

## “煤层气勘探开发技术研究进展”专题

**【编者按】**我国煤层气产业发展已进入规模化生产阶段,初步形成了适宜于沁水盆地高阶煤煤层气、鄂尔多斯盆地中阶煤煤层气的勘探开发技术体系,有力支撑了我国煤层气的勘探开发。新疆准噶尔盆地和伊兰盆地低阶煤煤层气、滇东—黔西地区多煤层煤层气、煤系地层致密砂岩气和深层煤层气也取得了很好的开发效果。2018年,地面煤层气开发产量达 54.12 亿  $m^3$ 、利用量达 49.00 亿  $m^3$ ;截至 2018 年底,累计钻井 17 000 多口,建成沁水盆地和鄂尔多斯盆地东缘两大煤层气产业基地,煤层气井产量占全国的 95%。目前国内煤层气产业总体进展缓慢,低阶煤煤层气高效开发、已开发区增产提效和深部煤层气及煤系气综合开发等技术瓶颈还未突破,地面煤层气井普遍产量低、不稳定,现有技术难以支撑产业快速发展的问題亟待解决。作为全国煤炭行业的一个重要科技窗口和学术交流平台,《煤炭科学技术》一直非常关注并积极跟踪报道国内外煤层气勘探开发成果,自 2015 年与中国煤炭学会煤层气专业委员会首次合作以来,已经连续 4 年协办“全国煤层气学术研讨会”,并合作开展“煤层气勘探开发技术研究进展”专题论文的征集与出版工作,得到了广大专家和学者的积极响应。本次共征集到论文 100 余篇,审稿录用 30 余篇,限于篇幅,此次专题刊登 16 篇。专题内容涵盖低阶煤煤层气勘探开发理论与技术、煤层气储层评价理论与方法、深部煤层气勘探开发技术、煤层气高效开发与煤矿瓦斯抽采技术和煤系非常规天然气共探共采技术等方面的研究成果,以促进我国煤层气勘探开发新进展、新技术、新认识的推广交流。衷心感谢各位专家学者为专题撰稿!



移动扫码阅读

王涛,邓泽,胡海燕,等.国内外低阶煤煤层气储层特征对比研究[J].煤炭科学技术,2019,47(9):41-50. doi:10.13199/j.cnki.est.2019.09.002

WANG Tao, DENG Ze, HU Haiyan, *et al.* Study on characteristics comparison of low rank coal coalbed methane reservoirs at home and abroad [J]. Coal Science and Technology, 2019, 47(9): 41-50. doi: 10.13199/j.cnki.est.2019.09.002

## 国内外低阶煤煤层气储层特征对比研究

王涛<sup>1,2,3</sup>, 邓泽<sup>2,3</sup>, 胡海燕<sup>1</sup>, 曹明亮<sup>2,3</sup>, 张宝鑫<sup>2,3</sup>, 焦鹏飞<sup>2,3</sup>, 余喆<sup>2,3</sup>

(1.长江大学地球科学学院,湖北武汉 430100;2.中国石油勘探开发研究院,河北廊坊 065077;

3.中国石油天然气集团有限公司非常规油气重点实验室,河北廊坊 065077)

**摘要:**中国低阶煤煤层气资源丰富,但勘探和认识程度较低,煤层气成藏条件、煤储层特征和资源潜力等方面研究不足。首先分析了中国低阶煤分布特点和煤层气成因,基于二连盆地、海拉尔盆地、准东地区、吐哈盆地与美国粉河盆地和澳大利亚苏拉特盆地的煤层气地质资料,探讨了国内外盆地地质构造演化,对比分析了国内外盆地煤阶和煤岩组成、含气量、孔隙度、渗透率和水文地质条件等特征,指出了国内外低阶煤盆地在煤层气含量构成、储层物性条件及水文地质条件等方面的差异,并全方面地阐明了国内外低阶煤盆地含气量差异性的原因。研究结果表明:国内外低阶煤盆地地质构造特征和煤岩特征相似,且煤层气主要是次生生物成因气,国内外低阶煤盆地煤层含气量随埋深总体呈现为先增加后降低的趋势;国内低阶煤盆地与粉河盆地含气量介于 0~4  $m^3/t$ ,但是含气量梯度差异大,埋深相同的条件下,国内低阶煤盆地煤岩含气量低于粉河盆地和苏拉特盆地的含气量。水文地质条件是影响低阶煤煤层气含气量差异的最为重要的因素之一,国内低阶煤盆地水文地质条件差,导致煤层含气量低,粉河盆地和苏拉特盆地水文地质条件好,则含气量高。国内外低阶煤盆地渗透率差异大;国内低阶煤盆地渗透性差,一般小于  $1.0 \times 10^{-3} \mu m^2$ ,粉河盆地和苏拉特盆地渗透性好,要比国内低阶煤盆地高 1~2 个数量级,导致了国内低阶煤盆地与美国粉河盆地和澳大利亚苏拉特盆地在低阶煤煤

收稿日期:2019-05-26;责任编辑:王晓珍

基金项目:国家科技重大专项资助项目(2016ZX05041-001);中国石油天然气股份有限公司重大科技专项资助项目(2017E-1401)

作者简介:王涛(1994—),男,湖南娄底人,硕士研究生。E-mail:792502889@qq.com

储层特征方面的巨大差异。

**关键词:**煤层气;低阶煤;储层特征;二连盆地;粉河盆地

**中图分类号:**P618

**文献标志码:**A

**文章编号:**0253-2336(2019)09-0041-10

## Study on characteristics comparison of low rank coal coalbed methane reservoirs at home and abroad

WANG Tao<sup>1,2,3</sup>, DENG Ze<sup>2,3</sup>, HU Haiyan<sup>1</sup>, CAO Mingliang<sup>2,3</sup>, ZHANG Baoxin<sup>2,3</sup>, JIAO Pengfei<sup>2,3</sup>, YU Zhe<sup>2,3</sup>

(1.School of Geosciences, Yangtze University, Wuhan 430100, China; 2.PetroChina Research Institute of Petroleum Exploration and Development, Langfang 065007, China; 3.CNPC Key Laboratory of Unconventional Oil & Gas, Langfang 065007, China)

**Abstract:** China's low rank coalbed methane resources are abundant, but the degree of exploration and understanding is low, and the research on coalbed methane accumulation conditions, coal reservoir characteristics and resource potential is insufficient. Based on CBM geological data from the Erlian Basin, Hailar Basin, Zhundong Area, Tuha Basin, Powder River Basin in the United States and the Surat Basin in Australia, this paper first analyzed the distribution characteristics of low rank coal and the origin of CBM in China. It then discussed the characteristics of the geological structure of evolution and analyzed the characteristics of coal rank, composition of coal, gas content, porosity, permeability and hydro-geological conditions. The differences of CBM content, reservoir property and hydro-geological conditions in the low coal rank basins were pointed out, and the reasons for the differences in the gas content between domestic and foreign basins were expounded. The results show that the geological and structural characteristics of the low coal rank basins in China are similar to those in foreign countries, and CBM is mainly secondary biogenic gas. The gas content both at home and abroad increases first and then decreases as the burial depth increases. The gas content of the low coal rank basins in China and the Powder River Basin is between 0~4 m<sup>3</sup>/t, but the gas content of in the low coal rank basins is lower than that in the Powder River Basin and the Surat basin in Australia under the same buried depth. The hydro-geological condition of low coal rank CBM gas content difference is one of the most important factors, and the poor hydro-geological conditions in China causes the low coal bed gas content. But the hydro-geological conditions of the Powder River Basin and the Surat Basin are good, so the gas content is high. The permeability of basins varies greatly from country to country. The permeability of domestic basins is poor, generally less than 1.0×10<sup>-3</sup> μm<sup>2</sup>. The permeability of the Powder River Basin and the Surat Basin is good, and the permeability is 1~2 orders of magnitude higher than that of domestic low coal rank basins. Therefore, there is a great difference in low rank coalbed methane resources between the domestic basin and the Powder River Basin in the United States and the Surat basin in Australia.

**Key words:** coalbed methane; low rank coal; reservoir characteristics; Erlian Basin; Powder River Basin

## 0 引言

低阶煤一般是指镜质体反射率( $R_o$ )小于0.65%的褐煤和长焰煤<sup>[1-2]</sup>。美国是全球煤层气开发最早也是最成功的国家,产地主要来自粉河、圣胡安和黑勇士3个盆地。20世纪70年代中期,美国开始煤层气理论认识研究和开发技术攻关。1989年美国煤层气产量26×10<sup>8</sup> m<sup>3</sup>,2008年达到产量高峰,年产煤层气556×10<sup>8</sup> m<sup>3</sup>,2015年产量回落至359×10<sup>8</sup> m<sup>3</sup>。美国粉河盆地等煤层气开发的成功实现了煤层气商业性开发,带动了世界范围内低阶煤煤层气的研究和发展<sup>[3]</sup>。第4轮全国煤层气资源评价结果表明:全国埋深在2000 m以浅煤层气地质资源量为29.82×10<sup>12</sup> m<sup>3</sup>,可采资源量为12.51×10<sup>12</sup> m<sup>3</sup>,其中低阶煤煤层气地质资源量为10.3×10<sup>12</sup> m<sup>3</sup>,占34.5%,可采资源量达4.96×10<sup>12</sup> m<sup>3</sup>,占39.6%<sup>[4]</sup>。我国以低阶煤为主的沉积盆地分布广泛,主要分布在西部地区的早中侏罗世含煤盆地,如准噶尔盆地、吐哈盆地等;部分分布于东

北地区的早白垩世含煤盆地,如海拉尔盆地、二连盆地等;少部分则是古近纪的含煤盆地,如阜新盆地、滇东盆地群等<sup>[5]</sup>。二连盆地群是我国重要的低阶煤煤层气盆地,随着吉尔嘎朗图凹陷吉煤4井的突破,证实了中国含气量低、煤层厚的低阶煤煤层气可以获得高产工业气流,将推动二连盆地断陷湖盆群的低阶煤煤层气加快勘探开发进程,加快中国煤层气产业化发展步伐<sup>[6]</sup>。

前人对低阶煤煤层气的储层特征开展了一些研究:傅雪海等<sup>[7]</sup>探讨了吐哈盆地与粉河盆地地质构造演化特征,对比分析了两盆地煤阶、煤岩、煤质、含气量及饱和度等物性条件,指出了吐哈盆地与粉河盆地在煤层气含量构成、渗透率及水文地质条件等方面的差异;陈振宏等<sup>[8]</sup>利用扫描电镜、煤层气成藏物理模拟及热变模拟试验手段,研究了低阶煤储层在孔隙特征、渗透性、吸附/解吸等方面特征;王勃等<sup>[9]</sup>研究认为低阶煤煤层气藏开发过程中解吸引起的基质收缩效应会使储集层渗透率增大,有利

于低阶煤煤层气的开发;许浩等<sup>[10]</sup>研究了鄂尔多斯盆地西部的煤层气储层物性特征,结果表明该区侏罗系煤储层具有较强的生气潜力和储气能力,孔隙系统以微孔-小孔和大孔为主,具双峰分布特点;王帅等<sup>[11]</sup>分析二连盆地吉尔嘎朗图凹陷煤层的煤厚分布、煤岩煤质、孔隙、等温吸附等特征,并从生气条件和保存条件方面分析其勘探潜力,确定吉尔嘎朗图凹陷东南部为下一步煤层气勘探目标区。

中国低阶煤煤层气勘探开发工作程度比较低,前人的研究工作主要集中在煤层气成藏条件和资源潜力等方面,关于低煤阶煤储层特征评价参数详细对比的研究比较少,一直没有弄清楚国内低阶煤煤层气产量低的原因,导致国家规划的煤层气产量目标未实现。笔者以国内的二连盆地、海拉尔盆地、准噶尔东部地区、吐哈盆地与美国粉河盆地和澳大利亚苏拉特盆地为例,探讨了国内外盆地的地质构造演化特征,对比分析了国内外低阶煤盆地煤阶和煤岩组成、含气量、水文地质条件及孔渗条件等评价参数之间的差异,全面分析了国内外低阶煤盆地与粉河盆地和苏拉特盆地煤储层特征评价参数差异的原因,探讨国内外低阶煤盆地含气量低的原因,并对低阶煤煤层气下一步勘探方向进行探究,这对于我国未来低阶煤煤层气勘探具有重要的理论和实践意义。

## 1 地质特征对比

位于中国东北部的二连盆地群是发育在天山—兴蒙褶皱带海西柔性地槽褶皱基底上的中—新生代裂谷型含煤盆地群,总体呈“五坳一隆”构造格局,由众多的凸起和凹陷组成,其中含煤凹陷众多,由于凹陷发育时间有差别,类型多样。该盆地发育了中、下侏罗统阿拉坦合力群和下白垩统巴彦花群赛汉塔拉组2套含煤层段,其中巴彦花群赛汉塔拉组是该盆地主要的含煤地层。赛汉塔拉组处于二连盆地吉尔嘎朗图凹陷演化的最后阶段,即凹陷整体上升的回返,并进入坳陷型沉积阶段,构造活动明显变弱,河流相发育,局部残留湖沼相,在区域尺度上有利于煤层气富集<sup>[12]</sup>。海拉尔盆地是在中亚—蒙古地槽上发育起来的由中、小规模断陷群组成的中生代伸展—挤压型复合盆地。总体呈“三坳两隆”的构造格局,可细划分出16个凹陷和4个凸起,盆地的总体构造格局为坳隆相间<sup>[13]</sup>。该盆地的成煤期为下白垩世,主要含煤地层为伊敏组、大磨拐河组二段以及南屯组二段。

位于中国西北部的吐哈盆地是在海西期褶皱基底上发育起来的以中生代沉积为主的山间沉积盆

地。该盆地煤层赋存于下侏罗统西山窑组和中侏罗统八道湾组,煤层深埋成岩演化阶段为拉张构造应力环境,使生成的生物气大多逸散,由于板块碰撞活动,吐哈盆地一直处于挤压构造应力环境,盆地构造条件复杂。此外,抬升对煤层的水文地质条件和煤储层的渗透率也有重要影响<sup>[14]</sup>。准东地区构造相对简单,地层较为平缓,煤层构造变形较弱<sup>[10]</sup>。主要含煤地层为下侏罗统西山窑组和中侏罗统八道湾组,含煤层数多、厚度大,煤层间距小,煤层广泛发育,但区域上变化较大,大部分区域埋深浅于800 m,且煤层产状较平缓。

美国粉河盆地是从北部的新墨西哥州到中部的蒙大拿州展布在洛基山前的其中一个含煤盆地,该盆地东部为Black Hill隆起,西部为Big Horn隆起,南部为Laramide山脉,呈非对称结构,占地面积超过57 000 km<sup>2</sup>,且近1/2的面积赋存可采煤层。粉河盆地主要煤储层为下第三系古新世的Fort Union组和始新世的Wasatch组,后期遭受较弱的挤压作用,发育倾角较缓的褶皱和少量正断层,基本上是一个原型煤盆地。目前该盆地煤层气主要采自Fort Union地层的古新统唐河段和Lebo Shale段煤层,以及始新统Wasatch地层。由于该盆地煤储层还处于成岩作用阶段,其孔隙结构和煤岩割理十分发育,为游离气创造了储存空间,同时也为现今高渗透率奠定了基础;水文地质条件未遭破坏,为生物气的不断生成提供了有利的条件。苏拉特盆地是位于澳大利亚中东部地区1个侏罗纪—白垩纪的内克拉通盆地,北起昆士兰州中部,向南一直延伸到新南威尔士州北部。苏拉特盆地沉积在博文盆地南部地层之上,最大沉积厚度约2 500 m,面积大约30×10<sup>4</sup> km<sup>2</sup>。盆地构造演化开始于晚古生代,并持续到新生代,期间经历了2次大的构造沉降和2次构造抬升,从而形成了现今的构造格局。其构造单元可以分为中央坳陷带,东部斜坡带与西部斜坡带。煤层主要分布在上侏罗统Walloon群顶部的Juandah组与底部的Taroom组中<sup>[15]</sup>。

## 2 煤层气成因

煤层气成因的传统概念包括热成因、运移热成因、生物成因、混合成因等。国内外学者一般把低阶煤煤层气的成因归结为以生物成因为主,或者存在晚期生物气的补充<sup>[16-17]</sup>。

笔者统计了国内外典型的低阶煤煤层气甲烷氢同位素( $\delta D_{CH_4}$ )与甲烷碳同位素( $\delta^{13}C_{CH_4}$ )数据,参考前人的研究<sup>[18-20]</sup>,生物气甲烷氢同位素( $\delta D_{CH_4}$ )一般介于-400‰~-170‰,生物气甲烷碳同位素

( $\delta^{13}\text{C}_{\text{CH}_4}$ )一般轻于 $-55\text{‰}$ ,对国内外低阶煤盆地的煤层气的成因进行判别。

## 2.1 基于 $\varphi(\text{CH}_4)/\varphi(\text{C}_2\text{H}_6+\text{C}_3\text{H}_8)$ 与 $\delta^{13}\text{C}_{\text{CH}_4}$ 关系的成因分析

从Kotarba模板(图1)中可以看出<sup>[21]</sup>,低阶煤层气气源类型主要是生物气,部分盆地(区块)有混合成因和热成因气的补给。生物成因气甲烷碳同位素( $\delta^{13}\text{C}_{\text{CH}_4}$ )一般轻于 $-55\text{‰}$ ,另外,生物成因煤层气一般以甲烷为主。

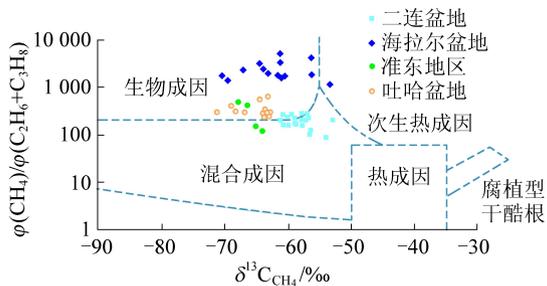


图1 基于 $\varphi(\text{CH}_4)/\varphi(\text{C}_2\text{H}_6+\text{C}_3\text{H}_8)$ 与 $\delta^{13}\text{C}_{\text{CH}_4}$ 关系的煤层气成因判别

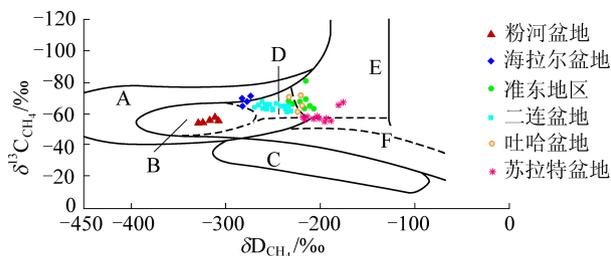
Fig.1 Plots of  $\varphi(\text{CH}_4)/\varphi(\text{C}_2\text{H}_6+\text{C}_3\text{H}_8)$  and  $\delta^{13}\text{C}_{\text{CH}_4}$  of coalbed methane

二连盆地已钻煤层气井实测煤层气甲烷碳同位素值介于 $-69.4\text{‰} \sim -61.1\text{‰}$ ;海拉尔盆地已钻煤层气井实测煤层气甲烷碳同位素值介于 $-70.3\text{‰} \sim -53.2\text{‰}$ ;吐哈盆地已钻煤层气井实测煤层气甲烷碳同位素值介于 $-71.1\text{‰} \sim -63.0\text{‰}$ ;准东地区已钻煤层气井实测煤层气甲烷碳同位素值介于 $-67.9\text{‰} \sim -64.1\text{‰}$ 。将以上测试结果投到Kotarba建立的天然气成因判别图版,结果显示,二连盆地和准东地区表现为以生物气为主的成因特征,同时伴随着混合成因;吐哈盆地煤层气为生物成因气;海拉尔盆地表现为以生物气为主的成因特征,同时伴随着次生热成因。

## 2.2 基于 $\delta^{13}\text{C}_{\text{CH}_4}-\delta\text{D}_{\text{CH}_4}$ 关系的成因分析

从Whiticar模板(图2)中可以看出<sup>[22]</sup>,生物气甲烷氢同位素( $\delta\text{D}_{\text{CH}_4}$ )一般介于 $-400\text{‰} \sim -170\text{‰}$ 。一般认为,生物甲烷产生主要有2种途径,即二氧化碳还原和乙酸发酵,并可通过 $\delta^{13}\text{C}_{\text{CH}_4}$ 和 $\delta\text{D}_{\text{CH}_4}$ 之间关系加以鉴别。

二连盆地已钻煤层气井实测煤层气甲烷碳同位素值介于 $-69.4\text{‰} \sim -61.1\text{‰}$ ,氢同位素值介于 $-272.7\text{‰} \sim -230.6\text{‰}$ ,海拉尔盆地已钻煤层气井实测煤层气甲烷碳同位素值介于 $-70.9\text{‰} \sim -65.6\text{‰}$ ,氢同位素值介于 $-284.9\text{‰} \sim -272.7\text{‰}$ ,基于 $\delta^{13}\text{C}_{\text{CH}_4}-\delta\text{D}_{\text{CH}_4}$ 关系的成因分析显示,二连盆地和海拉尔盆地生物气类型处于乙酸发酵-还原型过渡带;吐哈盆地已



A—生物气; B—乙酸发酵作用; C—无机成因气  
D—过渡带; E—二氧化碳还原作用; F—热成因天然气

图2 基于 $\delta^{13}\text{C}_{\text{CH}_4}-\delta\text{D}_{\text{CH}_4}$ 关系的煤层气成因判别

Fig.2 Plots of  $\delta^{13}\text{C}_{\text{CH}_4}$  and  $\delta\text{D}_{\text{CH}_4}$  of coalbed methane

钻煤层气井实测煤层气甲烷碳同位素值介于 $-71.7\text{‰} \sim -63.4\text{‰}$ ,氢同位素值介于 $-233.0\text{‰} \sim -219.0\text{‰}$ ,准东地区已钻煤层气井实测煤层气甲烷碳同位素值介于 $-81.0\text{‰} \sim -56.4\text{‰}$ ,氢同位素值介于 $-245.0\text{‰} \sim -208.0\text{‰}$ ,基于 $\delta^{13}\text{C}_{\text{CH}_4}-\delta\text{D}_{\text{CH}_4}$ 关系的成因分析显示,吐哈盆地和准东地区生物气类型处于乙酸发酵-还原型过渡带和二氧化碳还原型。美国粉河盆地煤层气甲烷碳同位素值介于 $-56.8\text{‰} \sim -54.3\text{‰}$ ,氢同位素值介于 $-331.3\text{‰} \sim -306.1\text{‰}$ ,基于 $\delta^{13}\text{C}_{\text{CH}_4}-\delta\text{D}_{\text{CH}_4}$ 关系的成因分析显示,粉河盆地生物气类型处于乙酸发酵还原型。澳大利亚苏拉特盆地煤层气甲烷碳同位素值介于 $-66.5\text{‰} \sim -55.5\text{‰}$ ,氢同位素值介于 $-219.8\text{‰} \sim -178.3\text{‰}$ ,基于 $\delta^{13}\text{C}_{\text{CH}_4}-\delta\text{D}_{\text{CH}_4}$ 关系的成因分析显示,苏拉特盆地生物气类型主要以二氧化碳还原型为主。

## 3 煤储层特性对比

### 3.1 煤阶和煤岩组成的差异

显微煤组分含量是影响煤层含气量的一个重要因素。煤岩不同类型的显微组分生气潜力具有差异,前人根据热模拟试验研究发现,壳质组产气能力最强,镜质组产气能力次之,惰质组最差;在吸附能力上,不同显微组分之间也存在明显差异,镜质组吸附能力最强,惰质组次之,壳质组最低<sup>[23-24]</sup>。由于壳质组生气能力最强,含有高量的壳质组,在一定程度上对低阶煤煤层气的富集较为有利。如国内大部分低阶煤盆地壳质组平均含量10%左右,美国粉河盆地壳质组平均含量低于10%,澳大利亚的苏拉特盆地壳质组平均含量25.64%,因此国内大部分低阶煤盆地和粉河盆地显示出含气量低的特征,而苏拉特盆地显示出更高的含气量特征。在低煤阶煤岩中,镜质组通常占绝大部分(表1),因此镜质组含量的多少对煤层气的生成以及富集具有重要作用。从图3可以看出,低煤阶煤层含气量具有随镜质组含

量增大而增大的趋势,因此,镜质组是低阶煤煤层气的生成与富集的积极贡献因素。

煤储层的化学工艺特征是煤储层的重要煤化学性质,间接影响着煤岩的生气潜力和吸附能力。前人研究表明<sup>[25]</sup>,灰分为煤岩中的矿物质成分,矿物质表面没有吸附天然气的的能力,其占据了可以吸附气体的有机质空间,降低了煤储层的储集能力。灰分与煤储层的含气性呈现一定的负相关性(图4),而水分的增多会减弱煤储层的吸附能力。通过与粉河盆地相比,国内盆地群灰分偏高,为高灰煤(表1)。可能原因是国内低阶煤盆地分布面积

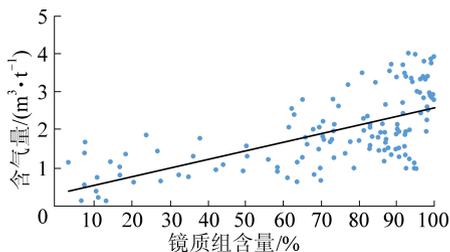


图3 低阶煤煤层气含气量与镜质组含量关系

Fig.3 Relationship between gas content of low rank CBM and vitrinite group

小,煤岩沉积近物缘,导致煤岩灰分较高。

煤层吸附性决定了煤层气的赋存状态和储集能力<sup>[14]</sup>。国内低阶煤盆地煤岩吸附性与国外低阶煤盆地煤岩吸附性存在差异。如海拉尔盆地和准东地区煤岩吸附能力总体上较低,二连盆地和粉河盆地煤岩吸附能力比较接近。海拉尔盆地和准东地区煤岩的朗格缪尔体积最高不超过  $10 \text{ m}^3/\text{t}$ ;二连盆地和粉河盆地煤岩的朗格缪尔体积一般大于  $7 \text{ m}^3/\text{t}$ ,最高超过  $15 \text{ m}^3/\text{t}$ 。通过对比分析可以发现,海拉尔盆地和准东地区煤岩吸附能力弱,而二连盆地和粉河盆地煤岩吸附能力相对较高。

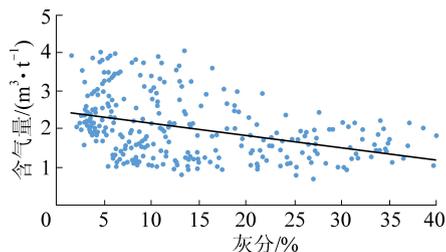


图4 低阶煤煤层气含气量与灰分的关系

Fig.4 Relationship between gas content and ash content of low rank CBM

表1 国内外典型低阶煤盆地煤岩特征对比

Table 1 Comparison of coal and rock characteristics in typical low rank coal basins at home and abroad

盆地/地区	准东地区	海拉尔盆地	二连盆地	吐哈盆地	粉河盆地	苏拉特盆地	
镜质体反射率/%	0.52~0.64(0.58)	0.31~0.47(0.37)	0.25~0.54(0.39)	0.31~0.45(0.36)	0.31~0.61	0.30~0.60	
煤岩组分含量/%	镜质组	11.1~57.1(29.1)	7.5~86.7(49.6)	49~99.7(86.5)	3.5~97.8(54.2)	(73.4) <sup>[6]</sup>	(72.2) <sup>[26]</sup>
	惰性组	42.0~87.7(61.8)	9.7~83.5(29.1)	0.1~37.6(4.9)	0.3~94.8(31.3)	(22.2) <sup>[6]</sup>	(2.4) <sup>[26]</sup>
	壳质组	1.5~22.6(9.1)	4.5~46.1(22.9)	0.1~33.7(10.4)	0.9~34.9(11.5)	(4.36) <sup>[6]</sup>	(25.5) <sup>[26]</sup>
工业分析/%	$M_{ad}$	6.8~28.3(23.4)	9.7~23.9(16.7)	3.9~32.5(16.2)	4.5~34.(25.1)	15.7~33.9(26.4)	—
	$A_{ad}$	1.6~16.1(5.3)	3.13~27.6(8.6)	1.6~49.8(18.1)	0.6~35.9(7.3)	1.5~38.6(4.7)	—
	$V_{ad}$	10.5~30.5(21.5)	22.8~45.8(33.0)	9.9~50.0(30.9)	8.4~45.8(28.0)	26.0~33.0(30.7)	—
	$FC_{ad}$	6.4~57.7(49.8)	32.4~57.3(45.2)	2.2~54.3(34.9)	1.2~52.2(39.7)	30.1~51.2(38.2)	—

注:“( )”之外为变化区间,“( )”之内为平均值。

### 3.2 煤层气含气量的差异

美国粉河盆地和澳大利亚苏拉特盆地低阶煤煤层气开发取得成效,粉河盆地测得的含气量高值主要分布在  $1\sim3 \text{ m}^3/\text{t}$ (图5e),苏拉特盆地测得的含气量高值主要分布在在  $2\sim8 \text{ m}^3/\text{t}$ (图5f)。国内低阶煤煤层气勘探表明,在一些盆地,测得了含气量大于  $2 \text{ m}^3/\text{t}$ 的含气量数据(图5c和图5d),而在另外一些盆地,测得的含气量远低于  $2 \text{ m}^3/\text{t}$ (图5a)。

在测得较高含气量的二连盆地(图5d)、吐哈盆地(图5c)以及海拉尔盆地煤层(图5b),含气量随深度呈现先增加后降低的趋势,这一规律与粉河盆地和苏拉特盆地(图5e和图5f)的规律一致。如二

连盆地煤岩埋深约为  $600 \text{ m}$ 时,吐哈盆地煤岩埋深约为  $650 \text{ m}$ 时,海拉尔盆地煤岩埋深约为  $1100 \text{ m}$ 时,测得的含气量最高;粉河盆地煤岩埋深约为  $400 \text{ m}$ ,苏拉特盆地煤岩埋深约为  $500 \text{ m}$ ,测得的含气量最高。通过对比分析发现,国内低煤阶盆地煤岩埋深普遍较深,煤岩最大埋深可达  $1000$ 多  $\text{m}$ ,粉河盆地煤岩最大埋深不超过  $700 \text{ m}$ ,苏拉特盆地煤岩最大埋深不超过  $800 \text{ m}$ 。虽然国内低阶煤盆地与粉河盆地含气量都介于  $0\sim4 \text{ m}^3/\text{t}$ ,但是含气量梯度差异大,当煤岩埋深相同的条件下,国内低阶煤盆地煤岩含气量低于粉河盆地和苏拉特盆地的含气量。

根据前人的研究认识<sup>[27-28]</sup>,低阶煤煤层气主要

是次生生物气,而次生生物气的生成需要有淡水渗入的水文地质条件,含气量与埋深之间的关系将从水文地质条件方面分析解释。粉河盆地单煤层明显较薄,埋深较浅,便于和补给水充分接触,有利于甲烷菌产生甲烷。相比之下,国内低阶煤盆地煤层厚

度较大,埋深较深,不利于和补给水接触生成甲烷,所以含气量相对较低,但因煤层总厚度较大,较低的含气量也可具有一定的资源丰度。煤层气的保存需要良好的封盖条件,煤岩顶底板的岩性以及厚度会对煤层气的储存有较大的影响。

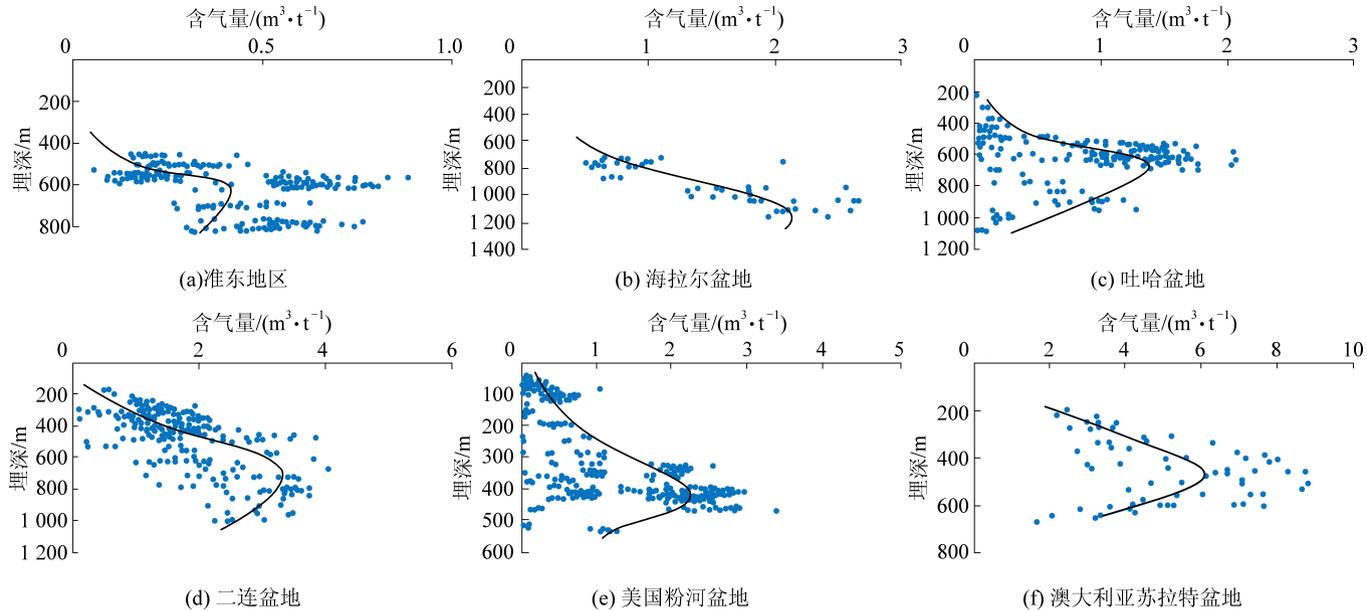


图5 国内外典型低阶煤盆地煤层含气量随埋深变化

Fig.5 Variation of coal seam gas content with burial depth in typical low rank coal basins at home and abroad

### 3.3 水文地质条件的差异

如前所述,低煤阶煤层中的煤层气以次生生物气为主,因此,淡水补给是低阶煤煤层气成藏的先决条件。北美地区在低煤阶煤层中有广泛分布的生物气,生物气的生成与更新世覆盖在北美大陆的巨厚冰盖在最近1~2万年的融水入渗有关<sup>[29]</sup>。如美国粉河盆地煤层气开发的深度较浅,一般小于300m,融化的冰川水提供了丰富的淡水补给来源,由于较低的地层水矿化度与地温,为生物气的不断生成提供了有利的条件<sup>[28-31]</sup>。粉河盆地煤层气开发成功区块主要分布在东部边缘露头的缓坡区,地层水矿化度低(小于1000mg/L),埋深超过150m时就达到了相对较高的含气量。

在中国北部和西北大部分地区,第四纪以来气候总体上较为干旱,蒸发量远大于降雨量,地表水补给不足,地下水矿化度较高,产气的甲烷菌无法大量生存,生物气生成量受到限制,煤层含气量极低。前人通过生物试验结果表明<sup>[28]</sup>,当 $\text{SO}_4^{2-}$ 质量浓度达到960mg/L时,便完全抑制厌氧细菌活动,总矿化度高于10000mg/L时,甲烷菌将完全死亡。如吐哈盆地煤层水矿化度高达10000mg/L, $\text{SO}_4^{2-}$ 质量浓度介于1090~2310mg/L(表2),表明该地区在煤系地层沉积后,缺乏地表淡水补给生成生物气或缺乏

生物气保存的条件。海拉尔盆地靠近大兴安岭山麓,地表水补给相对充足,导致煤层水矿化度较低(1000~6000mg/L,表2),具备较好的生气条件。准东地区的地层水矿化度介于536~3398mg/L,远低于吐哈盆地南部地层水矿化度,但煤层埋深较深,不具备大量生物气生成的条件,从而导致含气量比较低;二连盆地现今地表淡水补给的条件较差,煤层水的矿化度也比较高,从现今水文地质条件来看,不具备大量生物气生成的条件,但含气量比较高,说明单纯用现今水文地质条件无法解释所有现象,需要另外讨论;相比于二连盆地,美国粉河盆地煤层水水样的矿化度介于270~2010mg/L(表2),平均850mg/L,现今地表淡水补给的条件好,煤层水的矿化度低,有利于生物气的生成。

### 3.4 储层物性的差异

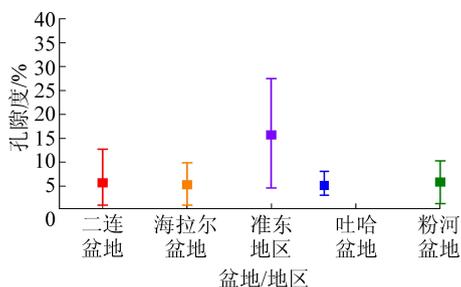
煤储层孔隙由基质孔隙和割理孔隙组成。基质孔隙占有较高的比例,发育于煤的基质块体之中,是煤层气吸附存在的场所;割理孔隙度较低,但为流体产出提供了运移通道<sup>[34]</sup>。储层的连通性一般用渗透率来表征,渗透率指孔隙-裂隙介质传导流体的能力,是煤层气开发的关键参数<sup>[35-37]</sup>。美国粉河盆地低阶煤煤层气开发取得成效,测得的煤岩割理(裂隙)孔隙度在0.1%~1.0%,测得的煤岩基质孔

表2 国内外典型低阶煤盆地煤层水水化学特征对比<sup>[18,27-33]</sup>

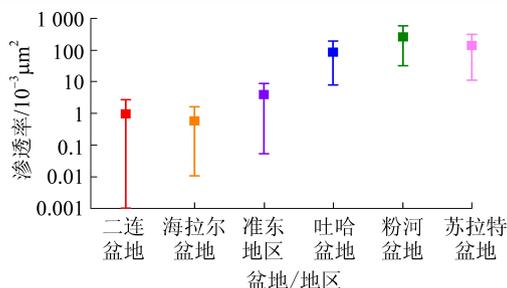
Table 2 Comparison of water-hydrochemical characteristics of coal seams in typical low rank coal basins at home and abroad

盆地/区块	深度/m	主要水型	pH 值(平均值)	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> 质量浓度/(mg·L <sup>-1</sup> )	总矿化度/(mg·L <sup>-1</sup> )
准东地区	<800	NaCl/Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	—	—	536~3 398
海拉尔盆地	800~1 200	NaHCO <sub>3</sub>	—	—	1 000~6 000
二连盆地	<1 000	NaHCO <sub>3</sub>	7.32~7.76	1.41~50.32	4 000~6 400
吐哈盆地	<1 000	Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> /CaCl <sub>2</sub>	—	1 090~2 310	约 10 000
粉河盆地	<300	NaHCO <sub>3</sub>	6.8~7.7(7.3)	0.01~17.00	270~2 010(850)
苏拉特盆地	100~800	NaCl/NaHCO <sub>3</sub>	7.8~8.5(8.3)	0.1~4.0	792~10 177(4 091)

隙度变化较大,一般在 1%~10%,且基质孔隙度随埋深增大而增加,总体来说,粉河盆地煤储层渗透率非常有利,研究得出各个煤层的割理(裂隙)渗透率在(50~500)×10<sup>-3</sup> μm<sup>2</sup>,而煤层的基质渗透率很低,且变化较大,一般为小于 1×10<sup>-3</sup> μm<sup>2</sup>。与粉河盆地相比,国内大部分低阶煤盆地(二连盆地和海拉尔盆地)煤储层的渗透率小于 1.0×10<sup>-3</sup> μm<sup>2</sup>(图 7),总体相对较低,要比国外低 1~2 个数量级。据文献[11-12]调研统计(图 6 和图 7),二连盆地吉尔嘎朗图凹陷赛汉塔拉组煤样孔隙度为 0.10%~12.55%,平均 3.92%,渗透率为(0.001~2.589)×10<sup>-3</sup> μm<sup>2</sup>,平均 0.073×10<sup>-3</sup> μm<sup>2</sup>;海拉尔盆地呼和湖地区煤岩孔隙度为 0.68%~9.73%,平均 4.70%,渗透率为(0.01~1.46)×10<sup>-3</sup> μm<sup>2</sup>,平均 0.273×10<sup>-3</sup> μm<sup>2</sup>;准东地区西山窑组煤层孔隙度 4.33%~27.46%,平均 15.38%,煤层渗透率变化较大,为(0.05~8.67)×10<sup>-3</sup> μm<sup>2</sup>;吐哈盆地沙尔湖地区煤岩孔隙度为 2.90%~7.75%,平均 4.95%,渗透率为(7.5~181.9)×10<sup>-3</sup> μm<sup>2</sup>。由于无法测出煤岩的割理(裂隙)孔隙度和基质孔隙度,就不能进一步说明二连盆地煤岩孔隙度高,但渗透率低的原因,有待于进一步的研究。

图6 国内外典型低阶煤盆地煤岩孔隙度对比<sup>[11-15]</sup>Fig.6 Coal-rock porosity correlation of typical low rank basins at home and abroad<sup>[11-15]</sup>

总的来说,我国低阶煤储层的渗透率总体相对较低,要比国外低 1~2 个数量级。较高渗透率不仅有利于富集煤层气的产出,而且对于低阶煤层气的生成具有很重要的影响因素,较大的渗透率有利于淡水的入渗补给,为产生次生物气提供条件。

图7 国内外典型低阶煤盆地煤岩渗透率对比<sup>[11-15]</sup>Fig.7 Coal-rock permeability correlation of typical low rank basins at home and abroad<sup>[11-15]</sup>

如美国的粉河盆地,在煤层埋深 300 m 时含气量就达到 2~3 m<sup>3</sup>/t,这与渗透率较大、淡水入渗补给条件好有很大的关系。

#### 4 低阶煤煤层气储层条件对比结果

美国粉河盆地和澳大利亚苏拉特盆地比二连盆地、海拉尔盆地、准东地区和吐哈盆地煤储层条件更优越,粉河盆地和苏拉特盆地存在资源量大、埋深浅、渗透率高、含气量高和单井产量高。具体对比结果见表 3。

盆地地质条件差异明显:国内低阶煤盆地主要形成于早侏罗世—白垩纪,经历多次强烈构造事件。粉河盆地形成于白垩纪—新近纪、苏拉特盆地形成于晚侏罗世,它们的构造均较简单。煤层厚度差异明显:国外低阶煤盆地单煤层明显较薄,便于和补给水充分接触,有利于甲烷菌产生甲烷。相比之下,国内低阶煤盆地煤层厚度较大,不利于和补给水接触生成甲烷,含气量低。埋深条件差异明显:国内低阶煤盆地煤层埋深较深,煤岩最大埋深可超过 1 000 多 m;而粉河盆地和苏拉特盆地煤层埋深较浅。含气性差异较明显:国内低阶煤盆地与粉河盆地含气量数值相当,但是含气量梯度差异大,当煤岩埋深相同的条件下,国内低阶煤盆地煤岩含气量低于粉河盆地和苏拉特盆地的含气量。水文地质条件差异明显:国内低阶煤盆地埋深普遍较深,且煤层被上覆地层覆盖,地表淡水补给的条件较差,煤层水的矿化度

也比较高,不具备大量生物气生成的条件。粉河盆地埋深比较浅,融化的冰川水和地表水提供了丰富的淡水补给来源,由于较低的地层水矿化度与地温,为生物气的不断生成提供了有利的条件。粉河盆地成功区块主要分布在东部边缘露头的缓坡区,地层水矿化度低(小于1 000 mg/L),埋深超过150多m时就达到了相对较高的含气量。渗透性差异明显:国内低阶煤盆地储层的渗透率总体相对较低,要比

粉河盆地和苏拉特盆地低1~2个数量级。较高渗透率不仅有利于煤层气的产出,同时也影响着煤层气的生成,较大的渗透率有利于淡水的入渗补给,为产生次生生物气提供条件;产量差异明显:国内低阶煤盆地煤储层压力低,以低压为主,渗透率普遍低于粉河盆地和苏拉特盆地,导致国内低阶煤盆地煤层气产量较低。

表3 国内外典型低阶煤盆地地质条件对比

Table 3 Comparison of geological conditions of typical low rank basins at home and abroad

地质条件	粉河盆地	苏拉特盆地	二连盆地	吐哈盆地	海拉尔盆地	准东地区
地质时代	E	K <sub>2</sub> -E	K <sub>1</sub>	J	K <sub>1</sub>	J
面积/(10 <sup>4</sup> km <sup>2</sup> )	6.68	1.4	3.5	2.63	1.30	—
资源量/(10 <sup>12</sup> m <sup>3</sup> )	3.34	0.9	1.18	1.16	1.30	—
深度/m	90~500	100~800	<1 000	487~1 000	100~1 200	<800
镜质体反射率/%	0.3~0.4	0.3~0.6	0.25~0.54	0.31~0.45	0.31~0.47	0.52~0.64
煤层厚/m	12~120	10~50	20~200	20~80	30~130	10~130
含气量/(m <sup>3</sup> ·t <sup>-1</sup> )	0.5~3.4	1.6~9.0	1.0~4.0	0.2~2.1	1.0~3.5	0.1~1.2
渗透率/(10 <sup>-3</sup> μm <sup>2</sup> )	30~550	10~300	<1	0.5~6.1	—	0.05~8.67
储层压力梯度/(MPa·hm <sup>-1</sup> )	0.6~0.7	0.9~1.0	正常—欠压	正常—欠压	正常欠压	0.79~1.22
单井日产气量/(10 <sup>4</sup> m <sup>3</sup> )	0.45	0.24	0.1	—	—	—

## 5 结 论

1) 国内低阶煤盆地主要形成于早侏罗世—白垩纪,经历多次强烈构造事件。粉河盆地形成于白垩纪—新近纪、苏拉特盆地形成于晚侏罗世,它们的构造格局相对稳定,且地层封闭性好。

2) 低煤阶煤层基质孔隙越发育,煤层渗透性越好。国内低阶煤盆地煤储层的渗透率总体相对较低,要比粉河盆地和苏拉特盆地低1~2个数量级。国内低阶煤盆地煤层渗透率较低,不利于煤层气的勘探开发,需要后期的储层改造来增加其孔渗性。

3) 低煤阶煤层中的煤层气以次生生物气为主,适宜的水文地质条件是低阶煤煤层气成藏的前提条件。与美国粉河盆地相比,国内盆地地层水矿化度较高,煤岩埋深较大,低温较高,不利于微生物细菌存活,导致不利于生物气的生成,导致煤层的含气量不能得到补充。

4) 国内低阶煤盆地与粉河盆地相似,含气量低,比苏拉特盆地差。国内盆地煤岩埋深普遍较深,在相同埋深条件下,国内盆地煤岩含气量低于粉河盆地的含气量。煤岩埋藏较深,导致开发成本提高,不利于煤层气的勘探开发。

## 参考文献(References):

- [1] 李五忠,田文广,孙 斌,等.低阶煤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, et al. 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,等.低阶煤煤层气勘探思路[J].天然气工业,2008,28(3):19-22.  
SUN Ping, LIU Honglin, CHAO Haiyan, et al. Exploration direction of coalbed methane in low-rank coals [J]. Natural Gas Industry, 2008, 28(3): 19-22.
- [3] 李登华,高 媛,刘卓亚,等.中美煤层气资源分布特征和开发现状对比及启示[J].煤炭科学技术,2018,46(1):252-261.  
LI Denghua, GAO Xuan, LIU Zhuoya, et al. Comparison and revelation of coalbed methane resources distribution characteristics and development status between China and America [J]. Coal Science and Technology, 2018, 46(1): 252-261.
- [4] 庚 勤,陈 浩,陈艳鹏,等.第4轮全国煤层气资源评价方法及结果[J].煤炭科学技术,2018,46(6):64-68.  
GENG Meng, CHEN Hao, CHEN Yanpeng, et al. Methods and results of the fourth round national CBM resources evaluation [J]. Coal Science and Technology, 2018, 46(6): 64-68.
- [5] 王博洋,秦 勇,申 建,等.我国低煤阶煤煤层气地质研究综述[J].煤炭科学技术,2017,45(1):170-179.  
WANG Boyang, QIN Yong, SHEN Jian, et al. Summarization of geological study on low rank coalbed methane in China [J]. Coal Science and Technology, 2017, 45(1): 170-179.

- [6] 孙粉锦,李五忠,孙钦平,等.二连盆地吉尔嘎朗图凹陷低阶煤层气勘探[J].石油学报,2017,38(5):485-492.  
SUN Fenjin,LI Wuzhong,SUN Qinqing,*et al.* Low-rank coalbed methane exploration in the Jiergalangtu Sag, Erlian Basin[J].*Journal of Petroleum*,2017,38(5):485-492.
- [7] 傅雪海,张万红,范炳恒,等.吐哈盆地与粉河盆地煤储层物性对比分析[J].天然气工业,2005,25(4):38-39,6.  
FU Xuehai,ZHANG Wanhong,FAN Bingheng,*et al.* Petrophysical correlation and analysis of the coal reservoirs in Tuha basin and Powder River basin[J].*Natural Gas Industry*,2005,25(4):38-39,6.
- [8] 陈振宏,贾承造,宋 岩,等.高煤阶与低阶煤层气藏物性差异及其成因[J].石油学报,2008,29(2):179-184.  
CHEN Zhenhong,JIA Chengzao,SONG Yan,*et al.* Differences and origin of physical properties of low-rank and high rank coal-bed methanes[J].*Acta Petrolei Sinica*,2008,29(2):179-184.
- [9] 王 勃,李景明,张 义,等.中国低阶煤层气地质特征[J].石油勘探与开发,2009,36(1):30-34.  
WANG Bo, LI Jingming, ZHANG Yi, *et al.* Geological characteristics of low rank coalbed methane, China [J]. *Petroleum Exploration and Development*,2009,36(1):30-34.
- [10] 许 浩,汤达祯,唐书恒,等.鄂尔多斯盆地西部侏罗系煤储层特征及有利区预测[J].煤田地质与勘探,2010,38(1):26-28,32.  
XU Hao, TANG Dazhen, TANG Shuheng, *et al.* Coal reservoir characteristics and prospective areas for Jurassic CBM exploitation in western Ordos basin[J].*Coal Geology and Exploration*,2010,38(1):26-32.
- [11] 王 帅,邵龙义,孙钦平,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,*et al.* Characteristics of CBM reservoirs and exploration potential in Jiergalangtu sag of Erlian Basin[J].*Coal Geology & Exploration*,2017,45(4):63-69.
- [12] 孙钦平,王生维,田文广,等.二连盆地吉尔嘎朗图凹陷低阶煤层气富集模式[J].天然气工业,2018,38(4):59-66.  
SUN Qinqing,WANG Shengwei,TIAN Wenguang,*et al.* Accumulation patterns of low-rank coalbed methane gas in the Jiergalangtu Sag of the Erlian Basin[J].*Natural Gas Industry*,2018,38(4):59-66.
- [13] 王单华,姜杉钰,贾宏伟.海拉尔盆地旧桥凹陷低阶煤层气资源潜力分析[J].特种油气藏,2019,26(2):65-70.  
WANG Danhua,JIANG Shanyu,JIA Hongwei. Resource potential analysis of low rank coalbed methane in Jiuqiao Sag of Hailar Basin[J].*Special Oil & Gas Reservoirs*,2019,26(2):65-70.
- [14] 孙钦平,孙 斌,孙粉锦,等.准噶尔盆地东南部低阶煤层气富集条件及主控因素[J].高校地质学报,2012,18(3):460-464.  
SUN Qinqing,SUN Bin,SUN Fanjin,*et al.* Accumulation and geological controls of low-rank coalbed methane in Southeastern Junggar Basin [J]. *Geological Journal of China Universities*,2012,18(3):460-464.
- [15] 谷 峰,唐 颖,俞益新,等.澳大利亚鲍恩盆地冲断带煤层气构造控气特征研究[J].煤炭科学技术,2017,45(10):182-187,59.  
GU Feng,TANG Ying,YU Yixin,*et al.* Study on gas control features of coalbed methane structure in thrust belt of Bowen Basin in Australia[J].*Coal Science and Technology*,2017,45(10):182-187,59.
- [16] KOTARBA M J. Composition and origin of coalbed gases in the Upper Silesian and Lublin Basins, Poland[J]. *Organic Geochemistry*,2001,32(1):163-180.
- [17] SCOTT A R. Hydrogeologic factors affecting gas content distribution in coal beds[J]. *International Journal of Coal Geology*,2002,50:363-387.
- [18] 田文广,邵龙义,张继东,等.鄂尔多斯盆地南部侏罗系煤层气成因探究[J].中国矿业,2015,24(5):81-85.  
TIAN Wenguang,SHAO Longyi,ZHANG Jidong,*et al.* Analysis of genetic types of the coal bed methane of Jurassic formation, Southern Ordos Basin[J].*China Mining Magazine*,2015,24(5):81-85.
- [19] 孙粉锦,田文广,陈振宏,等.中国低阶煤层气多元成藏特征及勘探方向[J].天然气工业,2018,38(6):10-18.  
SUN Fanjin,TIAN Wenguang,CHEN Zhenhong,*et al.* Low-rank coalbed methane gas pooling in China: Characteristics and exploration orientation[J].*Natural Gas Industry*,2018,38(6):10-18.
- [20] 陶明信.煤层气地球化学研究现状与发展趋势[J].自然科学进展,2005,15(6):648-652.  
TAO Mingxin. The research status and tendency of coalbed gas geochemistry[J]. *Progress in Natural Science*,2005,15(6):648-652.
- [21] MACIEJ J Kotarba. Composition and origin of coalbed gases in the Upper Silesian and Lublin Basins, Poland[J]. *Organic Geochemistry*,2001,32:163-180.
- [22] MICHAEL J Whiticar. Carbon and hydrogen isotope systematics of bacterial formation and oxidation of methane[J]. *Chemical Geology*,1999,45(161):291-314.
- [23] HILDENBRAND A,KROOSS B M,BUSCH A,*et al.* Evolution of methane sorption capacity of coal seams as a function of burial history: a case study from the Campine Basin, NE Belgium[J]. *Int J of Coal Geol*,2006,66(3):179-203.
- [24] 刘大锰,王颖晋,蔡益栋.低阶煤层气富集主控地质因素与成藏模式分析[J].煤炭科学技术,2018,46(6):1-8.  
LIU Dameng,WANG Yingjin,CAI Yidong. Analysis of main geological controls on coalbed methane enrichment and accumulation patterns in low rank coals [J]. *Coal Science and Technology*,2018,46(6):1-8.
- [25] 张 成.准东地区低阶煤层气成藏条件与有利区预测[D].北京:中国地质大学(北京),2016.
- [26] 唐 颖,谷 峰,吴晓丹,等.澳大利亚苏拉特盆地 Walloon 煤组成藏条件及富集模式[J].天然气工业,2017,37(11):18-28.  
TANG Ying,GU Feng,WU Xiaodan,*et al.* Coalbed methane accumulation conditions and enrichment models of Walloon coal measure in the Surat Basin, Australia[J].*Natural Gas Industry*,2017,37(11):18-28.
- [27] 陈 浩,秦 勇,邓 泽,等.二连盆地吉尔嘎朗图凹陷低阶煤层气生物产气影响因素[J].天然气工业,2018,38(6):27-32.  
CHEN Hao,QIN Yong,DENG Ze,*et al.* Factors influencing the

- biogenic gas production of low rank coal beds in the Jiergalangtu sag, Erlian Basin[J]. *Natural Gas Industry*, 2018, 38(6): 27-32.
- [28] 刘洪林, 李景明, 王红岩, 等. 水文地质条件对低阶煤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, *et al.* Control of hydrogeological conditions on the formation of low rank coal[J]. *Natural Gas Industry*, 2008, 28(7): 20-22.
- [29] TANG Ying, GU Feng, WU Xiaodan, *et al.* Coalbed methane accumulation conditions and enrichment models of Walloon coal measure in the Surat Basin, Australia[J]. *Natural Gas Industry*, 2017, 37(11): 235-244.
- [30] 李景明, 巢海燕, 李小军, 等. 中国煤层气资源特点及开发对策[J]. *天然气工业*, 2009, 29(4): 9-13.  
LI Jingming, CHAO Haiyang, LI Xiaojun, *et al.* Characteristics of coalbed methane resource and the development strategie[J]. *Natural Gas Industry*, 2009, 29(4): 9-13.
- [31] 王 勃, 李 谨, 张 敏. 煤层气成藏地层水化学特征研究[J]. *石油天然气学报*, 2007(5): 66-68, 166.  
WANG Bo, LI Jin, ZHANG Min. Formation water chemical characteristics of coalbed methane (CBM) reservoir formation[J]. *Journal of Oil and Gas Technology*, 2007(5): 66-68, 166.
- [32] 侯海海, 邵龙义, 唐 跃, 等. 我国低阶煤煤层气成因类型及成藏模式研究[J]. *中国矿业*, 2014, 23(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, 23(7): 66-69, 95.
- [33] 孙 平, 王 勃, 孙粉锦, 等. 中国低阶煤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, *et al.* Research on reservoir patterns of low-rank coal-bed methane in China[J]. *Journal of Petroleum*, 2009, 30(5): 648-653.
- [34] 孟召平, 田永东, 李国富. 煤层气开发地质学理论与方法[M]. 北京: 科学出版社, 2010.
- [35] 雷怀玉, 孙钦平, 孙 斌, 等. 二连盆地霍林河地区低阶煤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 Qingping, 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.
- [36] 陈振宏. 高、低阶煤煤层气藏主控因素差异性对比研究[D]. 广州: 中国科学院研究生院(广州地球化学研究所), 2007.
- [37] 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.
- [38] 陈 刚, 秦 勇, 胡宗全, 等. 不同煤阶深煤层含气量差异及其变化规律[J]. *高校地质学报*, 2015, 21(2): 274-279.  
CHEN Gang, QIN Yong, HU Zongquan, *et al.* Variations of gas content in deep coalbeds of different coal ranks[J]. *Geological Journal of China Universities*, 2015, 21(2): 274-279.