



## 窑街矿区浅层煤系气储层特征及勘探开发关键技术

杜新锋, 袁崇亮, 王正喜, 王君得, 李世兵, 刘敬丹, 何秀清, 张天国, 单元伟, 方佳伟

引用本文:

杜新锋, 袁崇亮, 王正喜, 等. 窑街矿区浅层煤系气储层特征及勘探开发关键技术[J]. *煤田地质与勘探*, 2021, 49(6): 58–66,73.

DU Xinfeng, YUAN Chongliang, WANG Zhengxi, et al. Characteristics of shallow coal measure gas reservoir and key technologies of exploration and development in Yaojie mining area[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2021, 49(6): 58–66,73.

在线阅读 View online: <https://dx.doi.org/10.3969/j.issn.1001-1986.2021.06.006>

## 您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

### 窑街矿区海石湾井田油A层腐泥煤有机质成熟度辨析

Analysis of organic matter maturity of sapropel coal in oil layer A of Haishiwan mine field of Yaojie mining area  
*煤田地质与勘探*. 2021, 49(6): 74–80 <https://dx.doi.org/10.3969/j.issn.1001-1986.2021.06.008>

### 基于煤层气井排采数据的储层含气量动态反演研究

CBM well drainage data-based dynamic inversion study of reservoir gas content  
*煤田地质与勘探*. 2021, 49(6): 67–73 <https://dx.doi.org/10.3969/j.issn.1001-1986.2021.06.007>

### 巨厚低阶煤煤层气储层关键成藏地质要素及评价方法——以二连盆地巴彦花凹陷为例

Key geological factors and evaluation methods for huge low-rank coalbed methane reservoirs: Taking Bayanhua depression in Erlian basin as an example  
*煤田地质与勘探*. 2020, 48(1): 85–95 <https://dx.doi.org/10.3969/j.issn.1001-1986.2020.01.012>

### 沁水盆地阳泉区块上古生界煤系页岩气储层特征

Characteristics of shale gas reservoir in Upper Paleozoic coal measures in Yangquan Block, Qinshui Basin  
*煤田地质与勘探*. 2021, 49(2): 142–151 <https://dx.doi.org/10.3969/j.issn.1001-1986.2021.02.018>

### 鄂尔多斯盆地东部上古生界煤系页岩气藏特征及勘探方向

Shale gas reservoir characteristics of the Upper Paleozoic coal measures and exploration direction in eastern Ordos basin  
*煤田地质与勘探*. 2016, 44(4): 54–58 <https://dx.doi.org/10.3969/j.issn.1001-1986.2016.04.010>



移动阅读

杜新锋, 袁崇亮, 王正喜, 等. 窑街矿区浅层煤系气储层特征及勘探开发关键技术[J]. 煤田地质与勘探, 2021, 49(6): 58-66. doi: 10.3969/j.issn.1001-1986.2021.06.006

DU Xinfeng, YUAN Chongliang, WANG Zhengxi, et al. Characteristics of shallow coal measure gas reservoir and key technologies of exploration and development in Yaojie mining area[J]. Coal Geology & Exploration, 2021, 49(6): 58-66. doi: 10.3969/j.issn.1001-1986.2021.06.006

# 窑街矿区浅层煤系气储层特征及勘探开发关键技术

杜新锋<sup>1</sup>, 袁崇亮<sup>2</sup>, 王正喜<sup>1</sup>, 王君得<sup>2</sup>, 李世兵<sup>2</sup>, 刘敬丹<sup>2</sup>,  
何秀清<sup>2</sup>, 张天国<sup>2</sup>, 单元伟<sup>1</sup>, 方佳伟<sup>1</sup>

(1. 中煤科工集团西安研究院有限公司, 陕西 西安 710077; 2. 窑街煤电集团有限公司, 甘肃 兰州 730080)

**摘要:** 煤系气勘探开发不仅可以减少资源浪费, 而且可以缓解我国能源危机, 降低煤矿瓦斯事故, 保护大气环境, 为实现碳达峰、碳中和目标做出贡献。依托窑街矿区海石湾井田三采区浅层煤系气开发示范工程, 分析窑街矿区煤系气储层特征, 探讨煤系气勘探开发关键技术。研究表明: 井田煤系气主要赋存于侏罗系中统窑街群煤系第四岩组( $J_2y^4$ )的油页岩、油砂岩和第三岩组( $J_2y^3$ )的油 A 层、煤二层等特厚产层中; 油 A 层、煤二层气含量随着埋深的增加而增大;  $CO_2$  浓度较高, 且随着埋深增加而减小; 煤二层吸附能力较强, 油 A 层更容易解吸; 各层渗透率为油砂岩>油 A 层>煤二层>油页岩; 抗压强度、抗拉强度、弹性模量、泊松比和脆性指数显示各产层改造难易程度由小到大依次为油砂岩、油 A 层、油页岩、煤二层。油页岩有机质丰度 4.06%, 干酪根类型 II<sub>2</sub>-III 型; 油 A 层有机质丰度 43.27%, 变质程度呈两极分化, 腐泥煤镜质体反射率 0.48%~0.53%, 腐植煤镜质体反射率 0.89%~0.97%; 煤二层有机质丰度 92.87%, 其中镜质组体积分数 67.90%, 惰质组 29.10%, 壳质组 3.50%, 变质程度以肥煤为主, 含少量气肥煤。与我国大部分欠压地层相比, 各产层储层压力正常, 产气潜力大; 煤系气开发应优选煤二层、油 A 层和油页岩; 多段分簇、限流法射孔工艺和细砂防滤失、投球暂堵、两高一低(高排量、高砂量、低砂比)的压裂工艺适合于该区致密特厚储层改造, 挂采位置低于煤二层射孔段和重力式螺旋气锚排采工艺可减少  $CO_2$  的影响, 提高排采效率。这些关键技术的应用显著提高了井田示范工程产气效果, 单井日产气量超过 2 000 m<sup>3</sup>。

**关键词:** 煤系气; 储层特征; 勘探开发; 窑街矿区; 侏罗纪

中图分类号: P618.12 文献标志码: A 文章编号: 1001-1986(2021)06-0058-09 语音讲解



## Characteristics of shallow coal measure gas reservoir and key technologies of exploration and development in Yaojie mining area

DU Xinfeng<sup>1</sup>, YUAN Chongliang<sup>2</sup>, WANG Zhengxi<sup>1</sup>, WANG Junde<sup>2</sup>, LI Shibing<sup>2</sup>,  
LIU Jingdan<sup>2</sup>, HE Xiuqing<sup>2</sup>, ZHANG Tianguo<sup>2</sup>, SHAN Yuanwei<sup>1</sup>, FANG Jiawei<sup>1</sup>

(1. Xi'an Research Institute Co. Ltd., China Coal Technology and Engineering Group Corp., Xi'an 710077, China;  
2. Yaojie Coal and Power Group Co. Ltd., Lanzhou 730080, China)

**Abstract:** The exploration and development of coal measures gas can not only effectively improve the single well production of coalbed methane in coal mining areas, reduce the waste of resources, but also alleviate the energy crisis in China, reduce coal mine gas accidents, protect the atmospheric environment, and contribute to the realization of carbon peak and carbon neutralization. Based on the shallow coal measure gas development demonstration project in the third mining area of Haishiwan mine field, the characteristics of coal measure gas reservoirs in Yaojie mining area are analyzed, and the key technologies for coal-measure gas exploration and development are dis-

cussed. The research showed that coal measure gas in the mine field is mainly present in the oil shale and oil sandstone of the fourth rock group( $J_{2y}^4$ ) of the Jurassic Yaojie Formation coal system, and the oil A layer and the second coal layer of the second group( $J_{2y}^2$ ). The gas content of oil layer A and second coal layer increases with the increase of burial depth; The  $CO_2$  concentration in oil layer A and second coal layer is higher, and decreases with the increase of burial depth; The second coal layer has a strong adsorption capacity, and the oil layer A is easier to desorb; Oil sandstone permeability > oil layer A permeability > second coal layer permeability > oil shale permeability; Compressive strength, tensile strength, elastic modulus, Poisson's ratio and brittleness index show that the difficulty of reformation of them in descending order is oil sandstone, oil layer A, oil shale, and coal second layer; The organic matter abundance of oil shale is 4.06%, and kerogen type is  $II_2$ -III. The abundance of organic matter in the oil layer A is 43.27%, and the degree of metamorphism is polarized. The saprolite vitrinite reflectance is 0.48%-0.53%, and the humic coal vitrinite reflectance is 0.89%-0.97%. The abundance of organic matter in the second layer of coal is 92.87%, including vitrinite 67.90%, inertinite 29.10%, exinite 3.5%, the degree of metamorphism is mainly fat coal with a small amount of gas fat coal; Compared with most low pressured formations in China, the reservoir pressure of each producing layer is normal and the gas production potential is great; The second coal layer o, the oil layer A and the oil shale should be optimized in the development of coal measure gas. The fracturing technology of multiple clusters, flow-limiting perforating technology and fine sand filtration loss, ball drop temporary plugging, two large and one low (large displacement, large sand volume, low sand ratio) fracturing technology are suitable for the reservoir transformation of the ultra-thick and tight formation in this area, and the pump hanging position is lower than the two-layer perforating section of coal and the gravity spiral gas anchor drainage process can reduce the effect of  $CO_2$  and improve the drainage efficiency. The application of these key technologies has significantly improved the gas production effect of the mine field demonstration project. The daily gas production of a single well exceeds  $2\ 000\ m^3$

**Keywords:** coal measure gas; reservoir characteristics; exploration and development; Yaojie mining area; Jurassic

受煤层气长期低效开采工作的延伸和天然气勘探开发领域不断拓展双驱动, 近年来我国煤系气综合勘探初见成效, 如鄂尔多斯盆地的苏里格、靖边、大牛地和库车坳陷的克拉 2、克深、大北等煤系气田的发现<sup>[1]</sup>、准噶尔盆地煤层气与致密砂岩气勘探<sup>[2]</sup>、鸡西的薄煤层与砂岩互层勘探<sup>[3]</sup>、山西临兴、榆社、武乡, 陕西延川南, 贵州六盘水等区块的煤层气和致密砂岩气共探共采试验都取得了良好的效果<sup>[4-8]</sup>。勘探开发煤系气不仅可以提高煤矿区煤层气单井产量, 减少资源浪费, 缓解我国能源危机, 还可以降低煤矿瓦斯事故, 保护大气环境, 为实现碳达峰、碳中和目标做出贡献。甘肃窑街矿区是我国典型的煤油气共生地层, 地质条件复杂, 煤系气资源丰富。煤系为中生界侏罗系中统窑街群, 埋深在 800~1 200 m, 比国内其他区块的石炭-二叠系煤系气储层埋深较浅。窑街矿区海石湾井田三采区煤系气开发示范工程三期共施工了 26 口直井和 1 口水平井, 目前, 一期、二期施工的 14 口井均已开始产气, 效果良好。笔者结合窑街矿区海石湾井田三采区煤系气勘探开发示范工程, 分析井田煤系气储层特征, 探讨复杂地质条件下煤系气协同共采关键技术, 为相似地质条件煤矿区煤系气勘探开发提供借鉴。

## 1 地质背景

窑街矿区所处的民和盆地在元古代经历了剧烈

的造山运动, 形成了古老的构造基底, 奠定了区域内构造基础和构造格架。在此基础上, 经历了印支运动、燕山运动、喜马拉雅运动而发展、演变, 逐渐形成了一个中-新生代陆相含煤、含油气的山间盆地。该盆地大地构造位置处于中祁连隆起带东南部, 由 NW-SE 向延伸的皋兰隆起、永登坳陷、周家台低隆起和巴州坳陷 4 个一级构造单元构成(图 1)<sup>[9-10]</sup>。海石湾井田位于周家台低隆起的西北端, 基底由元古

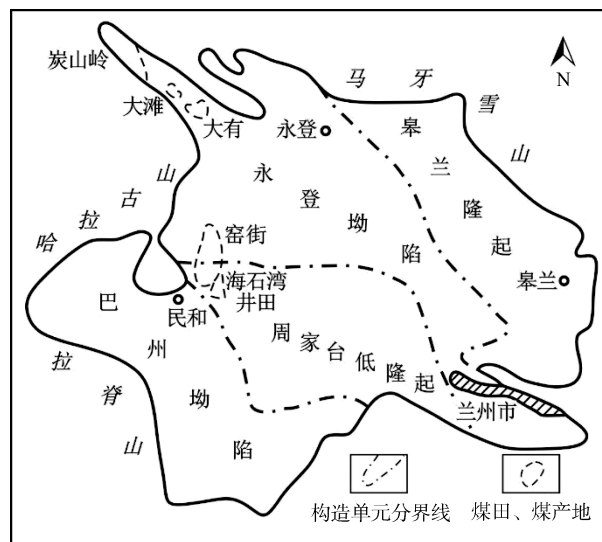


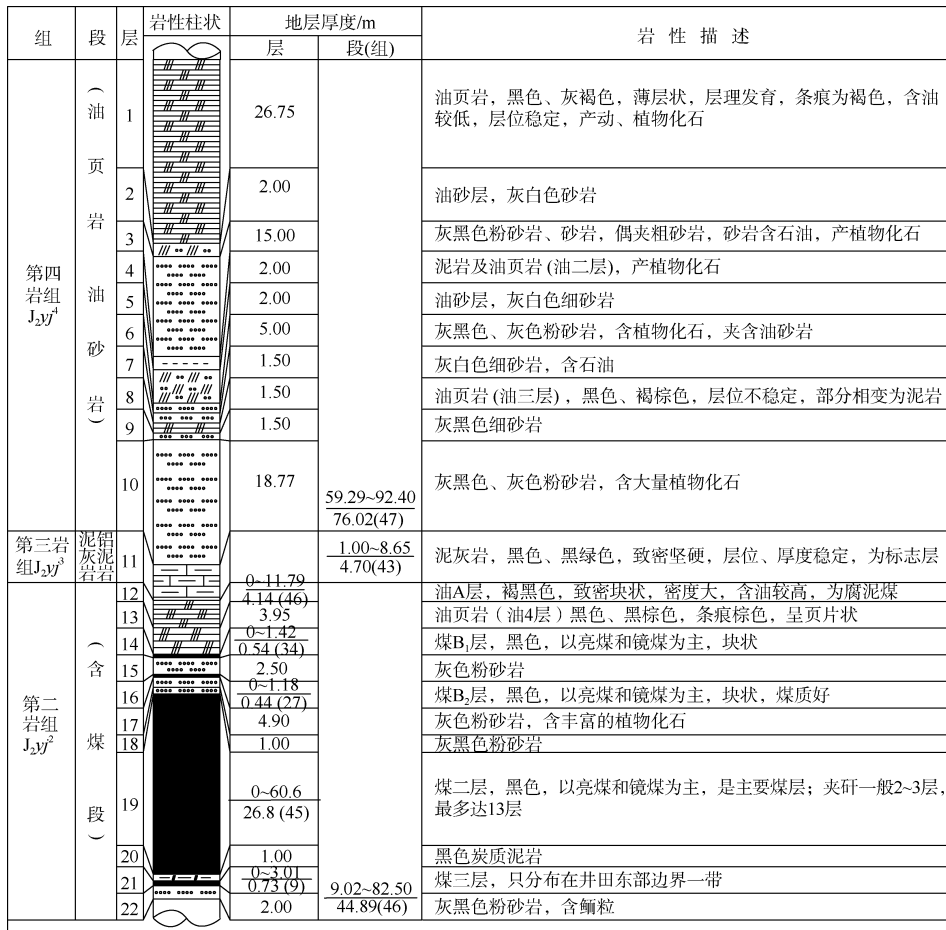
图 1 民和盆地构造单元(据卫平生等<sup>[11]</sup>)

Fig.1 Tectonic units of Minhe Basin(According to Wei Ping-sheng et al<sup>[11]</sup>)

界变质岩系组成，普遍缺失古生代及中生代三叠纪沉积，地层从下往上依次是元古界变质岩、中生界下统炭洞沟群、中生界侏罗系中统窑街群、中生界侏罗系上统享堂群、中生界白垩系下统河口群、新生界第四系上更新统马兰组不整合覆盖于其上层。

井田含煤地层形成于中生代侏罗纪中侏罗世，即中侏罗统窑街群煤系(图 2)。窑街群煤系自下而上可分为 5 个岩组，其中第四岩组( $J_2y^4$ )和第二岩组( $J_2y^2$ )富含油、气和煤炭资源。第四岩组( $J_2y^4$ )，上部为黑色、黑褐色巨厚油页岩层，夹菱铁矿条带及薄层鲕状菱铁矿泥岩，油页岩中含大量保存完好的银杏、苏铁、鱼类及藻类等化石，是气候湿润、有机质丰富的静水湖泊标志；中部为灰白、灰色长

石石英砂岩及粉砂岩，含油，具油臭、油斑及油浸状，局部渗油、流油；下部为灰及灰白色石英细砂岩、粉砂岩、黑褐色油页岩互层，水平波状层理发育。第二岩组( $J_2y^2$ )为含煤岩组，下部为黑色炭质泥岩、中细砂岩、含砾细砂岩夹薄煤层(煤三)；中部为特厚及厚煤层(煤二)，厚度 0~60.6 m，平均 26.8 m；上部为粉砂岩、炭质泥岩及薄层油页岩互层，其中含煤  $B_3$ 、煤  $B_2$ 、煤  $B_1$ ；顶部有一层高灰高油低热值腐泥质油页岩(油 A 层)，厚度 0~11.79 m，平均厚 4.14 m。从宏观看，油 A 层结构简单而均匀，呈块状或板状，光泽暗淡，平整略带棱角状断口，易燃、长焰、烟浓、有沥青味；微观的最大特点是有大量藻类、腐泥基质及矿物杂质，具有腐泥煤的特征。



注：图中  $\frac{0 \sim 11.79}{4.14(46)}$  表示  $\frac{\text{最小} \sim \text{最大值}}{\text{平均值}(\text{样品数})}$

图 2 海石湾井田主要煤系柱状图

Fig.2 Histogram of main coal measures in Haishiwan mine field

## 2 煤系气储层特征

### 2.1 含气性

HSW01-2V 井油 A 层埋深 890.60~899.80 m，煤二层 907.90~923.30 m；HSW06-3V 井油 A 层埋深 1 033.7~1 050.4 m，煤二层 1 062.70~1 102.15 m。从产

层埋深的角度，选择 HSW01-2V 井和 HSW06-3V 井作为参数井，采用 GB/T 19559—2008《煤层气含量测定方法》对 2 口井进行测试(表 1)。油页岩和油砂岩采用常规的绳索取心方法没有测得含气量，反映本区油页岩和油砂岩主要以游离气为主。

表 1 海石湾井田产层气含量和气成分测试结果  
Table 1 Test results of gas content and gas composition of the gas-producing layers in Haishiwan mine field

井号	产层	总气含量/(cm <sup>3</sup> ·g <sup>-1</sup> )		甲烷含量/(cm <sup>3</sup> ·g <sup>-1</sup> )		气成分/%			
		空气干燥基	干燥无灰基	空气干燥基	干燥无灰基	CH <sub>4</sub>	CO <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	C <sub>2+</sub>
HSW01-2V	油 A 层	2.95	6.13	1.53	3.17	51.52	18.69	22.44	7.35
	煤二层	7.24	8.33	2.69	3.1	38.20	42.03	17.73	2.04
HSW06-3V	油 A 层	2.59	7.79	1.53	4.57	59.71	16.62	13.42	10.26
	煤二层	7.93	8.79	4.33	4.78	54.68	30.02	12.78	2.52

从测试结果来看,相比 HSW01-2V 井,HSW06-3V 井埋深大,油 A 层、煤二层气含量较大。油 A 层主要由油页岩和腐泥煤组成,灰分含量高,导致总气含量、甲烷含量中空气干燥基明显低于干燥无灰基。气成分中油 A 层甲烷浓度高于煤二层,随着埋深的增加,CH<sub>4</sub> 浓度增加,CO<sub>2</sub> 浓度减小。

2.2 吸附性

油 A 层空气干燥基 Langmuir 体积 6.13 cm<sup>3</sup>/g,干燥无灰基 Langmuir 体积 14.38 cm<sup>3</sup>/g,Langmuir 压力 6.50 MPa(图 3a)。煤二层空气干燥基 Langmuir 体积 18.27 cm<sup>3</sup>/g,干燥无灰基 Langmuir 体积 19.73 cm<sup>3</sup>/g,Langmuir 压力 3.00 MPa(图 3b)。由此推算,油 A 层和煤二层的临界解吸压力分别为 4.76~6.03 MPa 和 1.97~2.30 MPa。Langmuir 压力是吸附量值为 50%时对应压力值,其值反映了煤层气解吸的难易程度,制约着煤层气开采的难易程度。一般认为 Langmuir 压力大于 3.0 MPa 时煤层具有高

产条件。相比较而言,煤二层的极限吸附能力较大,而油 A 层更容易解吸。分析油 A 层和煤二层的等温吸附曲线,油 A 层 Langmuir 压力值高,吸附态气体脱附比较容易,对开发有利,排采中需较短时间达到最大气产量,但长期产能稳定性较差。煤二层 Langmuir 压力小,早期解吸效率低于后期,煤储层达到产气峰值需要的时间较长。

2.3 孔渗性

分别对油砂层、油页岩层、油 A 层和煤二层做了压汞实验(表 2),结果显示,油砂层的比表面积明显低于其他层,但中位孔径和平均孔径大,孔隙率和渗透率最高。与油页岩相比,油 A 层因为有炭质泥岩,孔隙比表面积、总孔容、孔隙率较大,但比煤二层小;煤二层孔隙比表面积、总孔容、孔隙率较大,但中位孔径、平均孔径较小,渗透率较小。总体而言,各产层渗透率表现为:油砂岩>油 A 层>煤二层>油页岩。

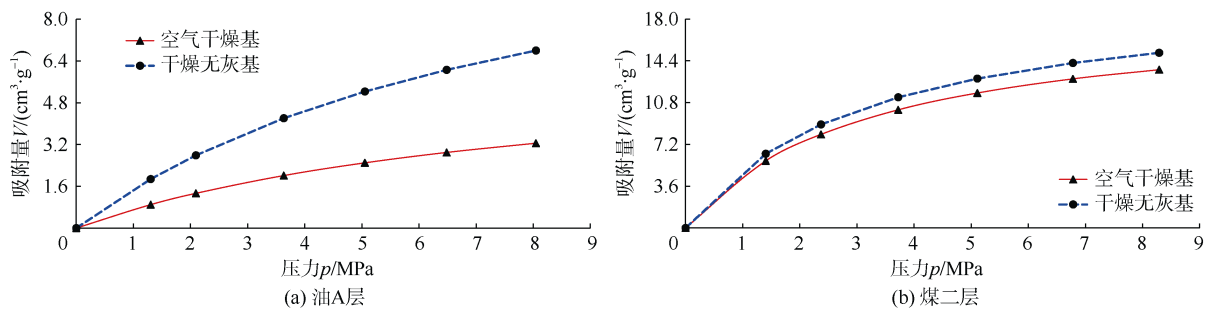


图 3 样品等温吸附曲线  
Fig.3 Isothermal adsorption curves of samples

表 2 各产层压汞实验测试结果  
Table 2 Test results of laminated mercury injection experiments of different gas-producing layers

产层	比表面积/(m <sup>2</sup> ·g <sup>-1</sup> )	总孔容/(cm <sup>3</sup> ·g <sup>-1</sup> )	中位孔径/nm	平均孔径/nm	孔隙率/%	渗透率/10 <sup>-3</sup> μm <sup>2</sup>
油砂岩	0.288	0.036	1 005.600	675.515	8.557	0.203
油页岩	3.486	0.011	24.310	12.440	2.811	0.026
油 A 层	9.185	0.028	24.610	12.160	4.685	0.049
煤二层	18.973	0.049	16.120	10.130	5.967	0.033

### 2.4 力学特征

按照 GB/T 50266—2013《工程岩体试验方法标准》对各产层力学性质进行测定，并计算其脆性指数。结果显示，各产层的抗压强度、抗拉强度、弹性模量和脆性指数由大到小依次为油砂岩、油 A 层、油页岩、煤二层(表 3)，泊松比则正好相反，测试结果反映了储层改造的难易程度。另外，本次还测了油 A 层和煤二层的坚固性系数，油 A 层为 2.67~2.78，平均 2.73，煤二层为 0.71~1.03，平均 0.91。

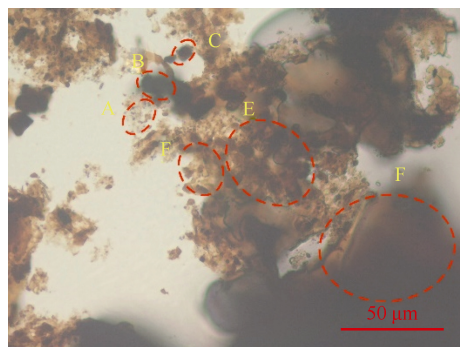
表 3 各产层力学参数

Table 3 Mechanical parameters of different gas-producing layers

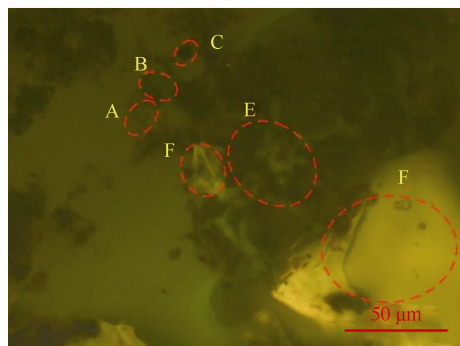
产层	抗压强度/ MPa	抗拉强度/ MPa	弹性模量/ 10 <sup>4</sup> MPa	泊松比	脆性指 数/%
油页岩	15.01	1.46	0.88	0.25	27.19
油砂岩	34.47	2.56	2.05	0.21	40.95
油 A 层	29.44	2.25	1.69	0.22	36.51
煤二层	7.97	0.70	0.44	0.26	23.54

### 2.5 有机地球化学特征

油页岩有机质丰度 4.06%，干酪根类型 II<sub>2</sub>-III 型。油砂岩有机质丰度 0.22%~0.58%，平均 0.33%，透射光下能见到大量棕黄色团块，如图 4a 所示，



(a) 透射光



(b) 荧光

图 4 油砂层显微图像

Fig.4 Microscopic image of oil sand layer

图 4a 中可见分散状腐殖无定形态(E)，少量黄色腐泥无定形态(A)，见一定量棕黄色壳质体碎屑(F)，少量棕色块状镜质体(C)和黑色块状惰质体(B)。蓝光激发下壳质体碎屑发黄绿色荧光，其他所有有机组分不发荧光(图 4b)。

油 A 层有机质丰度 43.27%，显微成分由藻类体及腐泥基质组成，含少量腐植碎屑成分。另外，变质程度呈两极分化(表 4)，腐泥基质中镜质体反射率为 0.48%~0.53%，大部分属于腐泥褐煤和腐泥亚烟煤，少数属于腐泥烟煤<sup>[12-13]</sup>，腐植碎屑镜质体反射率为 0.89%~0.97%，属于气肥煤和肥煤。

表 4 油 A 层镜质体反射率测试结果

Table 4 Test results of vitrinite reflectance of oil layer A

样品编号	测定对象	反射率 R <sub>max</sub> /%	标准差
油 A 层-1	腐泥质	0.39~0.65/0.50(18)	0.051
	腐植质	0.78~1.11/0.97(6)	0.092
油 A 层-2	腐泥质	0.48~0.65/0.53(9)	0.037
	腐植质	0.89~1.00/0.94(3)	0.038
油 A 层-3	腐泥质	0.40~0.63/0.48(13)	0.054
	腐植质	0.75~1.10/0.89(7)	0.108

注：表中 0.39~0.65/0.50(18)表示最小~最大值/平均值(测点数)。

煤二层有机质丰度 81.40%~99.20%，平均 92.87%，其中镜质组体积分数 67.9%，惰质组 29.1%，壳质组 3.50%。镜质体反射率 0.89%~1.02%，平均 0.96%，变质程度以肥煤为主，有少量气肥煤。

### 2.6 储层压力及地应力

采用注入/压降法对 HSW01-2V 的油页岩、煤二层和 HSW06-3V 井的油 A 层和煤二层进行试井，获取储层压力、地应力等参数(表 5)。结果显示，各产层储层压力梯度 0.93~1.10 MPa/hm，与我国大部分欠压地层相比，储层压力正常。煤二层闭合压力 16.10 MPa，闭合压力梯度 1.61 MPa/hm，相比油页岩、油 A 层，其水平最小主应力较大。油 A 层破裂压力 15.36 MPa，破裂压力梯度 1.47 MPa/hm，相比油页岩、煤二层，其储层更容易改造。

## 3 煤系气开发层位优选

海石湾井田中侏罗统窑街群(J<sub>2</sub>yj)第四岩组上部油页岩最厚达 47.03 m，平均厚 25.55 m，有机质丰度较高；中部油砂岩孔隙率、中位孔径和平均孔径均较大，渗透率高，抗压强度、抗拉强度、弹性模量和脆性指数高，可压性好。第二岩组共含煤 5 层，自下而上分别为煤三、煤二、煤 B<sub>3</sub>、煤 B<sub>2</sub>、煤 B<sub>1</sub>，其中煤二层为主要可采煤层，厚度 0~59.28 m，

表 5 各产层储层压力与地应力参数  
Table 5 Reservoir pressure and in-situ stress parameters of different gas-producing layers

产层	储层压力/ MPa	压力梯度/ (MPa·hm <sup>-1</sup> )	闭合压力/ MPa	闭合压力梯度/ (MPa·hm <sup>-1</sup> )	破裂压力/ MPa	破裂压力梯度/ (MPa·hm <sup>-1</sup> )
油页岩	8.88	1.10	8.97	1.09	15.00	1.84
油 A 层	10.52	1.01	10.79	1.03	15.36	1.47
煤二层	9.31	0.93	16.10	1.61	17.64	1.77

平均厚度 19.61 m，属特厚煤层，其余各层为局部可采或不可采煤层。油 A 层(腐泥煤)作为保护层采油页岩，岩层结构简单，厚度 0~11.79 m，平均厚 4.14 m。

一期 4 口试验井根据钻井、测井资料绘制了三采区柱状对比图(图 5)，发现油砂层不是很稳定。根据测井解释，HSW02-2V 在油页岩上部有 1 层差气层，厚度 8.60 m，HSW01-2V、HSW04-1V 和 HSW06-3V 井缺失。HSW01-2V 井和 HSW06-3V 井

在油页岩下部各有 1 层差气层，厚度分别为 1.00 m 和 1.50 m，另外 2 口井缺失。HSW02-2V 井和 HSW04-1V 井发现了 1 个气水层，厚度分别为 14.00 m 和 2.30 m，另外 2 口井缺失。因此，在层位选择上主要考虑油页岩、油 A 层和煤二层。另外，考虑到开发成本和油页岩气含量的不确定性，立足于煤矿安全，优选油 A 层和煤二层作为本次开发的目标层位，同时一期试验油页岩，评价各产层的产气效果。

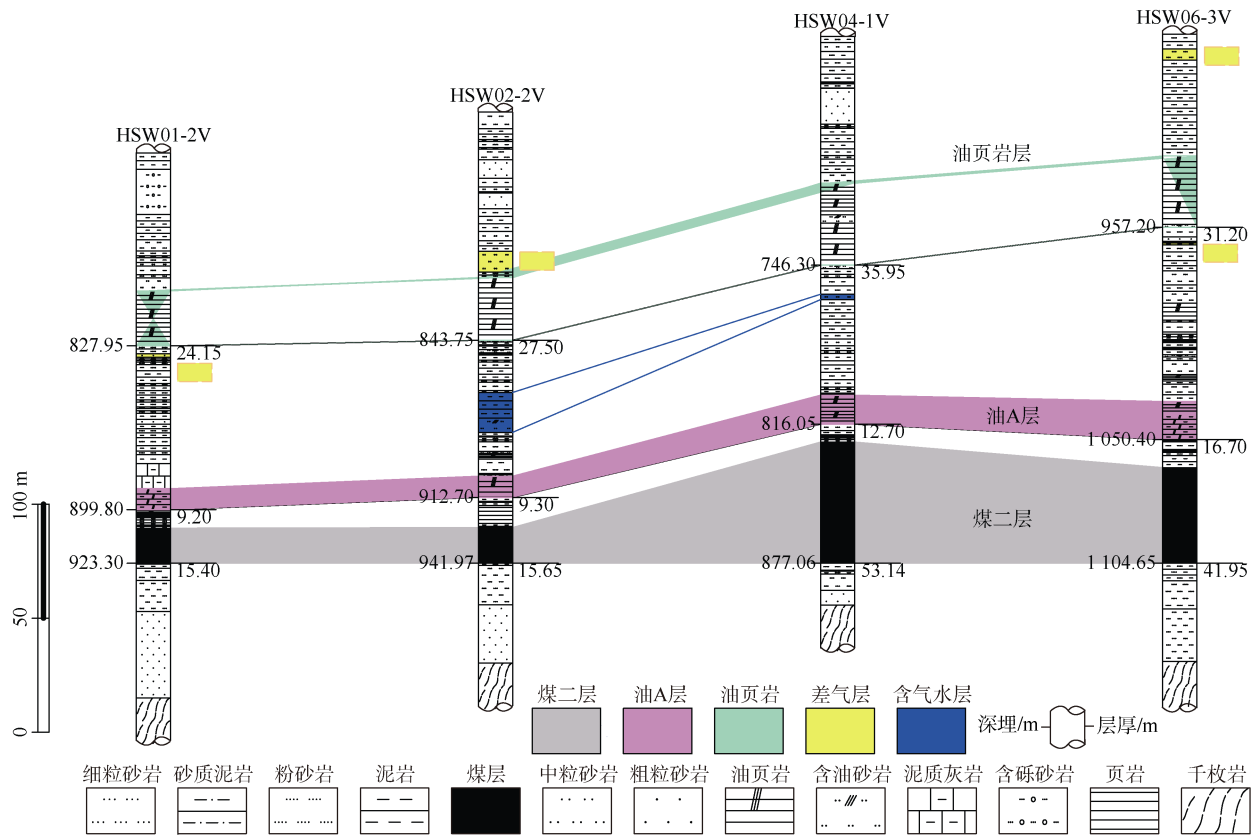


图 5 海石湾一期 4 口井主要产层柱状对比  
Fig.5 Columnar comparison of main producing layers of 4 wells in phase I

#### 4 致密巨厚产层高效压裂改造增产技术

海石湾井田三采区油页岩、油 A 层和煤二层均属于特厚产层，其中油页岩、煤二层的厚度超过 15 m，为了使产层纵向上得到充分改造，设计进行多段分簇射孔，每簇不超过 4 m(表 6)，以利于形成缝网结构，同时保证地层有足够的净压力维持裂缝

的开启。射孔段优选有机质含量(TOC)、孔隙率、渗透率高，气测相应较高的井段，同时，结合电阻率、声波时差、自然伽马、密度、井径等测井曲线，兼顾特厚产层在纵向上的整体改造效果。为了提高液体的携砂能力，采用限流法射孔，孔密度 10 孔/m，每孔进液量控制在 300 L/min 左右。采用 102 型射孔枪、127 型深穿透射孔弹，按照初始相位角 90°，

螺旋布孔,对目标层段进行光套管射孔。油 A 层和煤二层间距较小,煤二层渗透率低,压后放喷时间

长,因此采用电缆输送桥塞+射孔联作的方式带压射孔,实现层间封堵和连续压裂,缩短施工周期。

表 6 海石湾一期工程 4 口井射孔数据  
Table 6 Perforation data of 4 wells in Haishiwan project of phase I

井名	目标产层	产层深度/m	产层厚度/m	射孔深度/m	射孔厚度/m
HSW01-2V	油页岩	803.80~827.95	24.15	805.5~808.5 821~824	3
	油 A 层	890.60~899.80	9.20	893~896	3
	煤二层	907.90~923.30	15.40	913.5~916.5	3
HSW02-2V	油 A 层	903.40~912.70	9.30	906~909	3
	煤二层	925.92~941.57	15.65	928~931 936~939	3 3
HSW04-1V	油页岩	710.35~746.30	35.95	718~721 732~735	3 3
	煤二层	823.92~877.06	53.14	831~834	3
				850~854	4
867~870				3	
HSW06-3V	油 A 层	1 033.70~1 050.40	16.70	1 036~1 039 1 044~1 047	3 3
	煤二层	1 062.70~1 102.15	39.45	1 071~1 074 1 091~1 094	3 3

压裂时由于缝内外存在压力差,部分液体会由壁面滤失到地层中,不但会减小缝宽、缝长和裂缝体积,而且会增加缝中的砂比,造成砂堵<sup>[14]</sup>,这种现象在巨厚煤层压裂中非常普遍。油页岩、油 A 层和煤二层测试闭合压力最大 16.10MPa(表 5),对支撑剂的强度要求不高,选择石英砂作为压裂支撑剂。采用 40~70 目(212~425  $\mu\text{m}$ )、20~40 目(425~850  $\mu\text{m}$ )

和 16~20 目(850~1 180  $\mu\text{m}$ )石英砂组合,其中 40~70 目细砂主要用途就是防滤失,打磨弹眼,降低摩阻。为了保障油页岩、油 A 层和煤二层等特厚产层的改造效果,采用投球方式进行管内堵塞,以起到堵孔分层压裂的目的。压裂过程中,施工压力 16.6~42.0 MPa,排量 8~11  $\text{m}^3/\text{min}$ ,平均砂比 6.84%~9.27%,加砂量 52.49~112.40  $\text{m}^3$ (表 7)。

表 7 海石湾一期 4 口井压裂参数  
Table 7 Fracturing parameters of 4 wells in Haishiwan project of phase I

井号	目标产层	施工压力/MPa	施工排量/ $(\text{m}^3 \cdot \text{min}^{-1})$	平均砂比/%	加砂量/ $\text{m}^3$	压裂液量/ $\text{m}^3$
HSW01-2V	油页岩	20.4~27.1	8~11	9.27	79.06	1 346.74
	油 A 层	19.5~27.6	8~11	9.27	87.33	1 745.59
	煤二层					
HSW02-2V	油 A 层	22.1~25.9	8~9	9.00	56.80	956.61
	煤二层	20.3~28.2	8~9	9.08	70.96	1 294.26
HSW04-1V	油页岩	22.5~26.3	9	6.86	52.49	1 230.91
	煤二层	24.7~42.0	8~10	6.84	112.40	2 419.00
HSW06-3V	油 A 层	16.6~21.2	9	9.14	57.97	957.86
	煤二层	20.9~25.5	8	7.20	83.05	1 635.80

## 5 基于高 $\text{CO}_2$ 浓度的煤系气排采技术

2 口参数井(HSW01-2V、HSW06-3V)测试结果显示,油 A 层、煤二层  $\text{CO}_2$  体积分数分别为 16.62%~

18.69%和 30.02%~42.03%。 $\text{CO}_2$  溶解度与压力、温度有关。示范区油 A 层储层压力 10.52 MPa,温度 40.64 $^\circ\text{C}$ ,煤二层储层压力 9.31 MPa,温度 43.5 $^\circ\text{C}$ 。在压力 5 MPa、温度 40 $^\circ\text{C}$ 时, $\text{CO}_2$  溶解度为 20.35  $\text{m}^3/\text{t}$ <sup>[15]</sup>。



排采过程中, 溶解于水的  $\text{CO}_2$  进入泵筒, 容易引起气锁现象, 影响泵效。本次主要采用 2 种技术, 一是将挂泵位置(吸入口)放在煤二层射孔位置的下方, 排采过程中水向下流, 气向上走, 大大减小进入泵筒的气量; 二是采用重力式螺旋气锚, 与常规重力气锚或螺旋气锚相比, 其分离气体的能力更强。通过这些技术, 提高了泵效, 保证排采的顺利进行。

## 6 示范工程效果

窑街矿区海石湾井田三采区煤系气开发示范工程一期、二期施工的 14 口井已经开始产气, 截至 2021 年 7 月 31 日, 8 口井日均产气量超过  $2\ 000\ \text{m}^3$ , 单井最高日产气量  $2\ 580\ \text{m}^3$ , 最高累计产气量

$24.5\ \text{万}\ \text{m}^3$ , 井底流压平均  $1.1\ \text{MPa}$ , 后期产气潜力很大。以 HSW02-2V 为例(图 6), 2021 年 1 月 9 日开始排采, 2 月 4 日起套压, 2 月 11 日套压  $1.9\ \text{MPa}$  放压产气, 最高日产气量  $2\ 183\ \text{m}^3$ , 累计产气  $20.5\ \text{万}\ \text{m}^3$ , 目前套压  $0.23\ \text{MPa}$ , 井底流压  $2.62\ \text{MPa}$ , 产气量尚在增加中。

HSW02-4D 井仅压裂了煤二层, 井底流压  $5.59\ \text{MPa}$  开始产气, 临近的 HSW02-2V 井和 HSW02-3D 井分别在井底流压  $7.58\ \text{MPa}$  和  $6.91\ \text{MPa}$  时开始产气, 井底流压  $5.59\ \text{MPa}$  时日产气  $815\ \text{m}^3$ (图 7), 由此可以推算油 A 层的贡献超过  $800\ \text{m}^3/\text{d}$ 。另外, 采用分层控压合层排采技术对 HSW01-2V 井油页岩进行了求产<sup>[16]</sup>, 最高日产气量  $377\ \text{m}^3$ 。

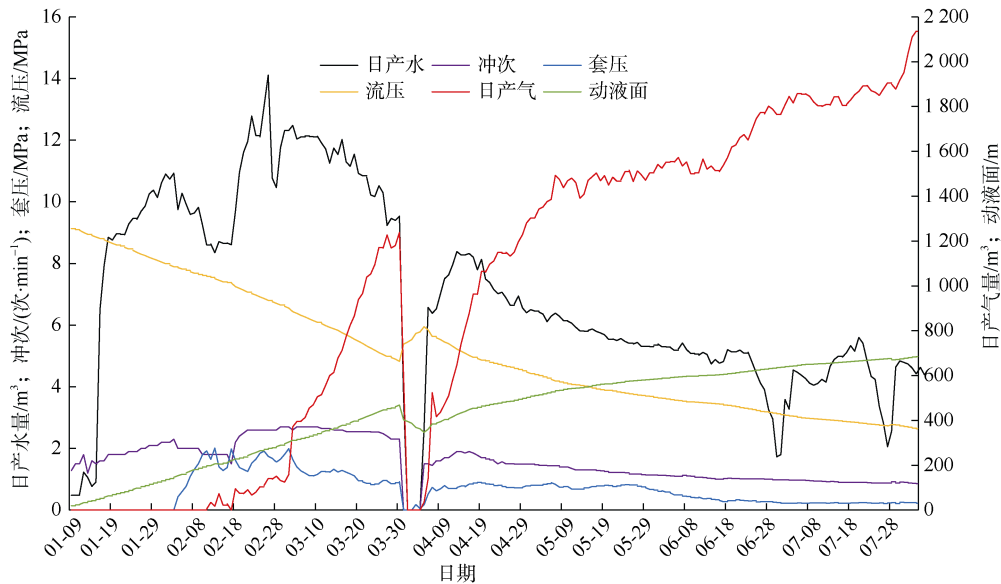


图 6 HSW02-2V 井排采曲线(2021 年)

Fig.6 Drainage production curves of well HSW02-2V(2021)

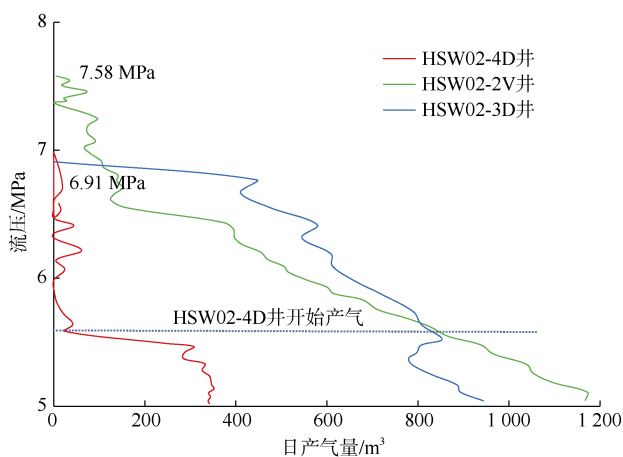


图 7 3 口井产气量与井底流压关系曲线

Fig.7 Relationship curve between gas production and bottom hole flow pressure of 3 wells

## 7 结论

a. 海石湾井田煤系气主要赋存于中侏罗统窑街群煤系第四岩组( $J_{2y}^4$ )的油页岩、油砂岩和第二岩组( $J_{2y}^2$ )的油 A 层、煤二层中, 埋深相对较浅, 属特厚产层。

b. 油 A 层、煤二层  $\text{CO}_2$  浓度较高, 两者均随着埋深的增加,  $\text{CH}_4$  浓度增加,  $\text{CO}_2$  浓度减小。煤二层的极限吸附能力较大, 而油 A 层更容易解吸, 两者 Langmuir 压力大于  $3.0\ \text{MPa}$ , 具有高产条件。油砂层比表面积小, 中位孔径、平均孔径大, 孔隙率和渗透率高。煤二层比表面积、总孔容、孔隙率较大, 但中位孔径、平均孔径较小, 因此渗透率小。各产层渗透率表现为: 油砂岩>油 A 层>煤二层>油页岩。各产层抗压强度、抗拉强度、弹性模量和脆

性指数由大到小依次为油砂岩、油 A 层、油页岩、煤二层，泊松比则正好相反，反映了各储层改造的难易程度。

c. 油页岩有机质丰度 4.06%，干酪根类型 II<sub>2</sub>-III 型。油砂岩有机质丰度 0.33%；油 A 层有机质丰度 43.27%，变质程度呈两极分化，腐泥煤镜质体反射率 0.48%~0.53%，腐植煤镜质体反射率 0.89%~0.97%。煤二层有机质丰度 92.87%，其中镜质组体积分数 67.90%，惰质组 29.10%，壳质组 3.50%；镜质体反射率 0.89%~1.02%，平均 0.96%，变质程度以肥煤为主，含少量气肥煤。

d. 通过地质条件和储层特征分析，认为该区煤系气开发应优选煤二层、油 A 层和油页岩；多段分簇、限流法射孔工艺、细砂防滤失、投球暂堵、两高一低(高排量、高砂量、低砂比)的压裂工艺和挂泵位置低于煤二层射孔段、重力式螺旋气锚术排采工艺等系列关键技术与该区储层条件相匹配，显著提高了示范工程产气效果，单井日产气量超过 2 000 m<sup>3</sup>。

## 参考文献(References)

- [1] 邹才能, 杨智, 黄土鹏, 等. 煤系天然气的资源类型、形成分布与发展前景[J]. 石油勘探与开发, 2019, 46(3): 433-442.  
ZOU Caineng, YANG Zhi, HUANG Shipeng, et al. Resource types, formation, distribution and prospects of coal measure gas[J]. Petroleum Exploration and Development, 2019, 46(3): 21-30.
- [2] 汪孝敬, 胡正舟, 李艳平, 等. 准噶尔盆地侏罗系深部煤系气控制因素及勘探潜力[J]. 煤炭技术, 2020, 39(9): 60-64.  
WANG Xiaojing, HU Zhengzhou, LI Yanping, et al. Characteristic and exploration potential of deep coal measure gas assemblage in Jurassic of Junggar Basin[J]. Coal Technology, 2020, 39(9): 60-64.
- [3] 毕彩芹, 单衍胜, 逢碑, 等. 鸡西盆地煤炭资源枯竭矿区钻获高含气量煤系储层[J]. 中国地质, 2018, 45(6): 1306-1307.  
BI Caiqin, SHAN Yansheng, PANG Bo, et al. High gas coal reservoir drilled in coal resource exhausted mining areas of Jixi Basin[J]. Geology in China, 2018, 45(6): 1306-1307.
- [4] 曹代勇, 姚征, 李靖. 煤系非常规天然气评价研究现状与发展趋势[J]. 煤炭科学技术, 2014, 42(1): 89-92.  
CAO Daiyong, YAO Zheng, LI Jing. Evaluation status and development trend of unconventional gas in coal measure[J]. Coal Science and Technology, 2014, 42(1): 89-92.
- [5] 秦勇, 梁建设, 申建, 等. 沁水盆地南部致密砂岩和页岩的气测显示与气藏类型[J]. 煤炭学报, 2014, 39(8): 1559-1565.  
QIN Yong, LIANG Jianshe, SHEN Jian, et al. Gas logging shows and gas reservoir types in sandstones and shales from southern Qinshui Basin[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(8): 1559-1565.
- [6] 王佟, 王庆伟, 傅雪海. 煤系非常规天然气的系统研究及其意义[J]. 煤田地质与勘探, 2014, 42(1): 24-27.  
WANG Tong, WANG Qingwei, FU Xuehai. The significance and the systematic research of the unconventional gas in coal measures[J]. Coal Geology & Exploration, 2014, 42(1): 24-27.
- [7] 易同生, 周效志, 金军. 黔西松河井田龙潭煤系煤层气-致密气成藏特征及共探共采技术[J]. 煤炭学报, 2016, 41(1): 212-220.  
YI Tongsheng, ZHOU Xiaozhi, JIN Jun. Reservoir formation characteristics and co-exploration and concurrent production technology of Longtan coal measure coalbed methane and tight gas in Songhe field, western Guizhou[J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(1): 212-220.
- [8] 秦勇, 吴建光, 李国璋, 等. 煤系气开采模式探索及先导工程示范[J]. 煤炭学报, 2020, 45(7): 2513-2522.  
QIN Yong, WU Jianguang, LI Guozhang, et al. Patterns and pilot project demonstration of coal measures gas production[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(7): 2513-2522.
- [9] 张虎权. 民和盆地油气藏形成地质条件[J]. 勘探家, 1998, 3(1): 20-23.  
ZHANG Huquan. Geological conditions for Minhe Basin reservoirs[J]. Prospector, 1998, 3(1): 20-23.
- [10] 苏琴, 李新宁, 于法政, 等. 民和盆地页岩气勘探潜力分析[J]. 科学技术与工程, 2011, 11(27): 6573-6577.  
SU Qin, LI Xinning, YU Fazheng, et al. The favorable exploration target of shale gas in Tuha Basin[J]. Science and Technology and Engineering, 2011, 11(27): 6573-6577.
- [11] 卫平生, 王新民. 民和盆地煤层气特征及形成地质条件[J]. 天然气工业, 1997, 17(4): 19-22.  
WEI Pingsheng, WANG Xinmin. Coal seam gas characteristics and geological conditions of Minhe Basin[J]. Natural Gas Industry, 1997, 17(4): 19-22.
- [12] 肖贤明, 陈中凯, 金奎励. 中国腐泥煤的岩石学特征[J]. 煤田地质与勘探, 1990, 18(1): 7-13.  
XIAO Xianming, CHEN Zhongkai, JIN Kuili. The petrological characteristics of sapropelic coals in China[J]. Coal Geology & Exploration, 1990, 18(1): 7-13.
- [13] 肖贤明, 程顶胜. 腐泥煤的煤化作用研究[J]. 煤田地质与勘探, 1992, 20(2): 25-33.  
XIAO Xianming, CHENG Dingsheng. Studies on the coalification of sapropelic coals[J]. Coal Geology & Exploration, 1992, 20(2): 25-33.