

鄂尔多斯盆地神府地区中低阶煤层气勘探潜力分析

潘新志¹ 叶建平² 孙新阳² 周龙刚¹

(1. 中海油能源发展股份有限公司 工程技术分公司, 天津 300457; 2. 中联煤层气有限责任公司, 北京 100011)

摘要: 为了分析鄂尔多斯盆地东缘神木-府谷地区中低阶煤层气的勘探潜力, 通过煤岩工业分析, 显微组分、 $R_{o,max}$ 、热模拟等试验数据的统计、对比, 发现 8+9 号煤生烃能力强于 4+5 号煤; 通过解吸试验可知, 研究区东部抬升区煤层气含量低, 以吸附气为主, 且由于煤层及地下水条件不利于生物气生成, 勘探潜力不足; 而西部地层缓坡区, 特别是背斜发育区, 由于中低煤阶煤孔渗相对发育, 游离气含量增高, 甚至可能超过吸附气。高煤阶煤储层→低煤阶煤储层→常规气藏储层, 其含气形式存在以吸附气→吸附气、游离气→游离气为主的变化规律, 结合其他煤层气赋存条件, “构造高点”或圈闭是该地区煤层气勘探的有利方向。

关键词: 鄂尔多斯盆地东缘; 中低阶煤; 深部煤层气; 含气性; 勘探方向

中图分类号: P618.11 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-2336(2015)09-0065-06

Analysis on exploration potential of mid-low rank coalbed methane in Shenfu Area of Ordos Basin

Pan Xinzhi¹, Ye Jianping², Sun Xinyang², Zhou Longgang¹

(1. Engineering and Technology Branch, CNOOC Energy Development Company Limited, Tianjin 300457, China;

2. China United Coalbed Methane Company Limited, Beijing 100011, China)

Abstract: In order to analyze the exploration potential of mid-low rank coalbed methane in Shenmu-Fugu Area at east edge of Ordos Basin through coal and rock proximate analysis, maceral, $R_{o,max}$, heat simulation and other experimental data statistics and contrastive, it was found that the hydrocarbon generation capacity of No. 8+9 seam was higher than No. 4+5 seam. The result of desorption experiments showed that, the coalbed methane content of upraised area at east part of study area was low and was adsorption gas mainly due to the seam and underground water conditions were not suitable to biogas generation and the exploration potential was insufficient. The strata in west of the area were in gentle slope area. Especially in anticline development area, due to the pore permeability of medium and mid-low rank coal relatively developed, free gas content could be increased and could be over the adsorption gas. Based on high rank coal reservoir → low rank coal reservoir → normal gas formation reservoir and the gas-bearing variation law was adsorbed gas → adsorbed gas and free gas → free gas, in combination with other coalbed methane deposition conditions, the "structure highs" or trap would be favorable direction to coalbed methane exploration in the area.

Key words: east edge of Ordos Basin; mid-low rank coal; deep coalbed methane; gas bearing; exploration direction

0 引 言

国外低煤阶煤层气以美国粉河盆地最早实现商业开发, 2006 年产量已达 $140 \times 10^8 \text{ m}^3$, 后续又有美国尤因塔、拉顿等盆地, 美国 18 个含煤盆地和含煤区的煤层气资源总量达 $19 \times 10^{12} \text{ m}^3$, 其中发育低煤

阶煤储层的含煤盆地有 6 个, 煤层气资源量 $10 \times 10^{12} \text{ m}^3$, 占总资源量的 53%。加拿大阿尔伯塔盆地和澳大利亚的苏拉特盆地等都是低煤阶煤层气开发成功的典型^[1]。根据最新一轮的油气资源调查, 中国低煤阶煤层气资源量约占总量的 43.5%^[2]。中国主要在准噶尔盆地、吐哈盆地、二连、海拉尔、抚顺等

收稿日期: 2015-05-08; 责任编辑: 王晓珍 DOI: 10.13199/j.cnki.est.2015.09.012

作者简介: 潘新志(1966—), 男, 湖北浠水人, 高级工程师, 硕士。Tel: 13920725191, E-mail: panxz3@enooc.com.cn

引用格式: 潘新志, 叶建平, 孙新阳, 等. 鄂尔多斯盆地神府地区中低阶煤层气勘探潜力分析[J]. 煤炭科学技术, 2015, 43(9): 65-70.

Pan Xinzhi, Ye Jianping, Sun Xinyang et al. Analysis on exploration potential of mid-low rank coalbed methane in Shenfu Area of Ordos Basin [J]. Coal Science and Technology, 2015, 43(9): 65-70.

盆地进行过低煤阶煤层气勘探开发,尤其以新疆准噶尔盆地南部及吐哈盆地中低阶煤层气研究为多^[3-5]。国内目前在中、高煤阶煤层气勘探领域已取得一定成果,但低煤阶煤层气的研究相对薄弱,主要集中在低煤阶煤层气中生物气的成因及影响因素的一系列探讨,对低煤阶煤层气的成藏特征及低、高煤阶煤层气成藏对比的探讨。对于研究区所在的鄂尔多斯盆地东缘中低阶煤层气的研究目前开展较少,中石油在保德区块已实施煤层气开发项目,使保德煤层气田成为我国第 1 个进入开发的中低煤阶煤层气区。中低煤阶煤层气是我国未来煤层气勘探开发的一个重要方向^[6]。

神府地区位于鄂尔多斯盆地东北缘,横跨晋西挠褶带和伊陕斜坡 2 个一级构造单元。晚古生代自下而上发育本溪组、太原组、山西组、下石盒子组、上石盒子组、石千峰组地层,为区内致密气勘探的主要层位。本溪组、太原组、山西组为煤层、暗色泥岩等烃源岩发育层段,沉积环境经历了从海陆过渡相到陆相的演变,晚古生代沉积地层物源来源于北部伊盟隆起。该地区在非常规油气勘探过程中针对致密气勘探效果相对不理想、煤层气资源量大的特点,采取两者综合勘探的思路,笔者在对研究区煤层气含气性研究的基础上,分析主要控气因素,进而对该区域的煤层气勘探方向提出建议。

1 煤层展布特征

研究区地表标高一般+950—+1 100 m,根据地震解释 8+9 号煤顶板标高结果及钻井结果(图 1),煤层埋深为 200~2 100 m,分为 3 个区域 I—III, F-2 断层东部深度为 200~1 000 m, F-1—F-2 断层间埋深为 1 000~1 800 m,东部抬升区位于晋西挠褶带内,煤层埋深变化剧烈;西部进入伊陕斜坡带,地层倾角变小,构造平缓,煤层埋深在 1 800~2 100 m 变化。

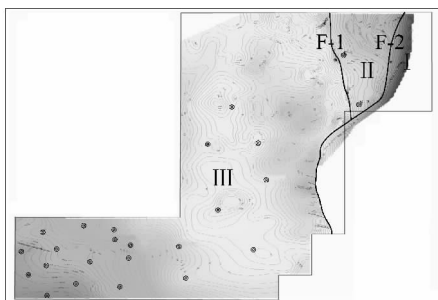


图 1 研究区 8+9 号煤顶板标高等值线

Fig. 1 Contour lines of roof elevation for No. 8+9 coalbed

神府地区煤层总厚平均为 21.3 m,发育 4+5 号煤、8+9 号煤 2 套稳定煤层,2 套煤层一般间距 50~70 m,其中 4+5 号煤厚度为 1.5~4.9 m,平均为 2.96 m;8+9 号煤厚度为 7.4~15.8 m,平均为 12.5 m。4+5 号煤以分叉为主,局部存在合并现象,8+9 号煤大部分合并,局部出现分叉。

2 煤层生烃能力

2.1 煤岩、煤质、储层物性特征

研究区镜质组最大反射率 $R_{o,max}$ 一般为 0.9%~1.2%,以肥煤为主,含少量气煤、焦煤。测试结果显示 4+5 号煤的 $R_{o,max}$ 为 0.80%~1.15%,8+9 号煤为 0.86%~1.39%,同一口井 2 层煤的 $R_{o,max}$ 相差 0.1%~0.2%;分析煤岩的 $R_{o,max}$ 测试结果可知,8+9 号煤的 $R_{o,max}$ 与顶板标高有比较好的相关性(图 2),研究区地表虽有起伏,但受鄂尔多斯盆地东缘整体单斜构造控制,自东向西埋深逐渐增加,参考东部保德地区煤样测试结果,研究区 8+9 号煤的 $R_{o,max}$ 随埋深增加有逐渐增加趋势(图 3),东部晋西挠褶带 $R_{o,max}$ 可低至 0.7% 以下。

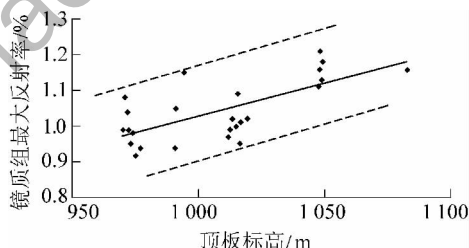


图 2 8+9 号煤镜质组最大反射率与顶板标高关系

Fig. 2 Relationship between vitrinite maximum reflectivity and roof elevation of No. 8+9 coalbed



图 3 8+9 号煤镜质组最大反射率等值线

Fig. 3 Vitrinite maximum reflectivity contour lines of No. 8+9 coalbed

本区宏观煤岩类型以半亮型煤、半暗型煤为主,根据神府地区和南部临兴地区观测对比,从北往南光亮型煤、半亮型煤含量有增加的趋势。煤岩显微

组分以镜质组为主, 惰质组次之, 壳质组含量较少(表 1), 8+9 号煤镜质组含量平均为 54.4%, 高于 4+5 号煤 8% 以上, 惰质组含量一般相反, 邻近的南部区块 8+9 号煤镜质组含量平均为 75.90%, 远高于 4+5 号煤; 无机组分中黏土矿物含量 4+5 号煤远大于 8+9 号煤, 硫化物含量相反, 说明 2 套煤层海陆过渡相与陆相成煤环境的差异性。

密度法测定 2 套煤层孔隙度平均 6.45%, 差别较小, 压汞测试东部煤矿煤样孔隙度可达 8.85%~16.61%^[7]。区块东部紧邻的保德区块渗透率为 $0.3 \times 10^{-3} \sim 12 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 一般在 $2.5 \times 10^{-3} \sim 8 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ^[8]。杨家湾勘查区主力煤层试井解释渗透率为 $0.5 \times 10^{-3} \sim 8 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 一般为 $4 \times 10^{-3} \sim 8 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ^[9]。从钻井岩心观察情况来看, 研究区煤体结构以原生块状结构为主。

2.2 煤岩地化特征

影响煤层生烃的主要因素, 包括有机质丰度、煤

岩宏观特征(组分、类型)、显微特征(组分类型、含量)、煤阶等^[10-14]。对比 2 套煤层, 8+9 号煤形成于海陆过渡相相对深覆水的沼泽环境, 4+5 号煤形成于陆相相对干燥的沼泽环境, 两者虽然有机显微组分含量类似, 但 8+9 号煤镜质组含量高于 4+5 号煤。在壳质组含量相对较低的情况下, 镜质组是生气的主力, 热解显示镜质组生烃能力可达惰质组的 2.5 倍^[12]。

统计 4+5 号煤与 8+9 号煤热解试验得到的有机地化数据, 可见 2 套主要煤层之间总有机碳含量(TOC)无明显差异, 热模拟显示 8+9 号煤生烃潜弱于 4+5 号煤(表 2), 因此在煤的热变质过程中 8+9 号煤累计生烃量要高于 4+5 号煤。另外, 研究区 8+9 号煤平均厚度与 4+5 号煤平均厚度差异巨大, 厚度的巨大差异, 也导致两者生烃强度相差较大, 8+9 号煤生烃强度平均可达 4+5 号煤层的 4 倍左右。

表 1 煤岩分析结果统计

Table 1 Statistics of coal rock analysis results

煤层	有机组分/%				无机组分/%			$R_{o,max}/\%$
	镜质组	壳质组	惰质组	黏土类	氧化物类	碳酸盐类	硫化物类	
4+5	35.1~72.8/46.2	0~3.6/2.1	7.6~26.5/18.6	18.2~50.2/32.3	0.24	0.6	0.12	0.80~1.15/1.00
8+9	42.2~61.0/54.4	0~2.0/1.2	12.4~38.4/24.4	14.5~22.5/18.6	0.80	0.2	1.70	0.86~1.39/1.11

注: 最小~最大/平均。

表 2 4+5 号煤与 8+9 号煤地化特征对比

Table 2 Geochemical characteristics comparison of No. 4+5 coalbed and No. 8+9 coalbed

煤层	TOC/%	$T_{max}/^\circ\text{C}$	$S_0/(mg \cdot g^{-1})$	$S_1/(mg \cdot g^{-1})$	$S_2/(mg \cdot g^{-1})$	产烃潜量/($mg \cdot g^{-1}$)
4+5	44.60~75.40/65.56	434~471/452.25	0.06~9.42/2.61	2.30~25.23/8.00	80.11~378.21/190.89	115.87~387.94/198.89
8+9	35.20~78.10/64.66	437~463/447.3	0.27~2.35/0.97	0.90~7.24/3.72	72.75~181.07/132.85	73.65~165.89/136.57

注: 最小~最大/平均; TOC 为总有机碳含量; T_{max} 为最高热解峰温; S_0 为热解有机 CO_2 量; S_1 为残留(游离)烃含量; S_2 为热解烃含量。

3 煤层气含气特征

中低阶煤孔隙度一般远大于高煤阶煤, 且其中有利于游离气存在及煤层气流通的大孔、中孔含量高, 高者可达到 50% 以上^[15-17], 而高煤阶煤中以微孔、小孔等吸附能力强的孔隙占有优势^[18-19]。两者煤孔隙发育特征不同, 导致含气量构成上也存在差异。

3.1 等温吸附特征

低煤阶煤由于小孔、微孔等吸附能力较强的孔隙含量少, 孔比表面积小, 吸附能力相对高煤阶煤弱。研究区煤样等温吸附试验测得 4+5 号煤朗格缪尔体积 V_L 为 $6.69 \sim 11.07 \text{ cm}^3/\text{g}$, 平均为 8.61

cm^3/g ; 8+9 号煤为 $6.87 \sim 11.78 \text{ cm}^3/\text{g}$, 平均为 $9.23 \text{ cm}^3/\text{g}$ (平衡水分基), 8+9 号煤吸附能力强于 4+5 号煤; 4+5 号煤朗格缪尔压力 P_L 为 $1.38 \sim 2.40 \text{ MPa}$, 8+9 号煤为 $1.29 \sim 4.35 \text{ MPa}$ 。邻近的南部区块测试 4+5 号煤 V_L 为 $7.46 \sim 14.38 \text{ cm}^3/\text{g}$, 平均为 $7.46 \text{ cm}^3/\text{g}$; 8+9 号煤为 $9.48 \sim 20.74 \text{ cm}^3/\text{g}$, 平均为 $12.88 \text{ cm}^3/\text{g}$ (平衡水分基); 4+5 号煤 V_L 为 $3.11 \sim 4.03 \text{ MPa}$, 8+9 号煤为 $2.57 \sim 6.22 \text{ MPa}$ 。8+9 号煤吸附能力要强于 4+5 号煤。

3.2 中低煤阶煤层气含气量构成

测试研究区 4+5 号煤含气量为 $2.85 \sim 7.48 \text{ m}^3/\text{t}$, 平均为 $4.84 \text{ m}^3/\text{t}$; 8+9 号煤为 $3.38 \sim 21.13 \text{ m}^3/\text{t}$,

平均为 $6.98 \text{ m}^3/\text{t}$, 含气饱和度为 $39.84\% \sim 83.76\%$ 。但由于低煤阶煤具有相对高孔、高渗特征, 逸散气散失快, 煤层埋深大, 提钻时间长, 目前现行的解吸方法对低煤阶煤逸散气的估算误差过大, 导致含气量测试不准确。因此笔者对研究区低煤阶煤含气量进行重新估算。

1) 吸附气。基于研究区等温吸附试验测试数据和朗格缪尔吸附等温式(式1)对吸附气量进行估算, 4+5号煤储层吸附气含量平均为 $6.96 \text{ m}^3/\text{t}$, 8+9号煤平均为 $9.01 \text{ m}^3/\text{t}$, 推算其他探井4+5号煤吸附气含量平均为 $7.49 \text{ m}^3/\text{t}$, 8+9号煤平均为 $7.75 \text{ m}^3/\text{t}$ 。

$$V = V_L P / (P_L + P) \quad (1)$$

式中: V 为吸附剂在气体压力为 P 时吸附气体的量, m^3/t ; P 为气体压力, MPa 。

2) 游离气。研究区地层压力系数 $0.870 \sim 1.039$, 平均 0.920 , 东部保德区块杨家湾勘查区等效储层压力梯度为 $0.75 \text{ MPa}/\text{hm}$ 。根据申建等^[20]通过试验获得的孔隙度与有效应力的变化关系, 参考东部及研究区孔隙度测试结果, 埋深 500 m 取孔隙度 12% , 埋深 2000 m 取孔隙度 6% , 求得适合本区的孔隙度 φ 与有效应力 σ 关系如下:

$$\varphi = 34.806\sigma^{-0.512}$$

根据温压条件下甲烷密度, 可用式(2)、式(3)计算游离气含量(假设煤层气中甲烷含量 100% , 孔隙中含气饱和度 90%), 估算4+5号煤游离气含量为 $4.38 \sim 7.38 \text{ m}^3/\text{t}$, 平均为 $5.98 \text{ m}^3/\text{t}$, 8+9号煤为 $4.65 \sim 7.53 \text{ m}^3/\text{t}$, 平均为 $6.57 \text{ m}^3/\text{t}$ 。

$$m_{\text{CH}_4} = \rho_{\text{CH}_4} V = \rho_{\text{CH}_4} (\varphi_f / \rho_{\text{coal}}) \quad (2)$$

$$V_{f, \text{STP}} = 22.4 \times 10^3 m_{\text{CH}_4} / M_{\text{CH}_4} \quad (3)$$

式中: m_{CH_4} 为游离甲烷质量, g ; ρ_{CH_4} 为储层温压条件下甲烷密度, g/cm^3 ; φ_f 为游离气所占孔隙度, $\%$; $V_{f, \text{STP}}$ 为标况下游离气体积, m^3/t ; ρ_{coal} 为煤的密度, t/m^3 ; M_{CH_4} 为甲烷分子量。

3) 溶解气。文献[20]通过煤层水溶甲烷试验得到的溶解气计算式(4)、式(5), 假设西部伊陕斜坡带滞留区矿化度 $20000 \text{ mg}/\text{L}$, 储层温度、压力取均值, 新鲜煤心观察基本不含水, 含水饱和度假设为 10% , 求得地层平缓区4+5号煤水溶气含量为 $0.65 \sim 0.88 \text{ m}^3/\text{t}$, 8+9号煤为 $0.65 \sim 0.86 \text{ m}^3/\text{t}$ 。

$$S_{\text{CH}_4} = 0.55 S_{\text{al}}^{-0.051} T^{-0.020} P^{0.57} \quad (4)$$

$$V_{\text{sol}} = \frac{\varphi S_w}{\rho_{\text{coal}}} S_{\text{CH}_4} \quad (5)$$

式中: S_{CH_4} 为单位地层水甲烷溶解量, m^3/m^3 ; S_{al} 为地层水矿化度, mg/L ; φ 为煤层孔隙度, $\%$; S_w 为煤层水饱和度; V_{sol} 为吨煤甲烷溶解量, m^3/t ; T 为地层温度, $^\circ\text{C}$ 。

估算研究区4+5号煤吸附气含量占比平均为 53.35% , 游离气占比平均为 41.65% , 溶解气为 5% ; 8+9号煤吸附气、游离气、溶解气平均占比分别为 51.71% 、 43.55% 、 4.74% , 煤层气赋存形式以吸附气、游离气为主。高煤阶煤中以吸附气为主, 常规气藏以游离气为主, 高煤阶→中低煤阶→常规气藏储层, 其含气形式存在以吸附气→吸附气、游离气→游离气为主的差异。

3.3 气体组分特征

由于该区煤层埋藏深, 远离煤层风氧化带, 具有甲烷含量高的特征, 气体组分测试甲烷体积分数 $88.16\% \sim 91.45\%$, 平均 89.98% ; 二氧化碳体积分数 $2.11\% \sim 3.23\%$, 平均 2.51% ; 氮气体积分数 $4.50\% \sim 5.72\%$, 平均 4.95% 。且该地区煤层埋藏深, 煤层变质及地下水矿化度条件不利于次生生物气的生成, 因此煤层中的 CO_2 和 N_2 可能主要来源于原生生物气, 生成于泥炭沼泽至煤层埋藏较浅时, 煤层在构造演化中一直未被抬升至浅层地表, 使得其中的非烃类成分得以保存。

4 研究区煤层气保存条件

4.1 构造控气特征

研究区横跨伊陕斜坡与晋西挠褶带, 东部存在2条近南北方向的断裂, F-1断层西部位于伊陕斜坡, 构造平缓, 地层倾角小, 三维地震解释该区域断裂不发育, 研究区中部XX-11—T-1—G-1—XX-8井一线为一宽缓的背斜构造, 有利于煤层气的保存。F-1断层以东, 地层埋深变化大、倾角大, 断裂以高角度逆断层为主, 对煤层气的运移仍有一定的封闭作用。

4.2 顶底板封盖性

顶底板对煤储层的封盖性受其岩性及完整性影响, 研究区煤系地层发育稳定的区域性泥岩盖层, 4+5号煤与8+9号煤直接顶底板均以炭质泥岩、泥岩、粉砂质泥岩为主, 个别井煤层与致密砂岩接触, 且研究区煤储层邻近的致密砂岩含气层测试效果相对不理想, 也显示煤层中仍含有相当的煤层气, 另外研究区位于伊陕斜坡部分构造简单, 顶底板裂隙不发育, 该区域可能更有利于煤层气的保存。

4.3 地下水运移控气作用

本区东部奥陶系~二叠系地层出露,大气降水 and 地表水侧向补给进入含煤地层,东部保德区块地层水矿化度向西逐渐升高^[21],研究区西南部煤系地层致密气试气的井地层水矿化度一般远大于10 000 mg/L,本区自东向西经过地下水补给区→径流区→滞留区,位于伊陕斜坡的大部分地区位于地下水流动缓慢的滞留区,有利于煤层气的赋存。

5 研究区煤层气成藏模式及勘探方向

根据研究区煤储层发育的地质特征,可将煤层气成藏模式分为以下3种类型(图4)。

1) 构造岩性型煤层气藏。煤层埋藏深度大(1 800~2 000 m), $R_{o,max}$ 为1.0%~1.2%,地下水位于滞留区,矿化度大,不利于次生生物气生成;构造上位于伊陕斜坡,构造简单,断裂不发育,含气量受构造、顶底板岩性控制;游离气含量高,可占总含气量的40%以上。

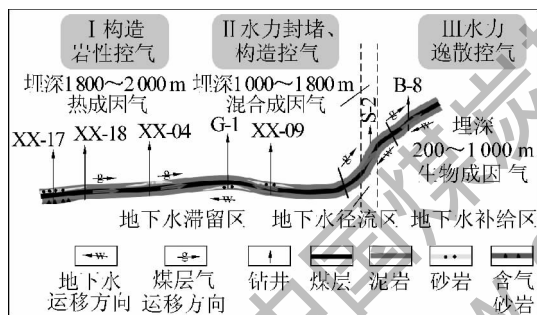


图4 神府地区煤层气成藏模式

Fig. 4 Coalbed methane accumulation model for Shenfu Area

2) 水力封堵、构造型煤层气气藏。煤层埋藏深度变化大(1 000~1 800 m), $R_{o,max}$ 为0.8%~0.9%,位于地下水径流区,地下水对向上运移的煤层气有封堵作用,煤层气混合成因;构造变复杂,断裂发育,以高角度逆断层为主,封闭性的逆断层对煤层气有一定的保存作用;含气性受地下水封堵、逆断层控制。

3) 水力逸散型煤层气气藏。煤层埋藏深度相对小(200~1 000 m), $R_{o,max}$ 为0.6%~0.8%,位于地下水补给及强径流区,地下水流动性强,一方面使得含气量降低,另一方面地下水矿化度低,煤岩变质程度低,次生生物气大量生成;地层倾角大,断裂相对发育;含气性受地下水影响较大。

综合前述,研究区4+5号煤层横向变化大、厚

度薄、连续稳定性不高,是本区次要的勘探目的层,而8+9号煤厚度大、分布稳定、煤体结构完整、资源潜力大,是本区首要勘探目的层。特别是研究区中部的XX-11—T-1—G-1—XX-8井宽缓背斜区域,具有构造简单,煤储层顶底板封盖条件优越,地下水位于滞留区等有利的煤层气保存条件,加上该区域煤层孔隙度大、渗透率高,油气运移可能满足达西定律,导致该区域煤层具有游离气含量较高的可能,彬长矿区^[22]、鄂尔多斯东气田在勘探开发过程中中低煤阶煤构造高点见气时间短、产水量低、产气量大的特点也印证了这一观点,该区域进行煤层气勘探前景广阔。

6 结 论

1) 神府地区深部中低阶煤层气赋存以吸附气、游离气为主,高煤阶→中低煤阶→常规气藏储层,其含气形式存在以吸附气→吸附气、游离气→游离气为主的差异。

2) 研究区煤层气成藏模式可分为以下3种成藏类型:①构造岩性型煤层气气藏;②水力封堵、构造型煤层气气藏;③水力逸散型煤层气气藏。

3) 基于研究区中低阶煤游离气含量高特点,结合煤层气赋存条件,8+9号煤位于研究区中部背斜区的“构造高点”是煤层气勘探的有利方向。

参考文献:

[1] 侯海海,邵龙义,唐跃,等.我国低煤阶煤层气成因类型及成藏模式研究[J].中国矿业,2014,32(7):66-69,95.
Hou Haihai, Shao Longyi, Tang Yue, et al. Study on coal bed methane genetic types and formation models of low rank coal in China [J]. China Mining Magazine, 2014, 32(7): 66-69, 95.

[2] 张先敏,冯其红,汪旭升,等.低煤阶煤层气藏物质平衡方程建立及应用[J].天然气地球科学,2013,24(6):1311-1315.
Zhang Xianmin, Feng Qihong, Wang Xusheng, et al. Establishment and application of material balance equations for low-rank coalbed methane reservoirs [J]. Natural Gas Geosciences, 2013, 24(6): 1311-1315.

[3] 雷怀玉,孙钦平,孙斌,等.二连盆地霍林河地区低煤阶煤层气成藏条件及主控因素[J].天然气工业,2010,30(6):26-30.
Lei Huaiyu, Sun Qiping, Sun Bin, et al. Conditions and major controlling factors of coalbed methane accumulation in coal reservoirs with low coal rank in the Huolinhe area, Erlian basin [J]. Natural Gas Industry, 2010, 30(6): 26-30.

[4] 李志军,李新宁,梁辉,等.吐哈和三塘湖盆地水文地质条件对低煤阶煤层气的影响[J].新疆石油地质,2013,34(2):158-161.

- Li Zhijun, Li Xinning, Liang Hui, *et al.* Effect of hydrogeological conditions on low-rank coalbed methane in Tuha basin and Santanghu Basins [J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 2013, 34(2): 158-161.
- [5] 叶欣, 陈纯芳, 姜文利, 等. 我国低煤阶煤层气地质特征及最新进展[J]. *煤炭科学技术*, 2009, 37(8): 111-115.
Ye Xin, Chen Chunfang, Jiang Wenli, *et al.* Geological characteristics and new development progress of low rank seam coal bed methane in China [J]. *Coal Science and Technology*, 2009, 37(8): 111-115.
- [6] 秦勇, 袁亮, 胡千庭, 等. 我国煤层气勘探与开发技术现状及发展方向[J]. *煤炭科学技术*, 2012, 40(10): 1-6.
Qin Yong, Yuan Liang, Hu Qianting, *et al.* Status and development orientation of coal bed methane exploration and development technology in China [J]. *Coal Science and Technology*, 2012, 40(10): 1-6.
- [7] 季伟, 吴国光, 孟献梁, 等. 神府煤孔隙特征及活性结构对自燃的影响研究[J]. *煤炭技术*, 2011, 30(4): 87-89.
Ji Wei, Wu Guoguang, Meng Xianliang, *et al.* Effect of Shenfu coal pore characteristic and active structure on spontaneous combustion [J]. *Coal Technology*, 2011, 30(4): 87-89.
- [8] 彭少涛, 刘川庆, 朱卫平, 等. 保德区块中低阶煤压裂存在的问题及技术对策[C]//2011年煤层气学术研讨会论文集-中国煤层气技术进展. 北京: 地质出版社, 2011: 303-309.
- [9] 屈晓荣. 河东煤田杨家湾勘查区主煤储层特征分析及意义[J]. *中国煤炭地质*, 2012, 24(11): 29-29.
Qu Xiaorong. Main coal reservoir characteristic analysis and its significance [J]. *Coal Geology of China*, 2012, 24(11): 29-29.
- [10] 张文正, 徐正球. 低阶煤热演化生烃的模拟试验研究[J]. *天然气工业*, 1986, 6(2): 1-7.
Zhang Wenzheng, Xu Zhengqiu. Modeling experimental research of hydrocarbon generation from the thermal evolution of low grade coal [J]. *Natural Gas Industry*, 1986, 6(2): 1-7.
- [11] 汤达祯, 王激流, 张君峰, 等. 鄂尔多斯盆地东缘煤的二次生烃作用与煤层气的富集[J]. *石油实验地质*, 2000, 22(2): 140-145.
Tang Dazhen, Wang Jiliu, Zhang Junfeng, *et al.* Secondary hydrocarbon generation of coal and accumulation of coalbed methane in the east margin of the Ordos Basin [J]. *Experimental Petroleum Geology*, 2000, 22(2): 140-145.
- [12] 李小彦, 司胜利. 鄂尔多斯盆地煤的热解生烃潜力与成烃母质[J]. *煤田地质与勘探*, 2008, 36(3): 1-11.
Li Xiaoyan, Si Shengli. The hydrocarbon potential and precursor types of coal pyrogenation in Ordos Basin [J]. *Coal Geology & Exploration*, 2008, 36(3): 1-11.
- [13] 刘大猛, 杨起, 汤达祯. 鄂尔多斯盆地煤成烃潜力与成气热模拟实验[J]. *现代地质*, 1997, 11(3): 322-329.
Liu Dameng, Yangqi, Tang Dazhen. Coal-derived hydrocarbon potential and thermal stimulating experiment on coal-derived gas from Ordos Basin [J]. *Geoscience*, 1997, 11(3): 322-329.
- [14] 敖卫华, 黄文辉, 姚艳斌. 鄂尔多斯盆地北部煤系有机显微组分特征与生烃潜力[J]. *吉林大学学报: 地球科学版*, 2011, 41(S1): 91-97.
Ao Weihua, Huang Wenhui, Yao Yanbin. Macerals' characteristics and hydrocarbon generation potential of coal-bearing series in the northern Ordos basin [J]. *Journal of Jilin University: Earth Science Edition*, 2011, 41(S1): 91-97.
- [15] 王可新. 低煤阶储层三相态含气量物理模拟与数值模拟研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2010: 72-73.
Wang Kexin. Physical simulation and numerical simulation of adsorbed state, solubel state and free state gas volume in low rank coal reservoir [D]. Xuzhou: China University of Mining & Technology, 2010: 72-73.
- [16] 刘爱华, 傅雪海, 梁文庆, 等. 不同煤阶煤孔隙分布特征及对煤层气开发的影响[J]. *煤炭科学技术*, 2013, 41(4): 104-108.
Liu Aihua, Fu Xuehai, Liang Wenqing, *et al.* Pore distribution features of different rank coal and influences to coal bed methane development [J]. *Coal Science and Technology*, 2013, 41(4): 104-108.
- [17] 傅雪海, 邢雪, 刘爱华, 等. 华北地区各类煤储层孔隙、吸附特征及试井成果分析[J]. *天然气工业*, 2011, 31(12): 72-75.
Fu Xuehai, Xing Xue, Liu Aihua, *et al.* Analysis of porosity, adsorption characteristics and well test results of coal beds with different ranks in North China [J]. *Natural Gas Industry*, 2011, 31(12): 72-75.
- [18] 戚灵芝, 王兆丰, 杨宏民, 等. 基于低温氮吸附法和压汞法的煤样孔隙研究[J]. *煤炭科学技术*, 2012, 40(8): 36-39.
Qi Lingling, Wang Zhaofeng, Yang Hongmin, *et al.* Study on porosity of coal samples based on low temperature nitrogen adsorption method and mercury porosimetry [J]. *Coal Science and Technology*, 2012, 40(8): 36-39.
- [19] 周龙刚, 吴财芳. 黔西比德-三塘盆地主采煤层孔隙特征[J]. *煤炭学报*, 2012, 37(12): 1878-1884.
Zhou Longgang, Wu Caifang. Pore characteristics of the main coal seams in Bide-Santang Basin in western Guizhou Province [J]. *Journal of China Coal Society*, 2012, 37(12): 1878-1884.
- [20] 申建社, 磊, 秦勇, 等. 深部低煤阶三相态含气量建模及勘探启示[J]. *天然气工业*, 2014, 35(3): 1-6.
Shen Jian, Du Lei, Qin Yong, *et al.* Three-phase gas content model of deep low-rank coals and its implication for CBM exploration: A case study from the Jurassic coal in the Junggar Basin [J]. *Natural Gas Industry*, 2014, 35(3): 1-6.
- [21] 田文广, 邵龙义, 孙斌, 等. 保德地区煤层气井产出水化学特征及其控气作用[J]. *天然气工业*, 2014, 34(8): 15-19.
Tian Wenguang, Shao Longyi, Sun Bin, *et al.* Chemical behaviors of produced water from CBM wells in the Baode area, Shanxi, China and their control on gas accumulation [J]. *Natural Gas Industry*, 2014, 34(8): 15-19.
- [22] 李金平, 汤达祯, 许浩, 等. 低煤阶煤层气井抽采特征及影响因素分析[J]. *煤炭科学技术*, 2013, 41(12): 53-56.
Li Jinping, Tang Dazhen, Xu Hao, *et al.* Analysis on gas drainage features and influence factors of low rank coalbed methane well [J]. *Coal Science and Technology*, 2013, 41(12): 53-56.