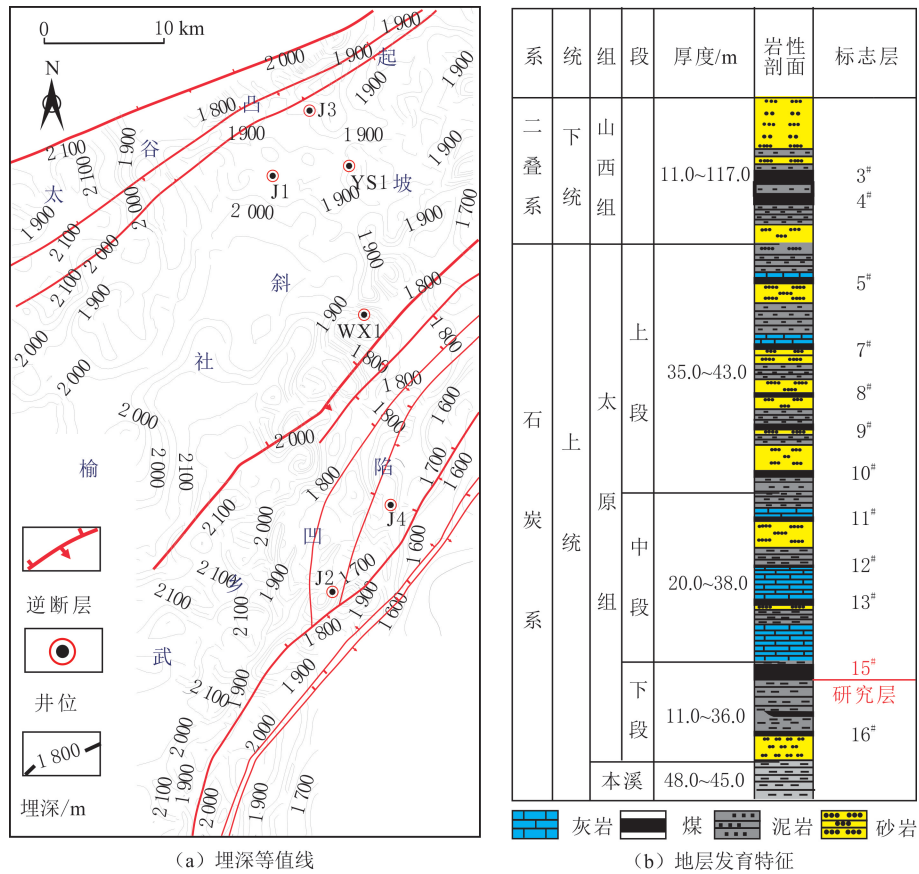


图 3 太原组 15# 煤层埋深等值线及区域地层发育特征
Fig. 3 Contour lines of burial depth and regional stratigraphic development characteristics of No. 15 coal seam in Taiyuan Formation

表 1 晋中区块煤储层参数

Table 1 Coal reservoir parameters in Jinzhong Block

含煤地层	煤层	埋深/m	煤层厚度/m	结构	夹矸	可采性	稳定程度
P _{1s}	3#	1 495.8~1 817.4	0.75~4.31	简单	0~1	大部分可采	稳定
C _{3t}	15#	1 648.1~2 193.7	3.94~8.21	简单	1~3	全区可采	稳定

表 2 太原组 15# 煤层煤体结构特征

Table 2 Structural characteristics of coal body in No. 15 coal seam in Taiyuan Formation

区块/煤层	样次	煤体结构占比/%		
		I 类	II 类	III 类
晋中/15#	38	59.17	32.54	8.29

2.3 煤储层孔裂隙

煤储层内部结构是由孔隙和裂隙组成的双重孔隙结构,煤层气通过裂隙疏导运移,吸附赋存于孔隙。裂隙决定气体的运移与产出效果,通常可分为宏观裂隙和显微裂隙。宏观裂隙可通过煤岩取心观测描述(见图 5),厘清 15# 煤层样品的割理特征。15# 煤岩裂隙平均面密度为 1.46 条/cm²,面割理密度为 3.2~6.2 条/cm,平均为 5.0 条/cm;端割理密度为 1.0~2.4 条/cm,平均为 1.4 条/cm。其中,尺寸超过 2 cm 的裂隙约占 25%,表明煤层割理发育,有利于煤层气渗流运移。

为探究 15# 煤层显微裂隙特征,对处理后的 15# 煤岩样品开展 CT 扫描(见图 6)。测试样品体积为 18.39 cm³,共识别显微裂隙 121 条,其中,尺寸在 1.0 mm 以上的显微裂隙 4 条,尺寸介于 0.3~1.0 mm

的显微裂隙 39 条,其他小于 0.3 mm。总体上,15# 煤层显微裂隙系统发育,网络结构优异,尺寸小于 0.3 mm 的显微裂隙占比超过 64%,可为煤储层提供较大的比表面积,提高煤层储气能力。

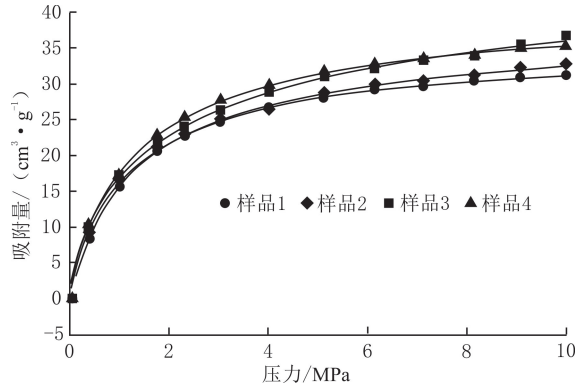


图 4 太原组 15# 煤岩等温吸附曲线
Fig. 4 Isothermal adsorption curves of No. 15 coal rocks in Taiyuan Formation

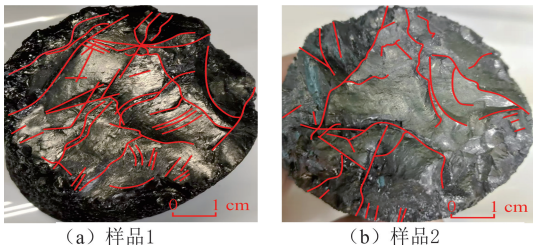


图 5 太原组 15# 煤岩割理观测结果
Fig. 5 Observation results of cleavage of No. 15 coal rocks in Taiyuan Formation

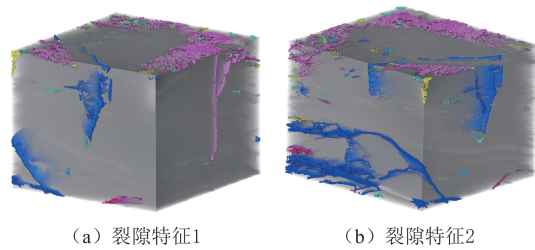


图 6 太原组 15# 煤岩 CT 扫描识别裂隙特征
Fig. 6 CT scanning of No. 15 coal rocks to identify fracture characteristics in Taiyuan Formation

煤储层孔隙作为煤层气赋存的主要空间,孔径分布一定程度上决定气体的赋存特征,采用十进制划分方案,将孔隙划分为大孔(大于 1 000 nm)、中孔(100~1 000 nm)、过渡孔(10~100 nm)和微孔(小于 10 nm)^[29-30]。采用 CO₂ 吸附法、低温液氮吸附及压汞法,联合表征 15# 煤岩全尺度孔径及孔体积分布特征(见图 7)。

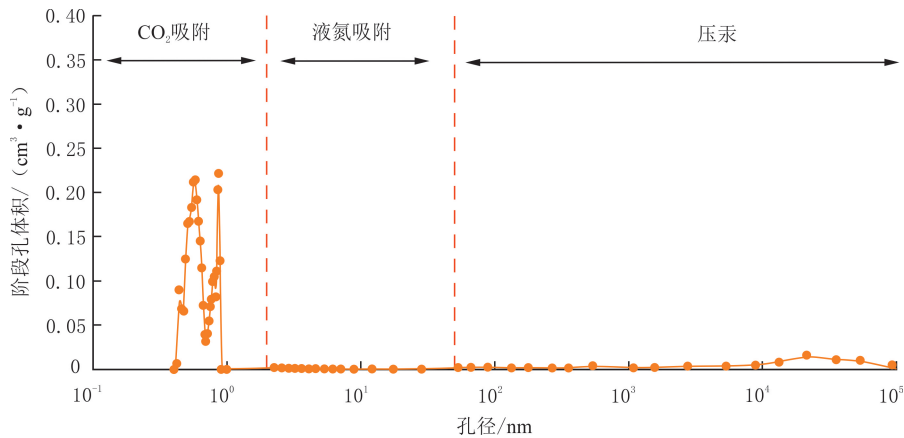


图 7 太原组 15# 煤岩全尺度孔径、孔体积分布特征
Fig. 7 Full scale pore size and pore volume distribution characteristics of No. 15 coal rock in Taiyuan Formation

由图 7 可知,15# 煤岩孔隙以微孔为主,占比达 97.62%,属于典型深部煤岩特征。使用全自动比表面积及微孔物理吸附分析仪测试的 15# 煤岩样品的 DFT 比表面积平均为 215 m²/g,表明微孔系统极为

发育,气体吸附能力强。对 15# 煤岩样品开展核磁共振测试,表明煤岩孔隙系统中的微孔占绝对优势(见图 8)。

总体上,15# 煤岩宏观割理密集,显微裂隙较发育,储层孔隙以微孔为主,煤层渗透潜力较大,可为气体的渗流提供优势通道,较为发育的显微裂隙和微孔系统为煤层提供巨大的比表面积,有利于煤层气吸附储集。

2.4 煤储层含气量

研究区煤层气井测井资料显示,15# 煤层含气量平均为 17.69 m³/t,分析测井含气量与煤层埋深的相关关系(见图 9(a)),结果表明煤层含气量与埋深呈正相关关系。为厘清 15# 煤层含气特征,采用 GB/T 19559—2021《煤层气含量测定方法》及 GB/T 13610—2020《天然气的组成分析 气相色谱法》,检测 32 块 15# 煤岩样品的含气量及气体组分,测试结果见表 3。由表 3 可知,15# 煤层解吸气含量为 8.73~28.67 m³/t,平均为 22.73 m³/t;总含气量为 10.30~49.05 m³/t,平均为 30.68 m³/t,属于高含气量煤层;15# 煤层气体成分以 CH₄ 为主,质量分数为 82.97%~97.14%,平均为 92.81%,重烃组分质量分数低于 0.3%,气体品质优良。

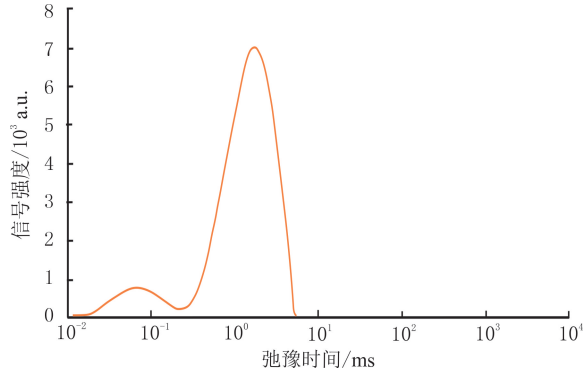


图 8 太原组 15# 煤样 T₂ 弛豫时间谱

Fig. 8 T₂ relaxation time spectrum of No. 15 coal rock in Taiyuan Formation

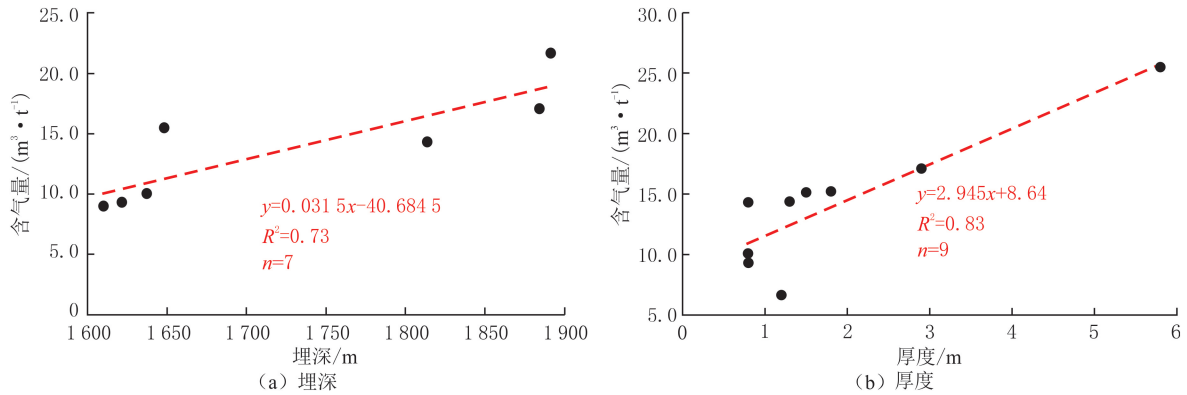


图 9 晋中区块煤层埋深、厚度与含气量相关关系

Fig. 9 Correlation between coal seam burial depth, coal thickness and gas content in the Jinzhong Block

表 3 晋中区块 15# 煤层含气量及气体组分测试结果

Table 3 Test results of gas content and gas composition in No. 15 coal seam of Jinzhong Block

样品编号	井号	埋深/m	解吸气含量/ (m ³ ·t ⁻¹)	总含气量/(m ³ ·t ⁻¹)		w/%			
				空气干燥基	干燥无灰基	N ₂	CO ₂	CH ₄	C ₂ H ₆
1		1 649.05	25.82	33.09	49.05	8.98	0.96	89.95	0.11
2		1 648.59	23.28	27.46	34.46	2.67	0.72	96.51	0.09
3		1 648.29	19.38	24.77	32.40	8.82	2.63	88.50	0.05
4s	JZ2	1 648.89	23.45	29.39	37.84	3.88	2.68	93.37	0.07
5		1 649.73	17.41	21.86	27.57	1.60	3.60	94.75	0.05
6		1 650.17	27.73	34.68	38.29	0.57	2.73	96.65	0.06
7		1 651.51	8.73	10.30	13.42	1.73	3.55	94.66	0.06
8		1 654.24	20.15	26.03	32.08	1.30	2.44	96.19	0.07
9	JZ1	1 883.50	25.59	30.97	34.50	16.26	3.94	79.72	0.07
10		1 883.90	31.39	37.65	41.62	2.24	2.40	95.31	0.06

续表 3

样品编号	井号	埋深/m	解吸气含量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{t}^{-1}$)	总含气量/ $(\text{m}^3 \cdot \text{t}^{-1})$		$w/\%$			
				空气干燥基	干燥无灰基	N_2	CO_2	CH_4	C_2H_6
11		1 884.50	28.78	34.19	37.01	13.28	3.68	82.97	0.06
12		1 889.23	24.86	28.83	31.92	0.96	1.80	97.14	0.10
13	JZ1	1 888.96	28.67	32.41	35.55	1.83	1.59	96.51	0.08
14		1 890.44	26.97	30.81	32.95	1.45	1.94	96.55	0.06
15		1 889.87	20.84	24.23	28.07	0.90	4.00	94.96	0.14
16		1 891.90	19.80	21.95	26.56	7.26	2.08	90.48	0.18

3 富集控制因素

3.1 沉积控气作用

3.1.1 煤层厚度与埋深

随煤层埋深增加,由上覆地层引起的压实作用逐渐增强,垂向地应力增大,盖层封闭性增强,储层渗透性降低,更有利于煤层气的储存与富集^[31]。由图 9(a)可知,研究区煤储层含气量随埋深增大而增大,拟合优度较强,分界深度约为 1 700 m,超过该深度的煤层含气量平均为 $15.00 \text{ m}^3/\text{t}$,显著优于埋深更浅的煤层。

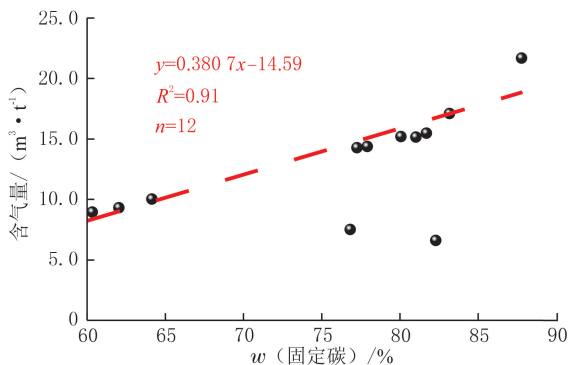
煤储层的上、下部煤体可作为封盖层封堵保存煤层气,厚度较大的煤层通常更易于煤层气储存。晋中区块主力煤层厚度与含气量的相关关系见图 9(b),结果表明煤层含气量与厚度呈正相关关系,拟合优度强,高厚度煤层更有利于煤层气富集。

煤层厚度与埋深是晋中区块煤层气富集的核心主控因素,直接影响煤层气的富集效果。勘探资料表明,晋中区块主力煤层埋深在太谷凸起构造单元内较浅,向西北、东南方向逐渐加深;煤层厚度无明显分布特征,榆社斜坡和武乡凹陷构造单元内的煤层厚度相对更大。

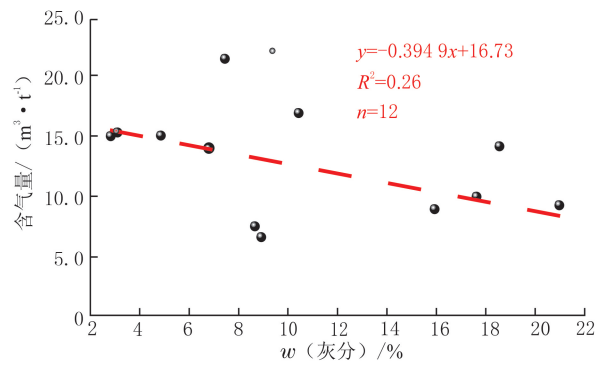
3.1.2 煤岩煤质

有机显微组分质量分数占比和煤化程度对煤层含气量有显著影响。15[#]煤层属于高镜质组含量煤层($w(\text{镜质组})=75.43\%$),为煤层气的储集与运移提供优质条件。根据 GB/T 6948—2008《煤的镜质体反射率显微镜测定方法》,研究区 15[#]煤层最大镜质体反射率 R_o 介于 $2.49\% \sim 3.00\%$,属于高变质程度无烟煤,煤层吸附能力强,有利于煤层气富集。

对 15[#]煤岩样品开展煤岩工业分析(CB/T 212—2008《煤的工业分析方法》),各组分质量分数占比与煤层含气量的相关关系见图 10。煤层含气量与固定碳质量分数占比呈正相关关系(拟合优度强),与灰分、挥发分及水分质量分数占比呈负相关关系,煤层气富集受固定碳质量分数占比的直接影响。15[#]煤岩灰分、挥发分、水分、固定碳质量分数平均分别为 $10.52\%、5.82\%、1.46\%$ 和 76.20% ,属于低灰分、低挥发、特低水分的高固定碳煤,煤层演化程度高,煤层气富集潜力巨大。



(a) w (固定碳) 与含气量



(b) w (灰分) 与含气量

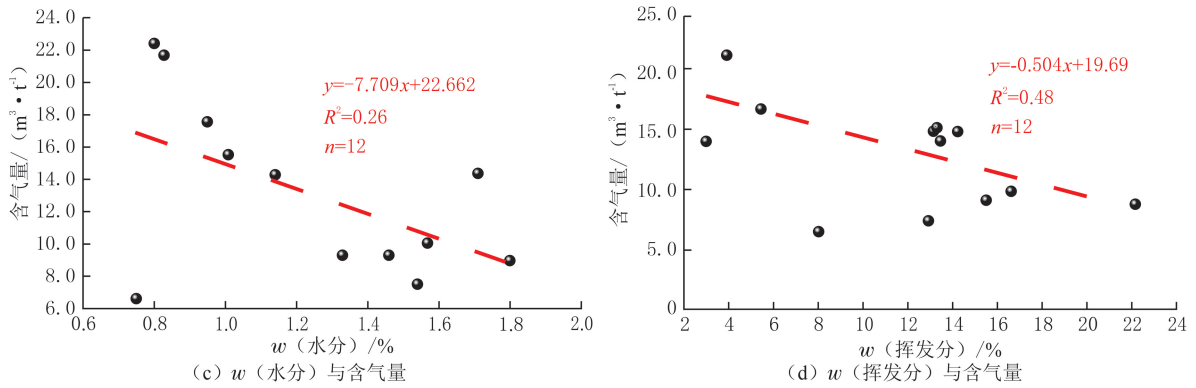


图 10 晋中区块 15# 煤层含气量与工业组分相关关系

Fig. 10 Correlation between gas content and industrial components of No. 15 coal seam in Jinzhong Block

3.1.3 顶底板特征

煤层顶底板岩性、厚度是影响煤层气富集的重要地质因素,岩性致密、厚度大、岩体完整及具备强韧性特征的盖层最利于煤层气富集^[32]。晋中区块太原组煤系地层属于河控—湖控三角洲沉积环境,15# 煤层发育的顶底板岩性多样,基于勘探开发资料,可将其划分为三种封闭模式(见图 11)。由图 11 中可知,模式 1 和模式 2 的煤层直接顶底板为岩性致密的泥岩,封闭性好;模式 3 的煤层直接顶板为灰岩,底板为砂泥岩互层或泥岩,封闭性较弱。测井及岩心出筒记录显示,15# 煤层顶板厚度超过 10 m,且岩性单一、结构完整。顶板为泥岩的煤层含气量平均为 17.35 m³/t,以灰岩为顶板的煤层含气量平均为 9.68 m³/t,即顶板为岩性致密的泥岩盖层时,煤层气的富集效果显著优于以灰岩为顶板的煤层(见图 12)。顶(底)板特征作为核心主控因素,直接影响煤层气的富集效果。

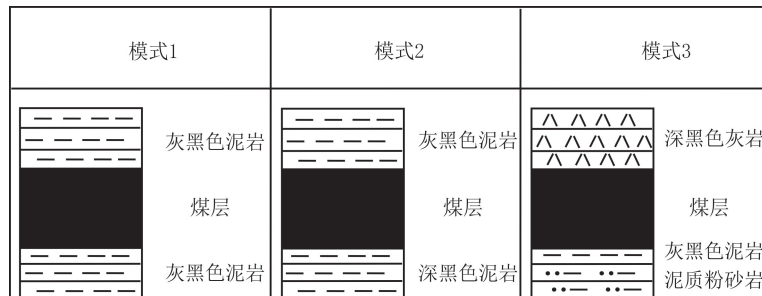


图 11 晋中区块 15# 煤层顶底板岩性封闭模式

Fig. 11 The lithological closure mode of the roof and floor of the No. 15 coal seam in the Jinzhong Block

3.2 构造控气作用

构造控气最常见的是断层和褶皱的控气作用。断层性质与位置直接影响煤层气富集特征,压扭性逆断层对煤层气聚集存储有利,张性断层易造成煤层气逸散。晋中区块断裂分布特征见图 13。

晋中区块断裂以逆断层为主,晋中断陷、太谷斜坡属于断裂发育构造带,且多为大型断裂,难以形成有效的煤层气富集区;太谷凸起、武乡凹陷断裂相对发育;榆社斜坡断裂不发育,有利于煤层气富集。晋中区块基本构造面貌由背斜加宽缓复式向斜构成,盖层以岩性致密的泥岩为主,岩层透气性差,煤层气易聚集在背斜、向斜轴部及压扭性断裂发育的向斜一侧,形成煤层气富集区。

晋中区块单井日产气量与断距的相关关系见图 14。由

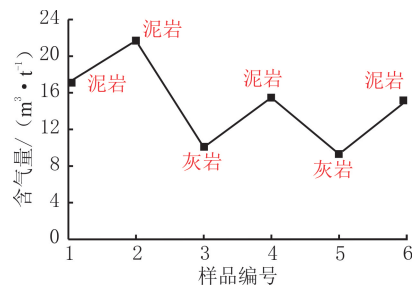


图 12 晋中区块煤层顶板岩性与含气量相关关系

Fig. 12 Correlation between lithology of the roof of coal seams and gas content in the Jinzhong Block

图 14 可知,煤层气井产能与断距呈明显正相关关系,拟合优度极高,即断层作为核心主控因素,直接控制晋中区块的煤层气富集。

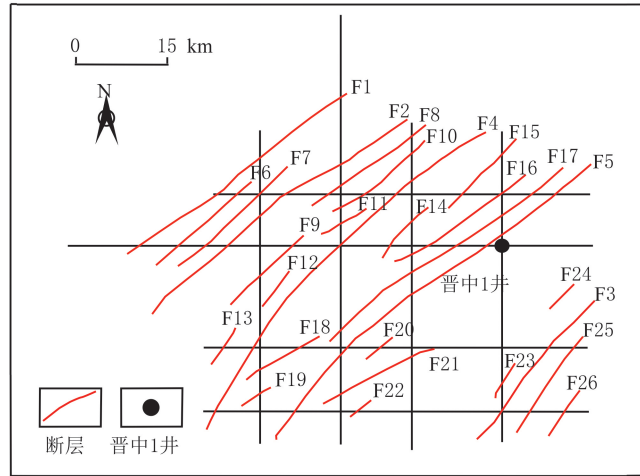


图 13 晋中区块断层分布

Fig. 13 Distribution of faults in Jinzhong Block

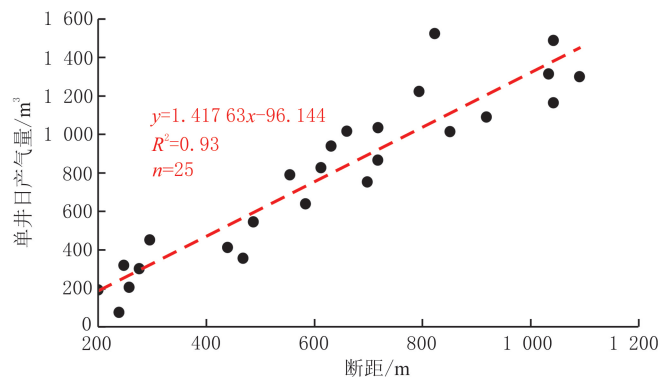


图 14 晋中区块单井日产气量与断距相关关系

Fig. 14 Correlation between daily gas production of single well and fault distance in Jinzhong Block

晋中区块构造控气作用以断层控气为主,榆社斜坡属于宽缓向斜翼部,断裂不发育,最有利于煤层气富集;太谷凸起、武乡凹陷分别属于背斜、向斜轴部,单元内逆断裂发育,易在背斜轴部及逆断裂发育的向斜侧形成煤层气富集;晋中断陷、太谷斜坡构造复杂,大型断裂发育,属于煤层气逸散区。

3.3 水文控气作用

水文控气包括水动力分区、水动力强度及水文地球化学等方面。沁水盆地地下水径流能力由盆缘到盆地中心逐渐减弱,晋中区块属于“滞流”控气带。晋中区块的水文资料较少,根据产出水离子质量浓度,结合晋中区块构造特征,将晋中区块大致分为强水动力带、弱水动力带和弱水动力—滞流带(见图 15)。由图 15 可知,构造特征使得研究区西北部水动力强度高于东南部的,系内含水层连通性弱。勘探资料显示,弱水动力—滞流带煤层含气量显著高于强径流区的。

水化学环境包括矿化度和水型,高矿化度表明区域水动力环境较弱,高质量浓度 Na^+ 、 Cl^- 等离子降低甲烷溶解度,减少溶解气的损失。勘探资料显示,研究区煤层产出水矿化度与含气量的相关关系见图 16,结果显示矿化度较高的区域更有利于煤层气富集。采用 SY/T 5523—2016《油田水分析方法》测试煤层气井产出水,测试结果见表 4。由表 4 可知,15# 煤层产出水为碱性水,pH 介于 7.25~7.75;阳离子以 Na^+ 为主, Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 次之;阴离子以 HCO_3^- 为主, Cl^- 次之, K^+ 、 SO_4^{2-} 和 CO_3^{2-} 不可见,水化学类型为 HCO_3^- —Na 型,矿化度介于 5 723.31~6 130.80 mg/L。总体上,研究区含水层之间连通性弱,水体环境稳定,榆社斜

坡、武乡凹陷构造单元水动力条件较弱,能够有效减少煤层气的运移散失,有利于煤层气封存储集。

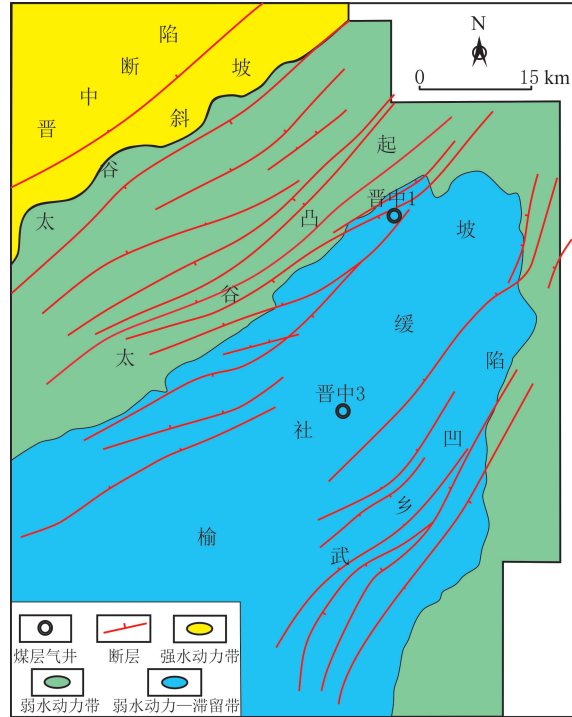


图 15 晋中区块水动力分区

Fig. 15 Hydrodynamic zoning of Jinzhong Block

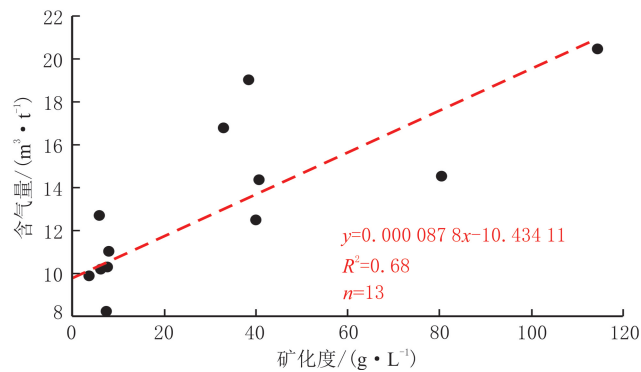


图 16 晋中区块煤层产出水矿化度与含气量相关关系

Fig. 16 Correlation between the mineralization degree of the produced water and gas content in coal seams in the Jinzhong Block

表 4 晋中区块 15# 煤层产水地球化学特征

Table 4 Geochemical characteristics of water production from No. 15 coal seam in Jinzhong Block

$\rho(\text{离子})/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$					pH	矿化度/ $(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	水型
Na^+	Mg^{2+}	Ca^{2+}	Cl^-	HCO_3^-			
1 963.12	28.23	37.67	2 118.63	1 983.15	7.43	5 723.31	碳酸氢钠
1 889.98	29.17	31.23	2 049.12	1 723.82	7.66	5 864.87	碳酸氢钠
1 968.47	25.91	50.93	2 172.01	1 647.54	7.60	5 828.07	碳酸氢钠
2 039.03	44.54	89.81	2 342.77	1 311.93	7.65	5 821.64	碳酸氢钠
1 997.08	40.57	101.81	2 309.23	1 372.95	7.69	5 795.91	碳酸氢钠
2 011.81	45.08	90.48	2 306.10	1 342.44	7.75	5 838.79	碳酸氢钠
1 994.87	51.12	90.63	2 329.22	1 372.95	7.73	5 825.55	碳酸氢钠
2 047.90	48.51	92.92	2 324.28	1 311.93	7.25	6 130.80	碳酸氢钠

4 煤层气富集有利区

晋中区块发育断层 26 条,除分割区域的主要断裂外,大倾角张性正断层不发育,压扭性逆断层为煤层气富集提供条件;系内含水层在自然状态下连通性弱,东南部水文地质条件更有利于煤层气富集。研究区深部煤层气主要富集区域为中部—东南部的太谷凸起、榆社斜坡和武乡凹陷三个构造单元。其中,构造简单、断裂不发育且水动力相对较弱的榆社斜坡构造单元的煤层气富集条件最佳。

根据晋中区块深部煤层气地质特征及煤层气富集规律,以煤层含气量为刻度,分析不同控制因素对煤层气富集的影响,确定适宜晋中区块的 6 种富集评价指标为含气量、煤层厚度、埋深、顶底板岩性组合、断裂发育特征和水动力条件。其中,含气量阈值为 $15 \text{ m}^3/\text{t}$,埋深为 1 700 m,煤层厚度为 2 m,评价参数见表 5,划分晋中区块的 I、II 类富集有利区。

表 5 晋中区块深部煤层气富集有利区评价参数

Table 5 Evaluation parameters of deep coalbed methane enrichment zone in Jinzhong Block

分类	含气量/ $(\text{m}^3 \cdot \text{t}^{-1})$	埋深/m	煤层厚度/m	顶底板岩性组合	断裂发育程度	水动力条件
I 类	>15	$>1\ 700$	>2	泥岩	不发育	弱径流—滞留环境
II 类	≤ 15	$\leq 1\ 700$	≤ 2	非泥岩	发育	弱径流环境

I 类属于优质富集区,II 类属于良好富集区,评价参数针对有利区适用。勘探资料表明,其他单元受构造、水文等因素影响,难以形成大规模煤层气富集区,不适用富集评价参数划分,其他单元可划分为非有利区(见图 17)。晋中区块 I 类富集有利区集中在中部—东南部,多处于榆社斜坡和武乡凹陷构造单元内;II 类富集有利区环绕 I 类富集有利区的周边地域,主要分布于太谷凸起和武乡凹陷。

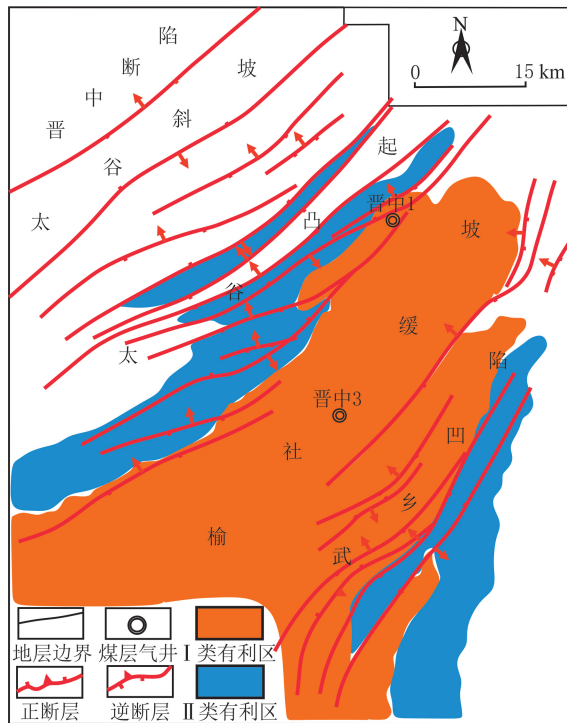


图 17 沁水盆地晋中区块深部煤层气富集有利区分布

Fig 17 Distribution of beneficial areas for deep coalbed methane enrichment in Jinzhong Block of Qinshui Basin

榆社斜坡断裂最不发育,构造上属于盆地内斜单翼,水动力条件属于弱径流—滞留环境。 $15^\#$ 煤层厚度平均超过 6 m,岩心分层观测可知,顶底板为高厚度泥岩。成藏地质特征表明, $15^\#$ 煤层属于优质无烟煤,孔隙特征有利于煤层气运移赋存,煤层含气量平均超过 $17.00 \text{ m}^3/\text{t}$ 。武乡凹陷断裂相对发育,除分割

单元的主要断裂外,多为小规模逆断裂,得益于优质的成藏基础,逆断裂发育的次级背斜轴部易形成封闭小构造。Ⅱ类富集有利区受构造、沉积的影响,煤层埋深较浅,断裂较发育,水动力条件较强,相对不利于煤层气规模聚集。

晋中1井为Ⅰ类富集有利区榆社斜坡内的定向井,15[#]煤层埋深约为1 884 m,顶底板为灰黑色泥岩,厚度超过10 m,煤层含气量为21.69 m³/t,采用大规模体积压裂改造,平均砂比为10.7%,气井产气峰值为4 000 m³/d。晋中2井为Ⅰ类富集有利区武乡凹陷背斜内的定向井,15[#]煤层埋深约为1 648 m,顶板为高厚度灰黑色泥岩,煤层含气量为15.48 m³/t,平均砂比为13.2%,气井日产气峰值超过万立方。Ⅱ类富集有利区武乡凹陷内的煤层气井ZN、ZK等日产气量峰值最高为2 500 m³/d。

5 结论

(1)晋中区块太原组15[#]煤层埋深呈中部浅、向西北、东南逐渐加深的特征,厚度平均为6.14 m,煤岩类型以光亮煤和半亮煤为主,煤体结构以原生一碎裂煤为主,镜质组、固定碳含量高,最大镜质体反射率 R_o 介于2.49%~3.00%,属于高变质程度无烟煤,煤层吸附能力强,煤层含气量平均为17.69 m³/t;孔隙度平均为5.48%,渗透率平均为 $0.40 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,属于高渗透部煤储层;宏观裂隙发育,为气体渗流提供优势通道;显微裂隙较发育,为煤层气吸附储集提供良好空间;孔隙以微孔为主导,Langmuir体积平均为33.65 m³/t。

(2)晋中区块煤层埋深、厚度与含气量呈正向关系,泥岩顶板富集效果显著优于灰岩顶板的,断裂不发育且水动力条件弱的区域更有利于煤层气富集。

(3)晋中区块整体构造由中部北东走向背斜轴部及西北、东南侧向斜单翼组成,西北部断裂发育,中部—东南部断裂相对不发育;煤层顶板多发育高厚度泥岩;水动力条件由西北部向东南部逐渐减弱。榆社斜坡属于宽缓向斜翼部,单元内煤层埋藏深、厚度大,顶底板多发育高厚度泥岩,断裂不发育,水动力条件属于弱径流—滞留区,系内含水层间连通性弱,最有利于煤层气富集。

(4)以含气量、煤层厚度、埋深、顶底板岩性、断裂发育程度及水动力条件参数为评价指标,构建晋中区块深部煤层气富集有利区地质评价方法,划分Ⅰ、Ⅱ类富集有利区。Ⅰ类优质富集有利区在榆社斜坡和武乡凹陷构造单元内;Ⅱ类良好富集有利区分布于太谷凸起和武乡凹陷。

参考文献(References):

- [1] 刘思彤,郑志红,庚勳,等.沁水盆地煤层气资源潜力及开发利用前景[J].中国矿业,2019,28(7):37-43.
LIU Sitong, ZHENG Zhihong, GENG Meng, et al. Resources potential and exploration prospects of coalbed methane in Qinshui Basin[J]. China Mining Magazine, 2019,28(7):37-43.
- [2] 张鹏飞,张仲达,邱贻博,等.华北地区煤系地层油气资源研究现状及启示[J].油气地质与采收率,2024,31(4):96-111.
ZHANG Pengfei, ZHANG Zhongda, QIU Yibo, et al. Research progress of oil and gas resources in coal-bearing strata in North China and its implications[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2024,31(4):96-111.
- [3] 胡秋嘉,刘春春,张建国,等.基于机器学习的煤层气井产能预测与压裂参数优化[J].油气藏评价与开发,2025,15(2):266-273.
HU Qiuji, LIU Chunchun, ZHANG Jianguo, et al. Machine learning-based coalbed methane well production prediction and fracturing parameter optimization[J]. Petroleum Reservoir Evaluation and Development, 2025,15(2):266-273.
- [4] 武玺.沁水盆地高阶煤煤层气水平井高效开发技术及实践[J].油气藏评价与开发,2025,15(2):167-174.
WU Xi. Technology and practice for efficient development of coalbed methane horizontal wells in high-rank coal of Qinshui Basin[J]. Petroleum Reservoir Evaluation and Development, 2025,15(2):167-174.
- [5] 王振国,康丽芳,张亚飞,等.沁水盆地寿阳地区晚石炭—早二叠世煤系沉积特征及对共生气藏的控制[J].油气藏评价与开发,2025,15(2):205-216.
WANG Zhenguo, KANG Lifang, ZHANG Yafei, et al. Sedimentary characteristics of Late Carboniferous to Early Permian coal measures and its control on symbiotic gas reservoirs in Shouyang Area, Qinshui Basin[J]. Petroleum Reservoir Evaluation and Development, 2025,15(2):205-216.
- [6] 贾慧敏,胡秋嘉,张聪,等.煤层气双层合采直井产能预测及排采试验:以沁水盆地郑庄西南部为例[J].油气藏评价与开发,2022,12

- (4):657-665.
- JIA Huimin, HU Qiuqia, ZHANG Cong, et al. Prediction of productivity and co-drainage trial of bilayer vertical coalbed methane wells: cases study of the southwest of Zhengzhuang Block, Qinshui Basin[J]. *Petroleum Reservoir Evaluation and Development*, 2022,12(4):657-665.
- [7] 王镜惠,梅明华,梁正中,等.沁水盆地南部高煤阶煤层气高产区定量评价[J].*油气藏评价与开发*,2019,9(4):68-72.
WANG Jinghui, MEI Minghua, LIANG Zhengzhong, et al. Quantitative evaluation of high production areas of CBM with high coal rank in Southern Qinshui Basin[J]. *Petroleum Reservoir Evaluation and Development*, 2019,9(4):68-72.
- [8] 韩学婷,孟尚志,刘广景,等.煤层气新钻井对老井产能的影响及其控制因素:以沁水盆地柿庄南地区为例[J].*石油实验地质*,2025,47(1):195-203.
HAN Xueting, MENG Shangzhi, LIU Guangjing, et al. Impact of new coalbed methane wells on old well productivity and its controlling factors: a case study of Shizhuangnan Block in Qinshui Basin[J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2025,47(1):195-203.
- [9] 张聪,胡秋嘉,冯树仁,等.沁水盆地南部煤层气地质工程一体化关键技术[J].*煤矿安全*,2024,55(2):19-26.
ZHANG Cong, HU Qiuqia, FENG Shuren, et al. Key technologies for integration of coalbed methane geology and engineering in Southern Qinshui Basin[J]. *Safety in Coal Mines*, 2024,55(2):19-26.
- [10] 唐书恒,李洋,吕建伟.原位储层生物地球化学评价及其对煤层气开采的指示意义:以沁水盆地南部柿庄南区块为例[J].*煤炭学报*,2024,49(1):555-562.
TANG Shuheng, LI Yang, LYU Jianwei. In situ reservoir biogeochemical evaluation and its indicative significance for coalbed methane extraction: taking the Shizhuangnan Block in the Southern Qinshui Basin as an example[J]. *Journal of China Coal Society*, 2024,49(1):555-562.
- [11] 徐昂,桑树勋,周效志,等.薄至中厚煤层群矿区采动卸压煤层气抽采井优化设计[J].*煤炭科学技术*,2025,53(3):385-399.
XU Ang, SANG Shuxun, ZHOU Xiaozhi, et al. Optimal design of coalbed methane wells in mining area with thin to medium thick coal seam group[J]. *Coal Science and Technology*, 2025,53(3):385-399.
- [12] 米洪刚,朱光辉,吴见,等.鄂东缘临兴地区深层煤层气成藏条件及主控因素[J].*天然气地球科学*,2025,34(4):1-17.
MI Honggang, ZHU Guanghui, WU Jian, et al. Accumulation conditions and controlling factors of deep coalbed methane in the Linxing Area, eastern margin of the Ordos Basin[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2025,34(4):1-17.
- [13] 刘洪林,李景明,王红岩,等.水动力对煤层气成藏的差异性研究[J].*天然气工业*,2006,26(3):35-37.
LIU Honglin, LI Jingming, WANG Hongyan, et al. Different effects of hydrodynamic conditions on coal-bed gas accumulation[J]. *Natural Gas Industry*, 2006,26(3):35-37.
- [14] 来鹏,王虎,王一兵,等.基于构造活动对淮南煤田煤层气富集成藏控制的影响分析[J].*非常规油气*,2024,11(5):37-43.
LAI Peng, WANG Hu, WANG Yibing, et al. Influence of tectonic activities on CBM enrichment and accumulation in Junnan Coalfield[J]. *Unconventional Oil & Gas*, 2024,11(5):37-43.
- [15] 李跃国,姚程鹏,杨曙光,等.淮南米泉地区煤层气成因及其富集成藏机理研究[J].*煤炭科学技术*,2021,49(4):220-226.
LI Yueguo, YAO Chengpeng, YANG Shuguang, et al. Study on origin and accumulation mechanism of coalbed methane in Miqian Area of southern margin of Zhunggar Basin[J]. *Coal Science and Technology*, 2021,49(4):220-226.
- [16] LI X N, ZHOU J M, JIAO L X, et al. Coalbed methane enrichment regularity and model in the Xishanyao Formation in the Santan-ghu Basin, NW China[J]. *Minerals*, 2023,13(11):2-12.
- [17] HE Y L, PENG S P, DU W F, et al. Differences in the methane contents in the coalbed methane enrichment region of the Southern Qinshui Basin, China[J]. *Applied Ecology and Environmental Research*, 2017,15(3):273-291.
- [18] SONG Y, ZHAO M J, HONG F, et al. Pool-forming stages and enrichment models of medium to high-rank coalbed methane[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2010,84(6):1539-1546.
- [19] YANG X X, TANG S H, XI Z D, et al. Dynamic evolution and differential enrichment of deep coalbed methane: a case study in Qinshui Basin[J]. *International Journal of Coal Geology*, 2025,299(1):18-26.
- [20] GUO C, XIA Y C, MA D M, et al. Geological conditions of coalbed methane accumulation in the Hancheng Area, Southeastern Ordos Basin, China: implications for coalbed methane high-yield potential[J]. *Energy Exploration & Exploitation*, 2019,37(3):922-944.
- [21] 张道锋,王冰,王华,等.鄂尔多斯盆地中东部深层煤层气成藏富集规律[J].*西安科技大学学报*,2024,44(6):1165-1175.
ZHANG Daofeng, WANG Bing, WANG Hua, et al. Enrichment laws of deep coalbed methane accumulation in central and eastern Ordos Basin[J]. *Journal of Xi'an University of Science and Technology*, 2024,44(6):1165-1175.
- [22] 徐长贵,季洪泉,王存武,等.鄂尔多斯盆地东缘临兴—神府区块深部煤层气富集规律与勘探对策[J].*煤田地质与勘探*,2024,52(8):1-11.
XU Changgui, JI Hongquan, WANG Cunwu, et al. Enrichment patterns and exploration countermeasures of deep coalbed methane

- in the Linxing-Shenfu Block on the eastern margin of the Ordos Basin[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2024,52(8):1-11.
- [23] 郭广山,徐凤银,刘丽芳,等.鄂尔多斯盆地府谷地区深部煤层气富集成藏规律及有利区评价[J].*煤田地质与勘探*,2024,52(2):81-91.
GUO Guangshan, XU Fengyin, LIU Lifang, et al. Enrichment and accumulation patterns and favorable area evaluation of deep coalbed methane in the Fugu Area, Ordos Basin[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2024,52(2):81-91.
- [24] 王成旺,刘新伟,李曙光,等.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[J].*西安石油大学学报(自然科学版)*,2024,39(4):1-9.
WANG Chengwang, LIU Xinwei, LI Shuguang, et al. Analysis of main controlling factors of deep coalbed methane enrichment and evaluation of geological and engineering sweet area in Daning-Jixian Block[J]. *Journal of Xi'an Shiyou University(Natural Science Edition)*, 2024,39(4):1-9.
- [25] 杨延辉,李梦溪,张辉,等.沁水盆地南部中深部煤层气富集高产控制因素与有利区评价[J].*天然气地球科学*,2024,35(10):1740-1749.
YANG Yanhui, LI Mengxi, ZHANG Hui, et al. Evaluation of controlling factors and favorable zones for coalbed methane enrichment and high production in the mid-deep Southern Qsinshui Basin[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2024,35(10):1740-1749.
- [26] 常辉.晋中区块深层煤层气藏储层地质特征研究[J].*山东化工*,2021,50(15):141-143.
CHANG Hui. Deep CBM geological features analysis in Jinzhong Region[J]. *Shandong Chemical Industry*, 2021,50(15):141-143.
- [27] 王付斌,王博,董志刚,等.沁水盆地晋中地区构造特征及圈闭评价[J].*物探化探计算技术*,2017,39(5):636-642.
WANG Fubin, WANG Bo, DONG Zhigang, et al. The tectonic characteristics and trap evaluation of Jinzhong Area in Qinshui Basin[J]. *Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration*, 2017,39(5):636-642.
- [28] 王博.沁水盆地晋中区块构造解释及有利区带预测[D].成都:成都理工大学,2017:23-46.
WANG Bo. Structural interpretation and favorable zone prediction of Jinzhong Block in Qinshui Basin[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2017:23-46.
- [29] 霍多特 B B.煤与瓦斯突出[M].宋士钊,王佑安,译.北京:中国工业出版社,1966:20-100.
HODORT B B. Coal and gas outburst[M]. SONG Shizhao, WANG You'an, Trans. Beijing: China Industry Press, 1966:20-100.
- [30] 程远平,王成浩.构造煤变形能及在煤与瓦斯突出中的作用[J].*煤炭学报*,2024,49(2):645-663.
CHENG Yuanping, WANG Chenghao. Deformation energy of tectonic coal and its role in coal and gas outbursts[J]. *Journal of China Coal Society*, 2024,49(2):645-663.
- [31] 林海,邓金根,谢涛,等.地层各向异性对硬脆性泥页岩井壁稳定性的影响[J].*东北石油大学学报*,2021,45(1):85-94.
LIN Hai, DENG Jinggen, XIE Tao, et al. Effect of formation anisotropy on wellbore stability of hard brittle shale[J]. *Journal of Northeast Petroleum University*, 2021,45(1):85-94.
- [32] 王溯,陈勉,吕嘉昕,等.水平井水力压裂裂缝扩展诱发垂直邻井光纤应变演化特征[J].*东北石油大学学报*,2024,48(4):100-110.
WANG Su, CHEN Mian, LYU Jiaxin, et al. Characteristics of fiber-optic strain evolution in vertical adjacent well induced by hydraulic fracture propagation in horizontal well[J]. *Journal of Northeast Petroleum University*, 2024,48(4):100-110.