

二连盆地吉尔嘎朗图凹陷低煤阶煤层气富集模式

孙钦平^{1,2} 王生维¹ 田文广² 孙斌² 陈彦君³
杨青² 陈浩² 杨敏芳² 祁灵²

1. 中国地质大学(武汉) 2. 中国石油勘探开发研究院 3. 中国石油华北油田公司

摘 要 二连盆地为我国典型低煤阶褐煤分布区,煤层气资源丰富,但煤层气富集成藏机制认识不足制约了该区低煤阶煤层气的勘探开发。为此以二连盆地吉尔嘎朗图凹陷低煤阶煤层气为研究对象,从煤层分布、含气性、煤层气成因、生物成因气模拟实验、保存条件等方面研究了该区煤层气富集的主控因素,并指出了下一步的勘探方向。研究结果表明:①浅水湖盆聚煤环境下,凹陷中部一缓坡带厚煤层发育,厚煤层弥补了含气量的不足;②含煤段堆积过程中,浅水湖泊周期性出现使得煤层上覆泥岩周期性发育,盖层条件有利;③凹陷中部一缓坡带位于地下水承压区,水动力侧向封堵有利于煤层气富集;④研究区煤层气为生物成因,原位条件下煤样产气 0.25 mL/g,现今仍有生物气生成。结论认为:①厚煤层发育区、具备生物气生成以及良好的封盖条件并处于水动力承压区为吉尔嘎朗图凹陷煤层气富集成藏的关键;②吉尔嘎朗图凹陷煤层气富集模式为生物气+承压水封堵煤层气富集,中部一缓坡带 L12—S88 井区为下一步煤层气建产的有利区。

关键词 二连盆地 吉尔嘎朗图凹陷 断陷盆地 低煤阶 煤层气 生物气 承压水封堵 富集模式 有利区

DOI: 10.3787/j.issn.1000-0976.2018.04.007

Accumulation patterns of low-rank coalbed methane gas in the Jiergalangtu Sag of the Erlian Basin

Sun Qinqing^{1,2}, Wang Shengwei¹, Tian Wenguang², Sun Bin², Chen Yanjun³,
Yang Qing², Chen Hao², Yang Minfang² & Qi Ling²

(1. China University of Geosciences - Wuhan, Wuhan, Hubei 430074, China; 2. PetroChina Research Institute of Petroleum Exploration & Development, Langfang, Hebei 065007, China; 3. PetroChina Huabei Oilfield Company, Renqiu, Hebei 062552, China)

NATUR. GAS IND. VOLUME 38, ISSUE 4, pp.59-66, 4/25/2018. (ISSN 1000-0976; In Chinese)

Abstract: The Erlian Basin is a typical low-rank lignite distribution area in China. Its coalbed methane (CBM) resources are abundant, but the CBM enrichment and accumulation mechanisms are not understood sufficiently, which restricts the exploration and development of low-rank CBM gas. In this paper, with low-rank CBM gas reservoirs in the Jiergalangtu Sag of the Erlian Basin as an example, the main factors controlling CBM accumulation were analyzed from the aspects of coal bed distribution, gas content, CBM origin, biogenic gas simulation experiment and preservation conditions, and then the future exploration direction was pointed out. Some results were obtained. First, a thick coal bed is developed at the central belt-gentle slope of the Jiergalangtu Sag in the coal forming environment of shallow lake basins, and it compensates for the deficiency of gas content. Second, mudstones overlying coal beds are developed periodically due to the periodic occurrence of shallow lake during the accumulation of coal bearing sections, so the caprocks are favorable. Third, the central belt-gentle slope of the Jiergalangtu Sag is located in a confined groundwater area, where the hydraulic lateral sealing is favorable for CBM accumulation. Fourth, CBM in the study area is biogenic with an in-situ gas production ratio of 0.25 mL/g, and currently the generation of biogenic gas still continues. Fifth, the CBM enrichment pattern in the fault basin is that biogas and CBM gas are both sealed by confined water. It is concluded that the key factors for CBM accumulation in the Jiergalangtu Sag are thick coal beds, biogas generation, favorable seals/caprocks and hydraulic confined areas. Besides, the Well L12-S88 area in the central belt-gentle slope of the Jiergalangtu Sag is the favorable area for future CBM productivity construction.

Keywords: Erlian Basin; Jiergalangtu Sag; Fault basin; Low-rank coal; Coalbed methane (CBM); Biogas; Sealed by confined water; Accumulation pattern; Favorable area

基金项目: 国家科技重大专项“东北地区中低煤阶煤层气规模开发区块优选评价”(编号:2011ZX05041-004)、中国石油天然气股份有限公司重大科技专项“煤层气勘探开发关键技术研究与应用”(编号:2017E14)。

作者简介: 孙钦平, 1982年生, 高级工程师, 硕士; 主要从事煤层气地质与勘探、煤层气与页岩气规划等方面的研究工作。地址:(065007)河北省廊坊市广阳区万庄44号信箱。ORCID: 0000-0001-7434-8163。E-mail: sunxp69@petrochina.com.cn

通信作者: 田文广, 1979年生, 高级工程师, 博士; 主要从事煤层气地质与开发、致密砂岩气地质综合评价等方面的研究工作。地址:(065007)河北省廊坊市广阳区万庄44号信箱。ORCID: 0000-0002-9895-5483。E-mail: tianwg69@petrochina.com.cn

0 引言

低煤阶煤形成于煤化作用初期,一般指镜质体反射率(R_o)小于0.65%的褐煤、长焰煤^[1-4]。我国低煤阶煤层气资源量达 $10.3 \times 10^{12} \text{ m}^3$ (据第四次全国油气资源评价结果),但勘探开发程度低。美国粉河盆地、加拿大阿尔伯塔盆地等低煤阶褐煤区已实现煤层气商业开发,而我国煤层气勘探开发较好的地区煤级一般达到长焰煤—气煤及以上,准噶尔、吐哈、二连、海拉尔等盆地褐煤含煤区煤层气勘探效果均不理想。

对于二连盆地群煤层气富集成藏机理的研究较少,目前主要集中在煤层气成藏条件、煤储层特征、资源潜力等方面^[5-7],认为二连盆地煤层气资源丰富,是我国低煤阶煤层气勘探现实的有利区。但对其煤层气富集成藏机理认识不足,制约了低煤阶煤层气的勘探开发。笔者以二连盆地吉尔嘎朗图凹陷低煤阶煤层气为研究对象,通过对该凹陷煤层的分布、含气量、成因、水文地质条件、保存条件等的研究,探讨了该区煤层气的富集模式,指出了下一步的勘探方向。

1 煤层气基本地质特征

二连盆地群是在天山—兴蒙褶皱带海西柔性地槽褶皱基底上发育起来的中—新生代裂谷型含煤盆地群,呈“五坳一隆”构造格局^[8-10]。吉尔嘎朗图凹陷位于盆地东部的乌尼特坳陷,呈北东走向,为一西北断、东南超的半地堑型凹陷^[11],面积约 $1\,000 \text{ km}^2$ 。凹陷基底为古生界轻变质岩,凹陷地层自下而上发育中下侏罗统阿拉坦合力群、上侏罗统兴安岭群、下白垩统巴彦花群、古近系、新近系和第四系。其中,下白垩统巴彦花群为最重要的沉积地层,自下而上分为阿尔善组、腾格尔组、赛汉塔拉组,垂向上总体表现为下粗、中细、上粗沉积特征。受控盆地同沉积断层影响,凹陷陡坡带主要发育冲积扇相、扇三角洲相等粗碎屑沉积,缓坡带主要发育辫状河三角洲相,凹陷中部发育湖相沉积。在盆地构造演化的初始张裂期和萎缩期,发育阿拉坦合力群和赛汉塔拉组两套含煤建造^[8-9]。其中阿拉坦合力群煤层分布面积小、厚度薄;赛汉塔拉组发育巨厚煤层,是研究区主要的含煤地层,岩性主要为砂岩、粉砂岩、泥岩和厚煤层,含6个煤组,其中II、III、IV煤组分布较广(图1)。富煤带位于凹陷中部—缓坡带,煤层总厚度介于 $60 \sim 220 \text{ m}$,最大累计厚度 391 m ;煤层埋深较浅,

介于 $100 \sim 900 \text{ m}$,最深不超过 $1\,000 \text{ m}$,总体沿盆地边缘向盆地中心逐渐变深。

吉尔嘎朗图凹陷煤层腐殖组 R_o 介于 $0.32\% \sim 0.48\%$,以褐煤为主。据等温吸附实验数据显示(空气干燥基),研究区煤层兰氏体积介于 $2.95 \sim 6.00 \text{ m}^3/\text{t}$,实测煤层含气量介于 $0.40 \sim 3.83 \text{ m}^3/\text{t}$,一般介于 $1.0 \sim 3.5 \text{ m}^3/\text{t}$,平均值为 $1.75 \text{ m}^3/\text{t}$,计算煤层吸附饱和度介于 $74\% \sim 91\%$,表明研究区煤层含气性较好。实测煤层气甲烷含量 $75.16\% \sim 90.25\%$,也反映了该区煤层气保存条件较好。纵向上含气量、甲烷含量均与埋深呈正相关关系(图2),深度 $250 \sim 300 \text{ m}$ 以深煤层含气量一般大于 $1.0 \text{ m}^3/\text{t}$,甲烷含量超过 80% ,表明该区甲烷风化带深度介于 $250 \sim 300 \text{ m}$ 。据实测煤层含气量数据,并参考煤层段气测异常分布^[8],平面上凹陷中部富煤带煤层含气量最高,往西北陡坡带、南东缓坡带浅层,煤层含气量逐渐变低。

2 煤层气成藏主控因素

2.1 凹陷中部—缓坡带厚煤层发育,弥补了含气量的不足

沉积序列和聚煤规律研究表明,研究区含煤层系主要发育在断陷盆地发育阶段的后期和拗陷期^[12-13]。该时期盆地抬升,湖盆淤塞,水体变浅,沉积稳定,有利于煤层形成和积聚。吉尔嘎朗图凹陷赛汉塔拉组就是在大型湖泊完全淤浅的基础上,在扇前浅水湖盆和扇前泛滥平原广泛泥炭沼泽化,发生了强烈的聚煤作用。平面上在陡坡带发育冲积扇、扇三角洲等粗碎屑沉积,聚煤较差;凹陷中部—缓坡带发育(辫状河)三角洲、湖沼相等沉积,利于聚煤。吉尔嘎朗图凹陷赛汉塔拉组煤层具有厚度大、层数多的特点,主要分布于凹陷中部—缓坡带。煤层总厚度一般介于 $60 \sim 220 \text{ m}$,最大累计厚度 391 m ,厚煤带主要分布于L6—J91井区(大于 180 m),向四周分岔减薄、尖灭(图3)。

如前所述,研究区低煤阶煤层含气量较低(小于 $4 \text{ m}^3/\text{t}$),远低于中高煤阶煤层含气量($10 \sim 30 \text{ m}^3/\text{t}$),但厚煤层弥补了含气量的不足,大大提高了煤层气资源丰度^[8]。

2.2 厚煤层上覆泥岩盖层发育,封盖条件有利

吉尔嘎朗图凹陷赛汉塔拉组沉积期构造基本定型,构造活动平缓,大部分断层都停止活动或活动微弱,因此,断层对煤层气的破坏作用很小,对煤

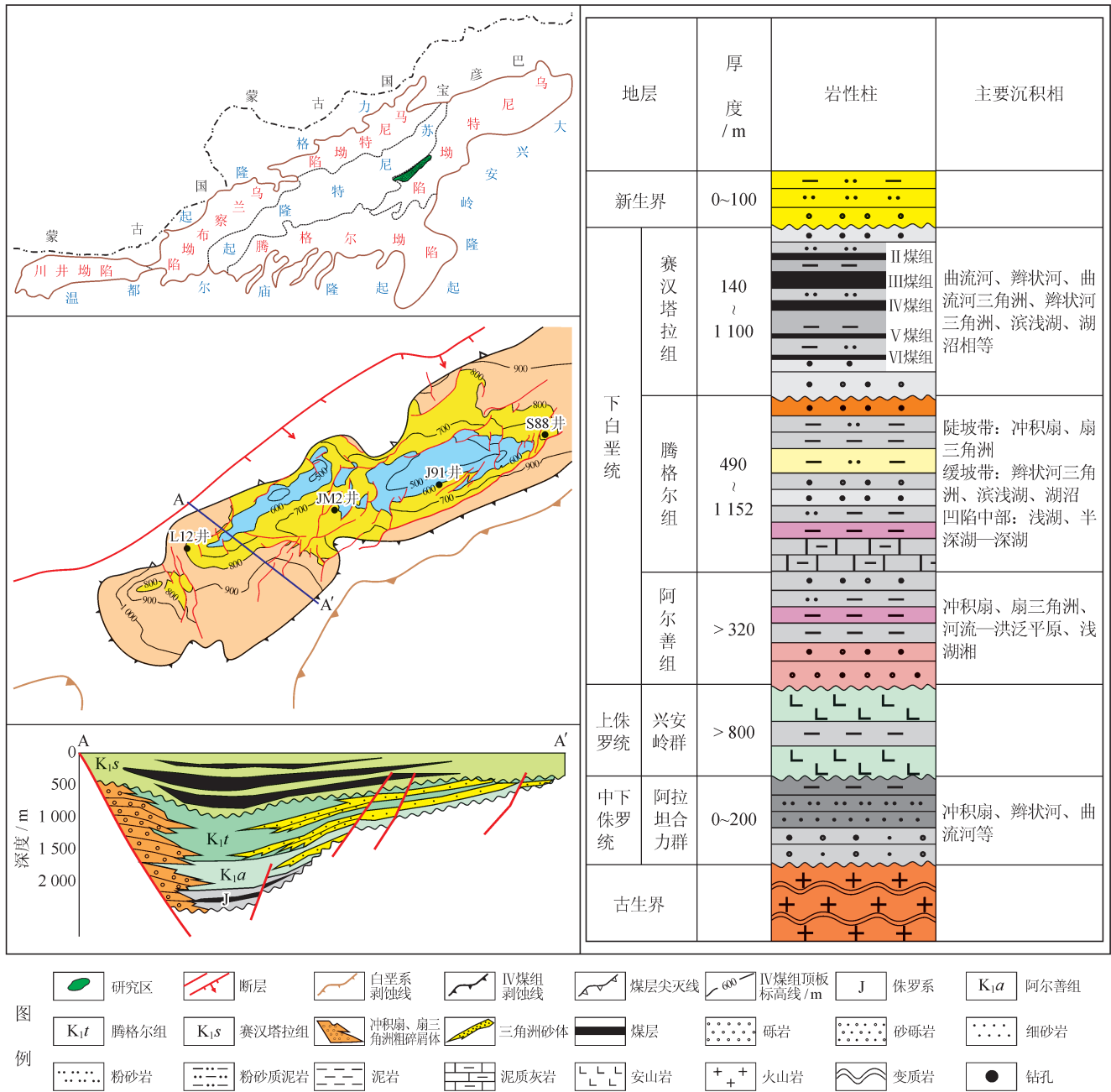


图 1 吉尔嘎朗图凹陷构造与地层地质综合图

层气藏保存影响较大的主要为泥岩盖层封闭。

赛汉塔拉组在湖泊淤浅的基础上在扇前浅水湖盆和扇前泛滥平原广泛泥炭沼泽化，在凹陷中部一缓坡带强烈聚煤，而含煤段堆积过程中浅水湖泊周期性出现也使得煤层上覆泥岩周期性发育，直接顶板多为泥岩^[14]，煤层上覆地层 20 m 内泥岩累计厚度 5~20 m，稳定分布于凹陷中部一缓坡带，与巨厚煤层形成良好的储盖组合，利于煤层气的保存。凹陷内赛汉塔拉组含砂率统计表明，凹陷中部一缓坡带富煤区含砂率一般低于 20%^[15]，表明含煤地层区域性泥岩

盖层的发育具有较好的自封闭能力，有利于煤层气富集^[16-17]。

2.3 凹陷中部一缓坡带位于地下水承压区，水动力侧向封堵利于煤层气保存

水文地质条件是影响低煤阶煤层富集成藏的重要因素之一，主要体现为影响生物气的生成^[18]，一般认为适于生物气生成的水文地质条件要求水介质低盐度和较低矿化度，前人研究 pH 值范围不尽相同，一般认为 pH 值介于 6.4~8.0 最好^[19-20]。凹陷内与煤层气关系密切的赛汉塔拉组含水层水类型多为 NaHCO₃

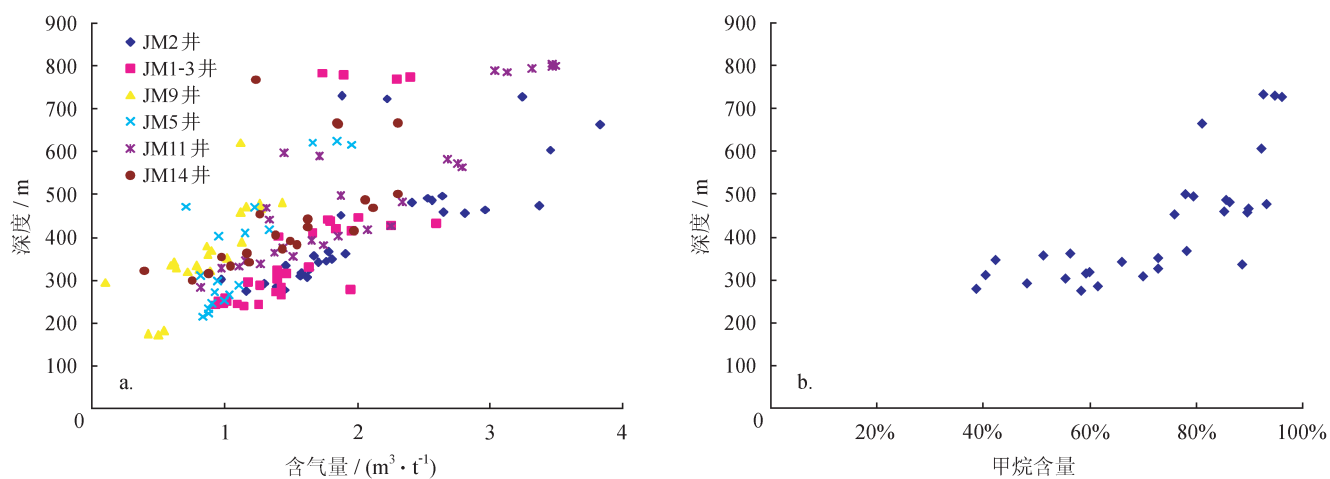


图 2 吉尔嘎朗图凹陷含气量、甲烷浓度随埋深变化图

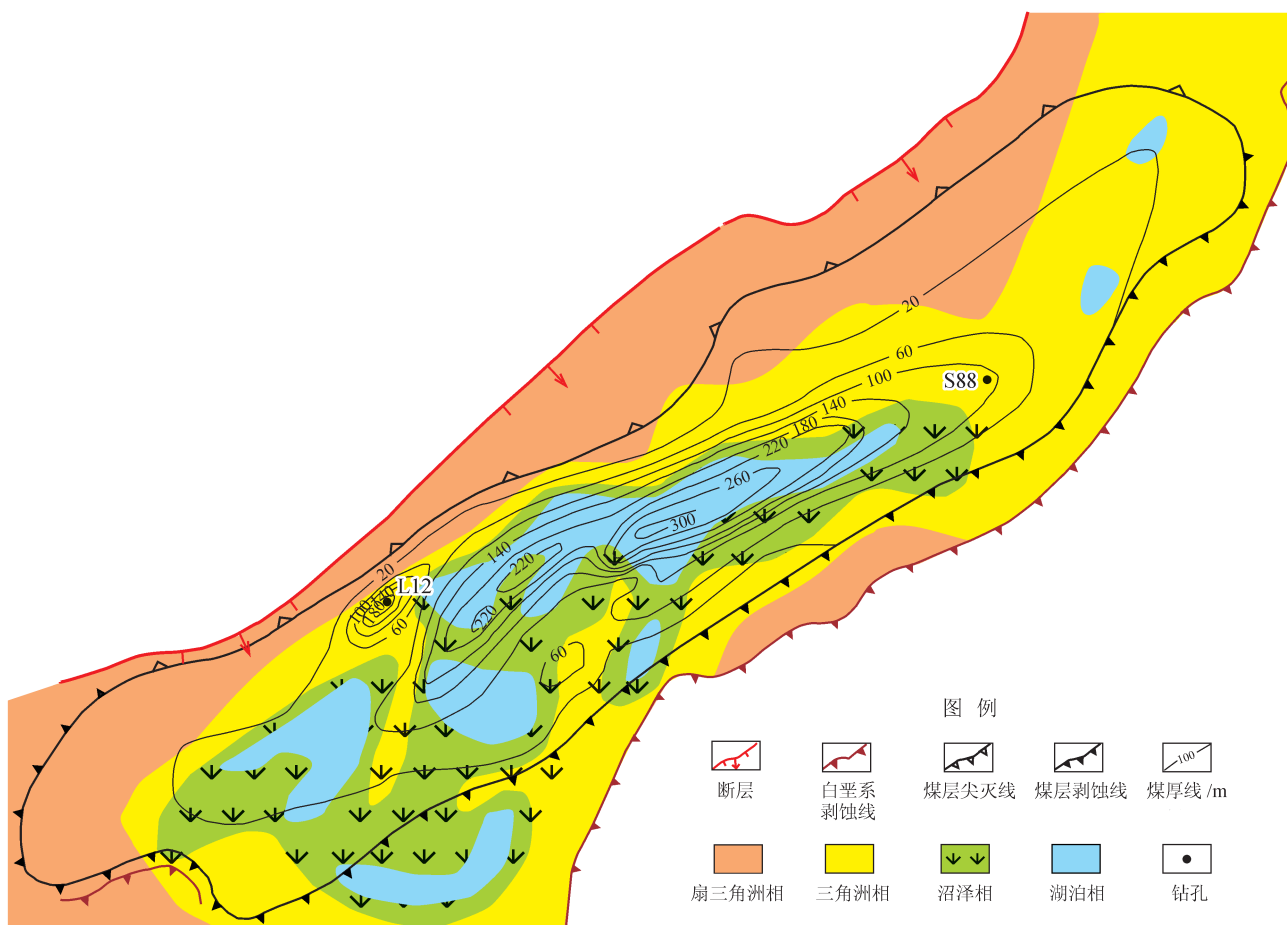


图 3 吉尔嘎朗图凹陷煤层总厚度与沉积相叠合图

型，煤层气井产出水矿化度介于 4 000 ~ 6 400 mg/L，pH 值范围介于 7.32 ~ 7.76（表 1），利于生物气生成。

凹陷为不对称箕状向斜，地层平缓，中部为汇水承压区，水动力侧向封堵利于煤层气富集。煤层气井注入 / 压降与 DST 测试（钻杆测试）结果也显

示地层超压，压力系数介于 1.03 ~ 1.07，利于煤层气的保存。

2.4 煤层气为生物成因气，现今仍有生物气生成

前人提出了多个关于生物气成因判识指标^[21-26]，生物气的最显著特征表现在两个方面：①气组分以

表 1 吉尔嘎朗图凹陷煤层水化学特征测试结果统计表

井号	产层	离子含量 / (mg · L ⁻¹)								总矿化度 / (mg · L ⁻¹)	pH 值
		Na ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	CO ₃ ²⁻		
JM1 井	III 煤	1 309.05	58.00	11.76	20.59	558.40	26.45	2 701.69	34.43	4 720.37	7.60
JM2 井	III 煤	1 481.94	54.91	16.43	21.98	570.88	1.71	3 185.52	50.46	5 383.83	7.73
JM3 井	IV 煤	1 476.88	60.70	7.08	24.49	792.85	7.19	2 722.92	47.27	5 193.38	7.76
JM4 井	IV 煤	1 576.90	84.55	6.72	14.28	908.12	2.59	2 751.90	51.14	5 496.20	7.56
JM1-1 井	IV 煤	1 102.02	7.93	8.07	19.12	423.26	31.54	2 226.70	35.54	3 854.18	7.67
JM1-2 井	IV 煤	1 526.13	27.88	14.19	33.32	524.98	21.31	3 281.54	58.50	5 487.85	7.32
JM1-3 井	IV 煤	1 431.94	27.18	11.47	24.71	549.53	38.39	3 020.69	56.35	5 160.26	7.55
JM1-4 井	IV 煤	1 379.28	23.44	11.44	28.44	467.81	50.32	2 980.02	35.28	4 976.03	7.56
JM1-5 井	IV 煤	1 191.35	19.68	8.07	24.51	414.01	35.84	2 509.25	41.66	4 244.37	7.49
JM9 井	IV 煤	1 176.24	20.00	7.55	22.04	370.22	1.41	2 594.56	41.45	4 233.47	7.49

甲烷为主，干燥系数较高；②甲烷碳同位素值较轻。吉尔嘎朗图凹陷已钻煤层气井实测煤层气甲烷碳同位素值介于-60.3‰~-65.3‰，氢同位素值介于-216.0‰~-269.0‰，气组分以甲烷为主，干燥系数大于 170。将测试数据投入 Kotarba 模板^[27]中(图 4-a)，显示研究区煤层气为生物气成因。而基于 $\delta^{13}C_{CH_4}-\delta D_{CH_4}$ 关系的成因分析也显示(图 4-b)，吉尔嘎朗图凹陷生物气类型处于二氧化碳还原型和乙酸发酵还原型过渡带。

研究表明，可以通过实验模拟自然条件下生物成因煤层气的生成过程、机理、生气潜力、影响因素及地质条件等^[29-34]。为了确定生物气生气潜力，开展了吉尔嘎朗图凹陷煤样本源微生物分析及原位产气模拟实验。实验结果证实：①实验样品通过煤岩

生物标志化合物降解、微生物 DNA 提取等检测出煤岩样品中产甲烷菌普遍存在；②原位条件下煤样在实验室不添加任何物质情况下仍产气(图 5)，其中 IV 煤组每克煤样产气 11.10 μmol (相当于 0.25 mL/g)，表明吉尔嘎朗图凹陷煤层现今仍有生物气生成；③添加接种物能促进煤层快速产气(第 8 天即开始产气)，提高产气效率，如 III 煤组每克样品产气 18.40 μmol (相当于 0.41 mL/g)。

3 煤层气富集模式

综合上述研究，吉尔嘎朗图凹陷中部一缓坡带厚煤层发育，弥补含气量不足；富煤区顶板泥岩发育，盖层条件好；水文条件优越，利于生物气生成，同

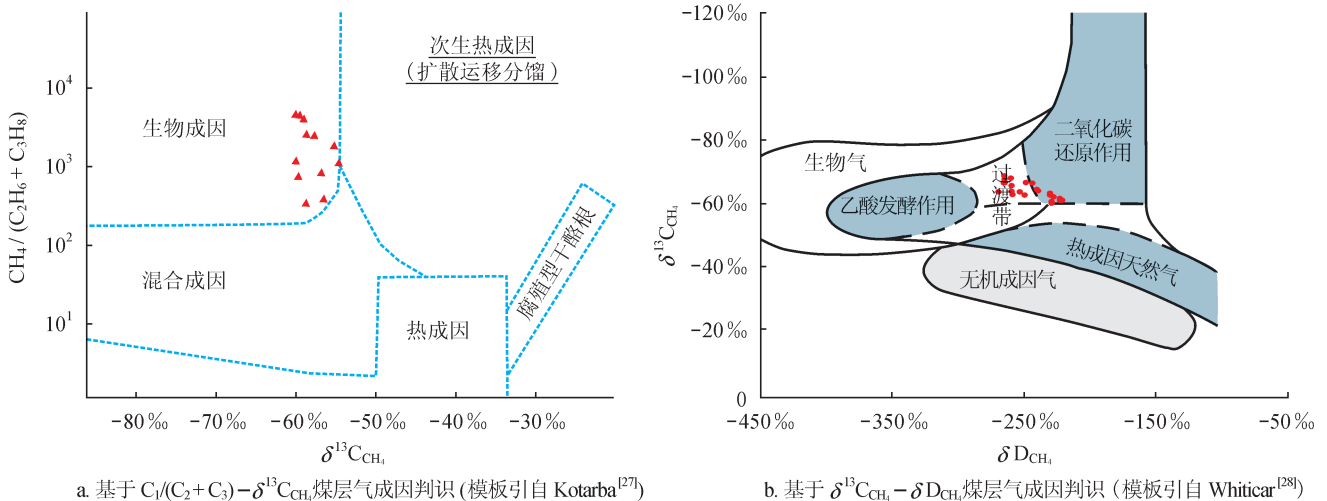


图 4 吉尔嘎朗图凹陷煤层气成因判识图

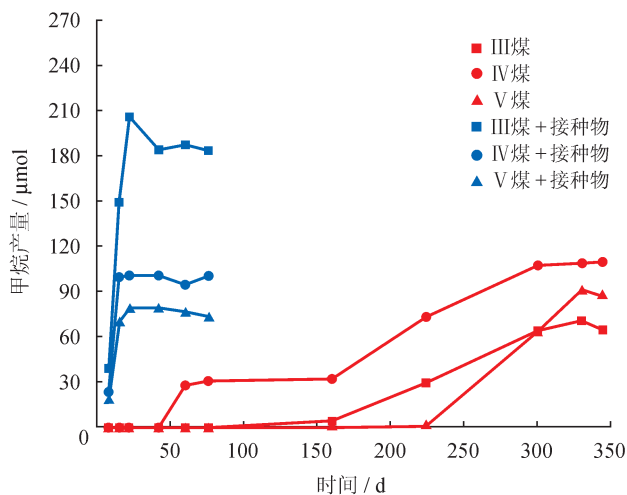


图5 吉尔嘎朗图凹陷JM2井煤样生物气模拟实验结果图 (煤样重 10 g)

时凹陷中部汇水承压区利于煤层气侧向封堵。提出厚煤层发育区、具备生物气生成以及良好的封盖条件并处于水动力承压区为吉尔嘎朗图凹陷煤层气富集成藏的关键。在此基础上建立了研究区断陷盆地富煤区生物气+承压水封堵煤层气富集模式(图6)。

根据研究区煤层气富集主控因素与富集模式研究结果,结合《煤层气资源/储量规范》(DZ/T0216—2010),综合优选出吉尔嘎朗图凹陷中部一缓坡带L12—S88井区为下一步煤层气建产的有利区(图3),有利区面积约 100 km²,资源量 400×10⁸ m³。

4 结论

1) 二连盆地吉尔嘎朗图凹陷中部一缓坡带厚煤

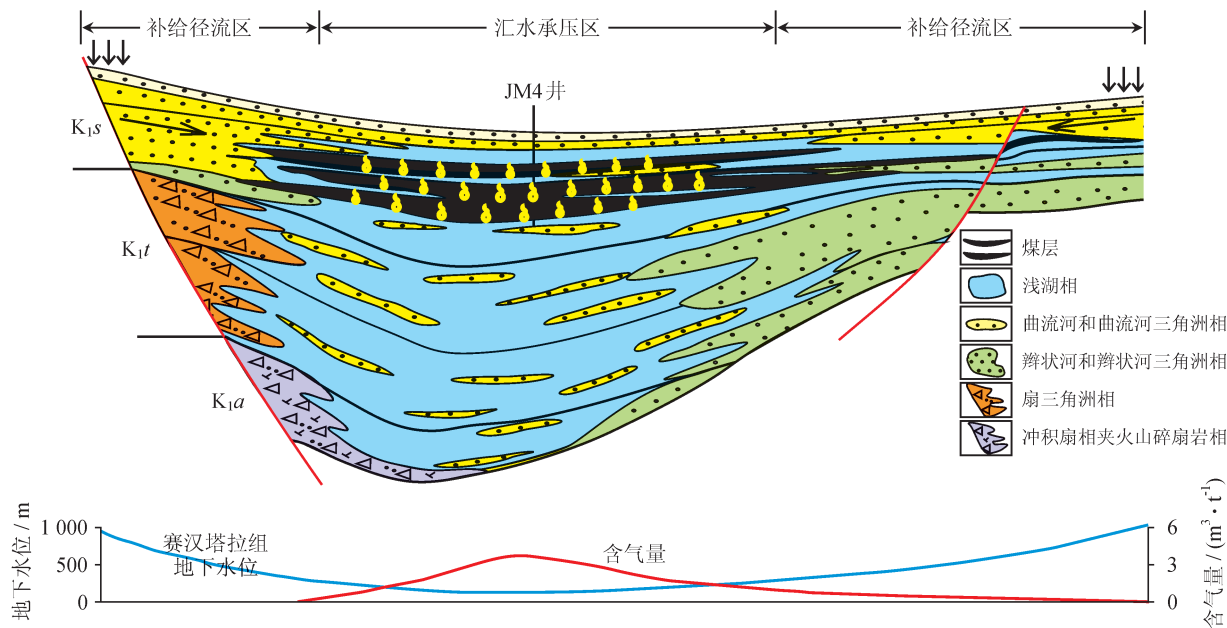


图6 断陷盆地富煤区生物气+承压水封堵煤层气富集成藏模式图 (底图据吴昕等^[15]修改)

层发育,弥补了含气量不足;厚煤层上覆泥岩盖层发育,封盖条件有利;凹陷中部一缓坡带位于地下水承压区,水动力侧向封堵利于煤层气富集;煤层气为生物成因气,现今仍有生物气生成。

2) 建立了断陷盆地富煤区生物气+承压水封堵煤层气富集模式,提出凹陷中部一缓坡带L12—S88井区为下一步煤层气建产的有利区。

参 考 文 献

[1] 李五忠,田文广,孙斌,王宪花,赵玉红.低煤阶煤层气成藏特点与勘探开发技术[J].天然气工业,2008,28(3):23-24.

Li Wuzhong, Tian Wenguang, Sun Bin, Wang Xianhua & Zhao Yuhong. Characteristics of pooling and exploration and development of CBM in low-rank coals[J]. Natural Gas Industry, 2008, 28(3): 23-24.

[2] 孙平,刘洪林,巢海燕,王一兵.低煤阶煤层气勘探思路[J].天然气工业,2008,28(3):19-22.

Sun Ping, Liu Honglin, Chao Haiyan & Wang Yibing. Exploration direction of coalbed methane in low-rank coals[J]. Natural Gas Industry, 2008, 28(3): 19-22.

[3] 王勃,李景明,张义,王红岩,刘洪林,李贵中,等.中国低煤阶煤层气地质特征[J].石油勘探与开发,2009,36(1):30-34.

Wang Bo, Li Jingming, Zhang Yi, Wang Hongyan, Liu Honglin, Li Guizhong, et al. Geological characteristics of low rank coalbed

- methane, China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2009, 36(1): 30-34.
- [4] 孙平, 王勃, 孙粉锦, 郑贵强, 李贵中, 王红岩, 等. 中国低煤阶煤层气成藏模式研究[J]. *石油学报*, 2009, 30(5): 648-653.
Sun Ping, Wang Bo, Sun Fenjin, Zheng Guiqiang, Li Guizhong, Wang Hongyan, et al. Research on reservoir patterns of low-rank coal-bed methane in China[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2009, 30(5): 648-653.
- [5] 孙斌, 邵龙义, 赵庆波, 李五忠, 陈刚. 二连盆地煤层气勘探目标评价[J]. *煤田地质与勘探*, 2008, 36(1): 22-26.
Sun Bin, Shao Longyi, Zhao Qingbo, Li Wuzhong & Chen Gang. Evaluation of coalbed gas exploration target in Erlian Basin[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2008, 36(1): 22-26.
- [6] 雷怀玉, 孙钦平, 孙斌, 李五忠, 陈刚, 田文广. 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 Qinqing, Sun Bin, Li Wuzhong, Chen Gang & Tian Wenguang. 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.
- [7] 韩兵, 张明, 刘旺博. 二连盆地群低煤阶煤层气成藏模式——以霍林河盆地为例[J]. *煤田地质与勘探*, 2012, 40(1): 24-28.
Han Bing, Zhang Ming & Liu Wangbo. Coalbed methane reservoir-forming pattern of low rank coal in Erlian Basin: With Huolinhe Basin as an example[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2012, 40(1): 24-28.
- [8] 孙粉锦, 李五忠, 孙钦平, 孙斌, 田文广, 陈彦君, 等. 二连盆地吉尔嘎朗图凹陷低煤阶煤层气勘探[J]. *石油学报*, 2017, 38(5): 485-492.
Sun Fenjin, Li Wuzhong, Sun Qinqing, Sun Bin, Tian Wenguang, Chen Yanjun, et al. Low-rank coalbed methane exploration in Jiergalangtu sag, Erlian Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2017, 38(5): 485-492.
- [9] 费宝生, 祝玉衡, 邹伟宏, 杜金虎. 二连裂谷盆地群油气地质[M]. 北京: 石油工业出版社, 2001.
Fei Baosheng, Zhu Yuheng, Zou Weihong & Du Jinhui. *Petroleum geology of Erlian Rift Basin Group*[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2001.
- [10] 魏巍, 朱筱敏, 朱世发, 何明薇, 吴健平, 王名巍, 等. 二连盆地额仁淖尔凹陷下白垩统云质岩致密油储层特征与成因[J]. *中国石油勘探*, 2017, 22(3): 71-80.
Wei Wei, Zhu Xiaomin, Zhu Shifa, He Mingwei, Wu Jianping, Wang Mingwei, et al. Characteristics and origin of the Lower Cretaceous dolomitic tight oil reservoir in Erenao sag, Erlian Basin[J]. *China Petroleum Exploration*, 2017, 22(3): 71-80.
- [11] 王帅, 邵龙义, 闫志明, 孙钦平, 王东东, 鲁静, 等. 二连盆地吉尔嘎朗图凹陷下白垩统赛汉塔拉组层序地层及聚煤特征[J]. *古地理学报*, 2015, 17(3): 393-403.
Wang Shuai, Shao Longyi, Yan Zhiming, Sun Qinqing, Wang Dongdong, Lu Jing, et al. Sequence stratigraphy and coal accumulation of the Lower Cretaceous Saihantala Formation in Jiergalangtu Sag of Erlian Basin[J]. *Journal of Palaeogeography*, 2015, 17(3): 393-403.
- [12] 李思田, 李宝芳, 杨士恭, 黄家福, 李祯. 中国东北部晚中生代断陷型煤盆地的沉积作用和构造演化[J]. *地球科学——中国地质大学学报*, 1982(3): 275-294.
Li Sitian, Li Baofang, Yang Shigong, Huang Jiafu & Li Zhen. Sedimentation and tectonic evolution of Mesozoic faulted coal basins in northeastern China[J]. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 1982(3): 275-294.
- [13] 王东东, 邵龙义, 张强, 丁峰, 李兆彬, 张文龙. 二连盆地群下白垩统含煤地层聚煤特征分析[J]. *中国矿业大学学报*, 2013, 42(2): 257-265.
Wang Dongdong, Shao Longyi, Zhang Qiang, Ding Feng, Li Zhaobin & Zhang Wenlong. Analysis of coal-accumulating characteristics in the Lower Cretaceous coal-containing strata of the Erlian Basin Group[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2013, 42(2): 257-265.
- [14] 王帅, 邵龙义, 孙钦平, 侯海海, 高双, 鲁静, 等. 二连盆地吉尔嘎朗图凹陷煤层气储层特征及勘探潜力[J]. *煤田地质与勘探*, 2017, 45(4): 63-69.
Wang Shuai, Shao Longyi, Sun Qinqing, Hou Haihai, Gao Shuang, Lu Jing, et al. Characteristics of CBM reservoirs and exploration potential in Jiergalangtu sag of Erlian Basin[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2017, 45(4): 63-69.
- [15] 吴昕, 吴冲龙, 毛小平, 张继吟. 吉尔嘎朗图凹陷赛汉塔拉组沉积特征与超厚煤层异地成因分析[J]. *沉积学报*, 2016, 34(6): 1155-1164.
Wu Xin, Wu Chonglong, Mao Xiaoping & Zhang Jiyin. Analysis on sedimentary characteristics and allochthonous genesis of extra-thick seam in Jiergalangtu Depression, Saihantala Formation[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2016, 34(6): 1155-1164.
- [16] 欧阳永林, 孙斌, 王勃, 田文广, 赵洋, 曹海霄. 煤层气封闭体系及其与煤层气富集的关系[J]. *天然气工业*, 2016, 36(10): 19-27.
Ouyang Yonglin, Sun Bin, Wang Bo, Tian Wenguang, Zhao Yang & Cao Haixiao. CBM sealing system and its relationship with CBM enrichment[J]. *Natural Gas Industry*, 2016, 36(10): 19-27.
- [17] 赵贤正, 周立宏, 蒲秀刚, 肖敦清, 姜文亚, 韩文中, 等. 断陷湖盆斜坡区油气富集理论与勘探实践——以黄骅坳陷古近系为例[J]. *中国石油勘探*, 2017, 22(2): 13-23.
Zhao Xianzheng, Zhou Lihong, Pu Xiugang, Xiao Dunqing, Jiang Wenya, Han Wenzhong, et al. Hydrocarbon enrichment theory and exploration practice in the slope of fault lake basin: A case study of Paleogene in Huanghua Depression[J]. *China Petroleum Exploration*, 2017, 22(2): 13-23.
- [18] 刘洪林, 李景明, 王红岩, 赵庆波. 水文地质条件对低煤阶煤层气成藏的控制作用[J]. *天然气工业*, 2008, 28(7): 20-22.
Liu Honglin, Li Jingming, Wang Hongyan & Zhao Qingbo. Control of hydrogeological conditions on accumulation of coalbed methane in low-rank coal[J]. *Natural Gas Industry*, 2008, 28(7): 20-22.
- [19] 苏现波, 徐影, 吴昱, 夏大平, 陈鑫. 盐度、pH 对低煤阶煤层生物甲烷生成的影响[J]. *煤炭学报*, 2011, 36(8): 1302-1306.
Su Xianbo, Xu Ying, Wu Yu, Xia Daping & Chen Xin. Effect

- of salinity and pH on biogenic methane production of low-rank coal[J]. *Journal of China Coal Society*, 2011, 36(8): 1302-1306.
- [20] 李刚, 杨立中, 欧阳锋. 厌氧消化过程控制因素及 pH 和 Eh 的影响分析 [J]. *西南交通大学学报*, 2001, 36(5): 518-521.
Li Gang, Yang Lizhong & Ouyang Feng. Control factors of anaerobic digestion and effect of pH and Eh[J]. *Journal of Southwest Jiaotong University*, 2001, 36(5): 518-521.
- [21] 戴金星, 戚厚发, 宋岩. 鉴别煤成气和油型气若干指标的初步探讨 [J]. *石油学报*, 1985, 6(2): 31-38.
Dai Jinxing, Qi Houfa & Song Yan. On the indicators for identifying gas from oil and gas from coal measure[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 1985, 6(2): 31-38.
- [22] 戴金星, 戚厚发, 宋岩, 关德师. 我国煤层气组份、碳同位素类型及其成因和意义 [J]. *中国科学 B 辑*, 1986(12): 1317-1326.
Dai Jinxing, Qi Houfa, Song Yan & Guan Deshi. Composition, carbon isotope characteristics and the origin of coal-bed gases in China and their implications[J]. *Scientia Sinica (Chimica)*, 1986(12): 1317-1326.
- [23] 高小康, 宋岩, 柳少波, 洪峰, 姜林, 郑永平. 关于煤层气甲烷碳同位素值对比的探讨 [J]. *天然气工业*, 2010, 30(6): 11-14.
Gao Xiaokang, Song Yan, Liu Shaobo, Hong Feng, Jiang Lin & Zheng Yongping. A discussion on the comparison of carbon isotope values of coalbed methane[J]. *Natural Gas Industry*, 2010, 30(6): 11-14.
- [24] 据宜文, 李清光, 颜志丰, 孙盈, 鲍园. 煤层气成因类型及其地球化学研究进展 [J]. *煤炭学报*, 2014, 39(5): 806-815.
Ju Yiwen, Li Qingguang, Yan Zhifeng, Sun Ying & Bao Yuan. Origin types of CBM and their geochemical research progress[J]. *Journal of China Coal Society*, 2014, 39(5): 806-815.
- [25] 陶明信. 中国煤层气同位素地球化学初步研究 [J]. *地质学报*, 2015, 89(增刊 1): 185-186.
Tao Mingxin. Preliminary study on isotope geochemistry of coalbed methane in China[J]. *Acta Geological Sinica*, 2015, 89(S1): 185-186.
- [26] 陶明信, 王万春, 李中平, 马玉贞, 李晶, 李晓斌. 煤层中次生物气的形成途径与母质综合研究 [J]. *科学通报*, 2014, 59(11): 970-978.
Tao Mingxin, Wang Wanchun, Li Zhongping, Ma Yuzhen, Li Jing & Li Xiaobin. Comprehensive study on genetic pathways and parent materials of secondary biogenic gas in coalbeds[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2014, 59(11): 970-978.
- [27] Kotarba MJ. Composition and origin of coalbed gases in the Upper Silesian and Lublin basins, Poland[J]. *Organic Geochemistry*, 2001, 32(1): 163-180.
- [28] Whiticar MJ. Carbon and hydrogen isotope systematics of bacterial formation and oxidation of methane[J]. *Chemical Geology*, 1999, 161(1/3): 291-314.
- [29] 刘洪林, 李贵中, 王红岩, 杨泳, 王勃, 刘萍. 西北低煤阶盆地生物成因煤层气成藏模拟研究 [J]. *石油实验地质*, 2006, 28(6): 600-603.
Liu Honglin, Li Guizhong, Wang Hongyan, Yang Yong, Wang Bo & Liu Ping. Study on simulation of biogenic coalbed methane in the low coal rank basins in northwestern China[J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2006, 28(6): 600-603.
- [30] 王爱宽. 褐煤本源菌生气特征及其作用机理 [D]. 徐州: 中国矿业大学, 2010: 43-44.
Wang Aikuan. Generation and mechanism of gas from brown coal under action of parent bacterium[D]. Xuzhou: China University of Mining & Technology, 2010: 43-44.
- [31] 王爱宽, 秦勇, 林玉成, 兰凤娟, 杨松. 褐煤中天然产甲烷菌富集培养与生物气产出模拟 [J]. *高校地质学报*, 2010, 16(1): 81-85.
Wang Aikuan, Qin Yong, Lin Yucheng, Lan Fengjuan & Yang Song. Enrichment and cultivation of natural methanogen and simulation of biogenetic gas generation from brown coal samples[J]. *Geological Journal of China Universities*, 2010, 16(1): 81-85.
- [32] 汪涵, 林海, 董颖博, 隋梦琪, 李洋子. 外源产甲烷菌降解褐煤产气实验 [J]. *石油勘探与开发*, 2012, 39(6): 764-768.
Wang Han, Lin Hai, Dong Yingbo, Sui Mengqi & Li Yangzi. Experiments on the gas production of brown coal degraded by exogenous methanogens[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2012, 39(6): 764-768.
- [33] 郭红玉, 符超勇, 拜阳, 马俊强, 苏现波. 生物产气对煤层气可采性指标的影响 [J]. *天然气工业*, 2017, 37(2): 46-51.
Guo Hongyu, Fu Chaoyong, Bai Yang, Ma Junqiang & Su Xianbo. Influence of biogenic gas production on coalbed methane recoverability parameters[J]. *Natural Gas Industry*, 2017, 37(2): 46-51.
- [34] 宋金星, 郭红玉, 陈山来, 夏大平, 王三帅, 苏现波. 煤中显微组分对生物甲烷代谢的控制效应 [J]. *天然气工业*, 2016, 36(5): 25-30.
Song Jinxing, Guo Hongyu, Chen Shanlai, Xia Daping, Wang Sanshuai & Su Xianbo. Control effects of coal maceral composition on the metabolism of biogenic methane[J]. *Natural Gas Industry*, 2016, 36(5): 25-30.

(收稿日期 2018-02-13 编辑 陈古明)