

深部煤层气资源开发潜力 ——以鄂尔多斯盆地大牛地气田为例

何发岐¹,董昭雄²

(1. 中国石化 华北油气分公司,河南 郑州 450006; 2. 中国石化 华北油气分公司 勘探开发研究院,河南 郑州 450006)

摘要:煤成气理论指导下煤系“源外型”大气田的陆续发现有效促进了中国天然气工业的发展,而“源内型”煤层气却发展缓慢。研究认为“源内型”深部(2 000 m以深)煤层气同样具有巨大的勘探潜力。以鄂尔多斯盆地大牛地气田为例,通过石炭系-二叠系含煤地层取心系统开展实验研究,结果表明煤系岩石普遍含气,其中煤层中存在原地游离气且煤层气资源丰度最高为 $3.86 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{km}^2$;结合地层埋藏和热演化史,认为层状非均质地层中泥岩和灰岩的喉道半径较小,毛管阻力封堵形成了以砂岩和煤岩为主的煤系岩性圈闭,煤岩(性)圈闭是其中游离气形成的主控因素;煤岩心含水饱和度介于6.5%~30.1%,较低的含水饱和度使常规煤层气开采过程中的“排水减压”变成了“排气降压”,有利于深部煤层气的动用;原生-碎裂型煤体结构也是储层压裂改造的有利特征。研究认为深部煤层气是煤系“甜点”资源,辅以科学合理的技术和经济手段可实现有效开发。

关键词:烃源岩;游离气;岩性圈闭;深部煤层气;非常规天然气;上古生界;大牛地气田;鄂尔多斯盆地

中图分类号:TE122.3

文献标识码:A

Development potential of deep coalbed methane: A case study in the Daniudi gas field, Ordos Basin

He Faqi¹, Dong Zhaoxiong²

(1. North China Oil and Gas Company, SINOPEC, Zhengzhou, Henan 450006, China;

2. Research Institute of E&P, North China Oil and Gas Company, SINOPEC, Zhengzhou, Henan 450006, China)

Abstract: Guided by coal-derived gas theories, a batch of coalbed methane fields with external sources have been discovered in China. However, “internal-sourced” coalbed methane fields are barely found in the country despite many studies indicating great potential of internal-sourced coalbed methane from deep layers (more than 2 000 m deep). This study carries out experiments on the core samples taken from deep Carboniferous-Permian coal-bearing strata in the Daniudi gas field, Ordos Basin, and finds that all coal measures in the field generally contain gas and sometimes free gas and that the coalbed methane abundance can be as high as $3.86 \text{ bcm}/\text{km}^2$. Combined with stratigraphic burial history and thermal evolution, it is suggested that these layered heterogeneous strata like mudstone and limestone contain mostly small-sized pore throats and thus form the lithological traps dominated by sandstone and coal rocks due to capillary resistance sealing. The coalbed lithological traps control the accumulation of free gas within. Low water saturation values (6.5%–30%) of the cores may explain the phenomenon that the depressurization via dewatering in conventional coalbed methane extraction often ends with depressurization via de-gassing, which is conducive to the producing of deep coalbed methane. The primary-cataclastic coal structure is also a favorable feature for fracturing stimulation. The study concludes that deep coalbed methane can be commercially extracted with suitable techniques and thus is worthy of attention.

Key words: source rock, free gas, lithological trap, deep coalbed methane, unconventional gas, Upper Paleozoic, Daniudi gas field, Ordos Basin

收稿日期:2020-11-16;修订日期:2022-01-17。

第一作者简介:何发岐(1967—),男,博士、教授级高级工程师,石油与天然气勘探与开发。E-mail:Hefq.hbsj@sinopec.com。

通讯作者简介:董昭雄(1980—),男,高级工程师,非常规油气地质。E-mail:Dongzx.hbsj@sinopec.com。

引用格式:何发岐,董昭雄.深部煤层气资源开发潜力——以鄂尔多斯盆地大牛地气田为例[J].石油与天然气地质,2022,43(2):277-285. DOI: 10.11743/ogg20220203.

He Faqi, Dong Zhaoxiong. Development potential of deep coalbed methane: A case study in the Daniudi gas field, Ordos Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2022, 43(2): 277-285. DOI: 10.11743/ogg20220203.

中国煤资源丰富,煤的形成时期与全球其他地区基本相同。晚古生代聚煤作用形成的煤层分布范围最为广泛,厚度最为稳定^[1-5]。20世纪70年代以气为主、以油为辅的煤成烃(气)理论证明煤系天然气资源潜力巨大,并成功地指导了多个大型煤成气田的发现^[6-10]。成藏机制与分布规律等研究表明,“源外型”煤成砂岩气的主要成分为甲烷,须具备有效的圈闭和“源-储”输导系统等条件才能聚集成藏^[11-15]。近年来随着国内外页岩气勘探开发取得成功,“源内型”煤系炭质(泥)页岩气逐渐成为勘探开发热点,与煤层气一起作为“共探合采”的目标^[16-18]。但是针对这种叠合“源内型”资源分类评价研究还很少,以致煤系非常规天然气藏的勘探开发目标主次不分明,特别是2000 m以深煤层气的成藏机理及其可动用性研究成果还很少。

国内煤层气资源评价目标范围还仅限于埋深2000 m以浅的 $41 \times 10^4 \text{ km}^2$ 之内;还有超过 $200 \times 10^4 \text{ km}^2$ 的地区未开展煤层气资源评价,其中大量与煤系(泥)页岩共生的煤层埋藏深度均超过2000 m^[19-20]。以鄂尔多斯盆地上古生界煤系为例,煤与致密砂岩、粉砂岩、泥岩、炭质(泥)页岩和灰岩等互层,其中煤层厚度大、分布广,煤/地比高达0.15~0.35;煤系整体含气特征明显、资源量大,仅盆地东缘埋深2000 m左右的二叠系山西组2段煤系资源量就高达 $3 \times 10^{12} \text{ m}^3$ ^[18]。中西部埋深更大的煤系“源内型”非常规天然气多与“源外型”致密砂岩气开发区叠合,且普遍具有很好的含气显示,其中厚度和含气性均以煤层为最好。

本文以大牛地气田太原组8#煤层为主要研究对象,根据岩心含气量测定以及等温吸附等实验结果对深部煤层及非常规储层的含气特征和成藏机理展开研究;利用常规砂岩气藏生产动态特征、天然气的组分和碳同位素实验落实了煤层气的贡献,并结合煤体结构、地层流体特征以及地面优势条件等讨论煤层气的可动用性和开发潜力,以期对煤系非常规天然气目标选择和有效动用提供参考和借鉴。

1 区域地质特征

鄂尔多斯盆地是中国煤成气资源最丰富的地质单元^[21-26]。晚古生代盆地夹持于古亚洲洋与秦岭洋

之间,盆地性质由克拉通拗陷到内陆拗陷转化过渡,属赤道潮湿气候带,成煤的古植物繁盛。此阶段物源区隆升为煤层形成提供了充沛的碎屑与成煤有机物质,在区域性的海退和海侵间歇期出现了有利聚煤的泥沼环境^[27-29]。地层自下而上发育上石炭统本溪组和太原组、下二叠统山西组、中二叠统下石盒子组和上石盒子组以及上二叠统石千峰组,含煤地层主要分布在上石炭统太原组和下二叠统山西组。大牛地气田含煤地层累计厚度为90~220 m,埋深介于2500~2900 m。煤层主要分布在太1段和山1段,累计厚度为18~25 m(图1)。

2 深部煤层气藏特征

2.1 煤系岩石特征及岩性圈闭组合

大牛地气田上古生界太原组煤系地层主要为有障壁岛浅海沉积体系,沉积物主要由煤、砂岩、粉砂岩、炭质(泥)页岩、泥岩和泥晶灰岩等组成,煤层厚度大和分布范围广是该区较为典型的标志特征。其中8#煤层单层厚度最高达17 m,平均为10.56 m;煤岩有机质含量高,有机碳含量(TOC)平均为72%,镜质组含量高达85%;热演化处于较高成熟度阶段,镜质体反射率(R_o)为1.4%~1.7%,属中煤阶、中-低挥发分烟煤。太原组已开发的致密砂岩气层主要发育于太2段障壁砂坝和潮汐水道,分布比较局限;太1段砂岩则呈零星分布。通过物性分析、高压进/退汞、 CO_2 和 N_2 吸附/脱附等实验结果发现煤系具有很强的非均质性(表1)。

煤系具有一定存储能力且喉道半径较大的炭质泥岩和粉细砂岩与煤层一同被视为储层,存储能力极差、喉道半径较小的泥岩和灰岩被视为盖层或遮挡层。这种互层叠置的物性非均质岩石组合,在毛管阻力作用下可以形成结构较为复杂的岩性圈闭组合。以8#煤层为中心,将煤系非常规圈闭组合分为4种类型(图2):盖层为直接顶板,遮挡层为直接底板的组合称为Ⅰ型圈闭;盖层为直接顶板,遮挡层为间接底板,中间夹非煤储层的组合称为Ⅱ型圈闭;盖层为间接顶板,中间夹非煤储层,遮挡层为直接底板的组合称为Ⅲ型圈闭;盖层和遮挡层均为间接顶板和底板,中间均有非煤储层的组合称为Ⅳ型圈闭。

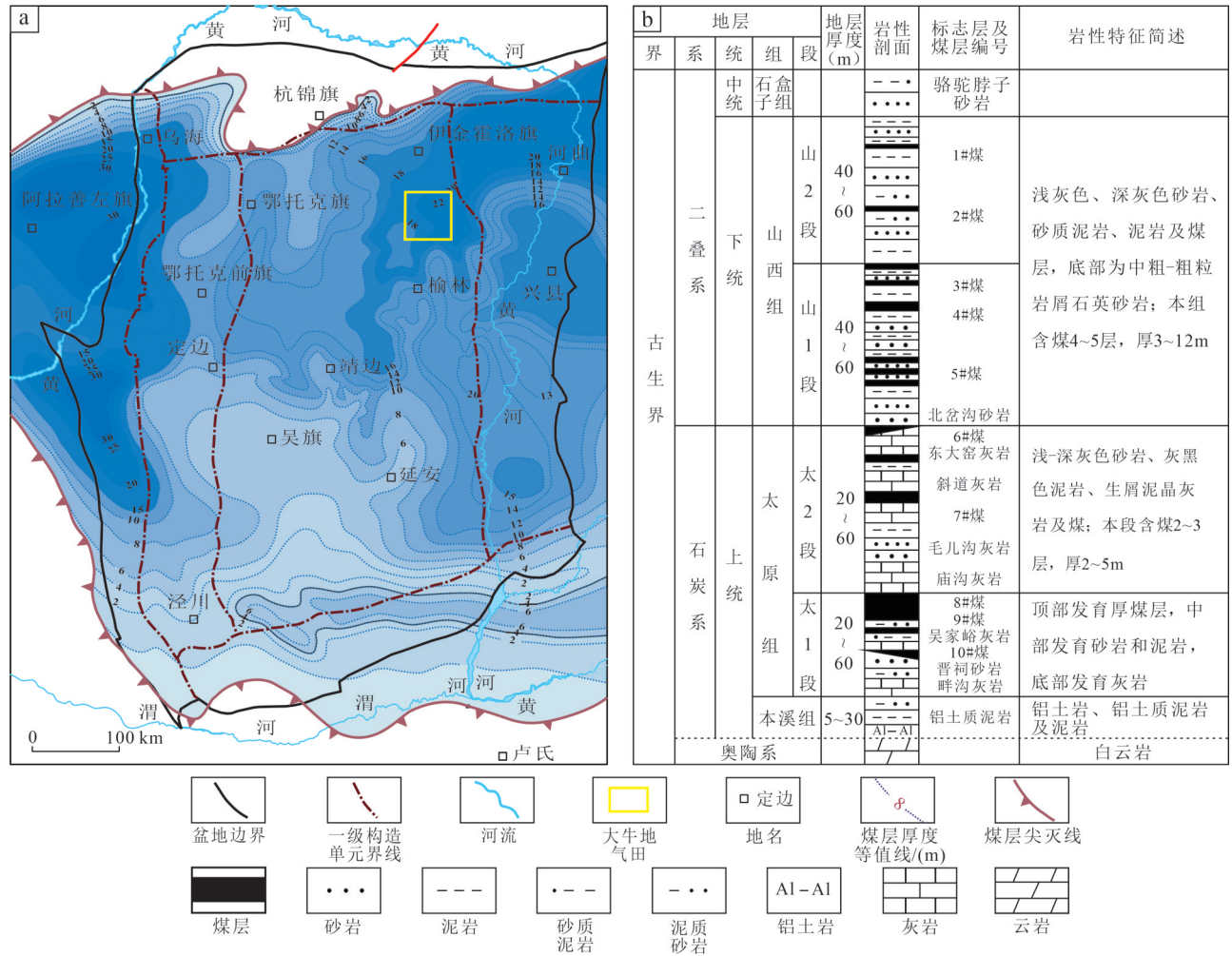


图1 鄂尔多斯盆地上古生界煤层分布

Fig. 1 Distribution of the Upper Paleozoic coalbeds in the Ordos Basin

a. 煤层累计厚度平面分布; b. 煤系综合柱状图

表1 鄂尔多斯盆地太原组煤系地层不同岩层物性及含气量统计

Table 1 Statistics of physical properties and gas content in the Taiyuan Formation coal measures of different lithologies, Ordos Basin

参数	煤岩	砂岩	粉砂岩	炭质泥岩	泥岩	灰岩
平均孔隙度/%	5.67	7.20	3.86	3.42	1.20	0.95
平均渗透率/ ($10^{-3} \mu\text{m}^2$)	0.24	0.37	0.16	0.15	0.08	0.06
平均喉道半径/nm	381.00	420.42	268.58	280.07	84.58	8.90
平均排驱压力/MPa	0.84	2.14	8.42	6.54	20.38	82.46
平均含气量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{t}^{-1}$)	20.68	未测	2.15	4.56	<1.00	<1.00
样品数量/个	22	3	5	12	7	3

2.2 煤层含气性特征

2.2.1 煤层含气量测定

参照《GB/T 19559—2008 煤层气含量测定方法》，利用中国石化勘探开发研究院无锡所结合“排水集气法与 pVT 定容法”研制的WXC-II解吸仪进行含气量检测。实验结果显示煤系均有较好的含气性(表1)，尤以煤层的含气性为最好。其中8#煤22个样品的含气量介于 $14.40 \sim 32.96 \text{ m}^3/\text{t}$ ，平均值为 $20.68 \text{ m}^3/\text{t}$ 。

2.2.2 等温吸附实验结果

参照《NB/T10117—2018 页岩甲烷等温吸附测定》，采用德国RUBOTHERM高压重量法吸附仪，通过模拟地层温度和压力($T = 85^\circ\text{C}$, $p = 29 \text{ MPa}$)对煤样的吸附能力进行测量。兰氏体积介于 $7.94 \sim 20.02 \text{ m}^3/\text{t}$ ，平均为 $15.27 \text{ m}^3/\text{t}$ ；兰氏压力介于 $2.57 \sim 6.82 \text{ MPa}$ ，平

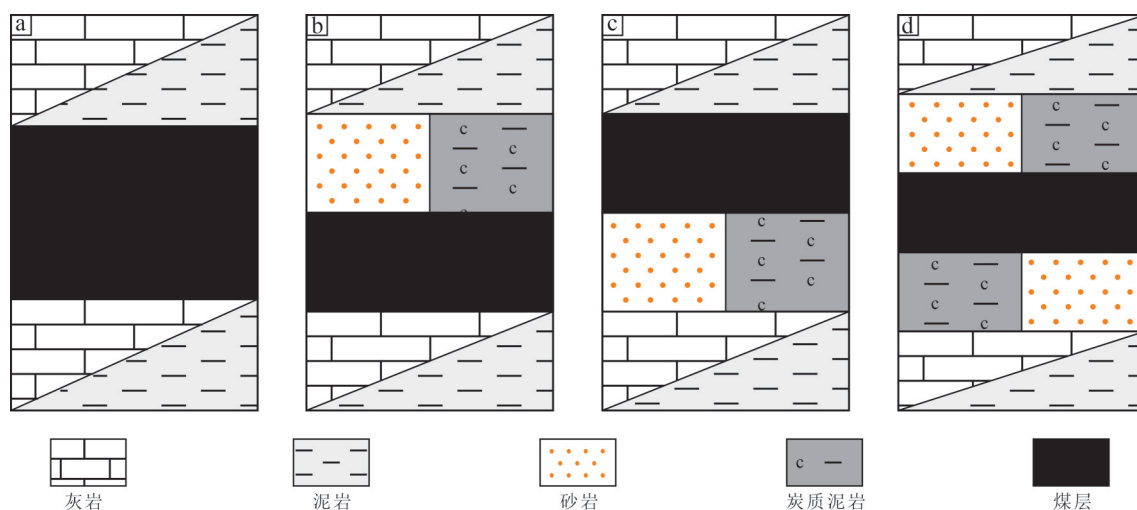


图2 鄂尔多斯盆地大牛地气田岩性组合圈闭类型示意图

Fig. 2 Schematic diagrams showing the lithological trap types in the Daniudi gas field, Ordos Basin

a. I型圈闭; b. II型圈闭; c. III型圈闭; d. IV型圈闭

均值为3.33 MPa。根据Langmuir公式 $[V_A = V_L p / (p_L + p)]$ 计算22个样品在地层条件下理论吸附量均小于含气量检测结果。

2.2.3 含水饱和度实验结果

参照《GB/T 29172—2012 岩心分析方法》,利用烘干失重-气体孔隙度法,对7个蜡封样品进行含水饱和度测试,结果显示煤岩的含水饱和度介于6.5%~30%,平均值为16.3%。

实验结果表明现今地层温度和压力条件下,煤层的含气量普遍大于其最大理论含量,且孔隙中的含水率较低。研究认为生气过程中煤层达到吸附饱和后,仍有大量天然气因为圈闭条件下的毛管阻力作用而不能排出,在原地聚集于裂缝和孔隙中,形成了较高含气饱和度的游离气藏。

2.3 深部煤层气成藏条件与潜在资源量

2.3.1 热演化史及生气史

鄂尔多斯盆地在早白垩世(至今约140~100 Ma)发生一期构造热事件,持续时间约为10~40 Ma。受该期构造热事件的影响,8#煤的热演化生气作用可划分为两个阶段(图3)。

第一阶段,从晚三叠世至早白垩世末(210~95 Ma)。晚三叠世至早侏罗世处于快速埋藏期,煤层进入生烃门限;中、晚侏罗世处于缓慢沉降期,烃源岩进入成熟阶段,煤层开始规模生气;早白垩世受燕山期构造热事件的影响煤层迅速达到成熟-过成熟阶段,大量天然气生成。第二阶段,从早白垩世末(约95 Ma)

至今。地层遭受抬升剥蚀,区内地层剥蚀厚度达到950~1350 m,温度、压力降低,燕山期构造热事件影响逐步消退,煤层仅有少量天然气生成,生气作用明显降低并趋于停止。

2.3.2 煤层气成藏过程

以早白垩世末(至今约95 Ma)为界,将8#煤层组合圈闭中煤层气的成藏分为两个阶段。从中三叠世早期至早白垩世末,是煤层气逐渐生成并增加至截止的阶段,绝大部分煤系天然气于此阶段生成,为煤层气成藏提供了充足的物质基础。此阶段8#煤层中大量天然气生成后从微孔向裂缝中运移,微孔中的绝大部分水也一起排入裂隙中。伴随天然气的聚集裂隙中压力逐渐上升,在煤层岩性圈闭条件作用下裂隙主要以排水为主;当裂隙中的压力上升形成的地层超压高到足以克服盖层毛管压力时,天然气开始向圈闭外运移。最终煤层中的水主要以孤立状和束缚态存储于煤岩的有机微孔和无机孔内;高温高压条件下少量天然气以吸附态,大量天然气以游离态赋存于煤岩的微孔和裂隙空间中。

从早白垩世末至今,由于构造抬升和温压降低导致煤层生气高峰结束。此阶段以天然气在煤层中的赋存状态调整作用为主。由于煤层吸附能力增强,裂隙中的部分游离态天然气回流至微孔中以吸附态赋存,同时构造作用导致煤岩裂隙增加。两种作用一起导致了裂隙内压力降低,使煤层中的超压逐渐降低直至消失。现今地层如仍存在超压,煤层中除少量束缚水外均为游离气;如地层超压完全消失会导致地层水反流,

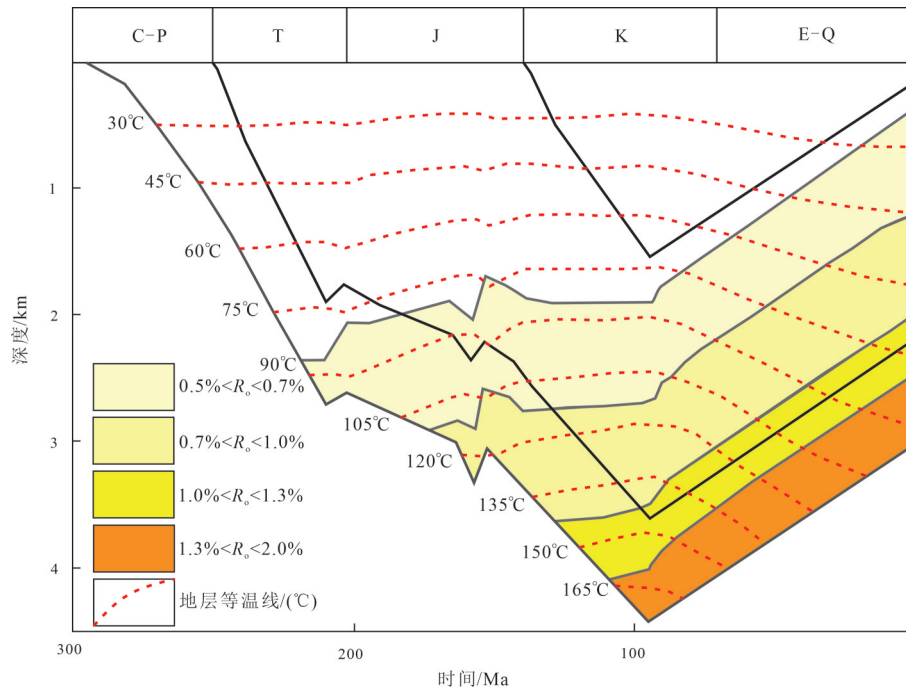


图3 鄂尔多斯盆地大牛地气田地层埋藏及热演化史

Fig. 3 Burial and thermal evolution of the Daniudi gas field, Ordos Basin

游离气饱和度会有所降低,降低程度决定于第一阶段末期到现今地层温度和压力变化导致的煤岩吸附量升高的幅度。结合煤层岩心含水饱和度等实验结果,认为大牛地气田8#煤层在现今地层温度和压力条件下,甲烷吸附饱和后在煤层圈闭中仍保存着相当含量的游离气,局部存在地层超压。

2.3.3 煤层气潜在资源量估算

大牛地气田8#煤层平均厚度为12 m;煤岩密度按平均 1.5 g/cm^3 计算,煤炭资源丰度高达 $1800 \times 10^4 \text{ t/km}^2$ 。根据500余口钻井资料,认为本次含气量检测的3口井样品分别代表了不同煤岩类型的含气量,煤层含气量取平均值 $21.68 \text{ m}^3/\text{t}$,根据厚度、密度和含气量数据,用加权平均法计算出大牛地气田8#煤层中天然气资源丰度高达 $3.86 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{km}^2$ 。根据沉积相和煤炭资源分布情况^[28-29],估算鄂尔多斯盆地石炭系-二叠系深部煤炭资源量至少为 $0.6 \times 10^{12} \text{ t}$,保守计算煤层气资源量大于 $12 \times 10^{12} \text{ m}^3$ 。

3 资源可动用性讨论

3.1 煤层气的可采系数

煤层气动用的影响因素有很多,其中地质条件、开发方式和开采工艺是影响技术可采性的主要因素。本

次研究通过分析该区地质因素对深部煤层气可采系数的影响,主要从煤层水文地质条件、渗流性、吸附和解吸能力等方面展开论述。

3.1.1 水文地质条件

评价水文地质条件对煤层气有效动用的影响,主要研究煤层气的保存条件,以及开发过程中有效排水降压采气的难度^[21-22]。通过前文分析,一方面从含气量检测结果均可证明深部煤层的保存条件较好,同时也证明了在煤层岩性圈闭条件下地层水的流动性较差、相对滞留。另一方面,深部煤层与煤系其他岩石的非均质较强,从煤层含水饱和度低的实验结果可知地层水流动性差,相对滞留、封闭条件与含水饱和度实验结果结合,推测开采过程中“排水”过程变成了“排气”过程,可大幅降低煤层孔隙压力使吸附甲烷充分解吸。

3.1.2 煤体结构与煤岩渗透率

煤岩与碎屑岩最大的不同之处是煤岩的物性特征主要受热演化控制。研究表明中等变质程度较弱变形的煤储层,由于其较高的含气量和渗透率,煤层气可采性好^[23]。该区煤岩热演化程度中等,煤岩 R_o 介于 $1.2\% \sim 1.7\%$,属中等变质程度、中低挥发分烟煤。从岩心出筒的情况看(图4),煤岩整体结构较好且局部发育裂缝,属原生-碎裂型煤体结构。综合分析认为该区煤层具有较好的渗流性。

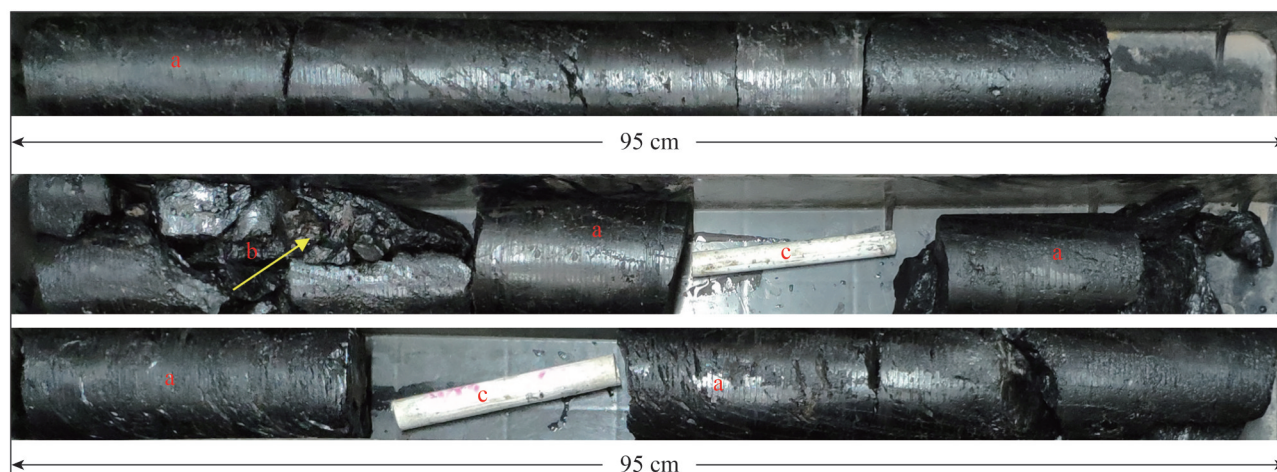


图4 鄂尔多斯盆地大牛地气田8#煤层心宏观结构照片

Fig. 4 Macro structure of 8# coal core from the Daniudi gas field, Ordos Basin

a. 原生型结构; b. 碎裂型结构; c. 实验取样点

3.1.3 吸附和解吸能力与原地游离气

实验结果表明,大牛地气田原地温度和压力条件下8#煤层的兰氏体积平均值为 $15.27 \text{ m}^3/\text{t}$;兰氏压力平均值为 3.33 MPa ,地层条件理论吸附量平均值为 $13.65 \text{ m}^3/\text{t}$,含气量平均值为 $20.68 \text{ m}^3/\text{t}$,煤层中游离气含量的占比高达34%。因此深部煤层气微孔和裂隙中除饱和吸附甲烷外,游离相的天然气与水相比有明显的体积优势。深部煤层中游离气向井筒自由流动时,不仅可以带出部分微孔中的水,而且游离气的减少自然就可以降低孔隙压力,促进煤岩基质表面的吸附甲烷解吸而达到良性循环。因此认为深部煤层吸附饱和后,原地赋存的大量游离气势必会改变煤层气的排采机理,使其较浅部煤层气更易于开发。

综合以上分析认为,大牛地气田深部煤层气的可动用性较强。根据美国煤层气开发经验,煤层气吸附甲烷最低枯竭压力为 $0.4 \sim 1.38 \text{ MPa}$ 。本文参考致密砂岩采收率分析游离气可采系数,在最低枯竭压力取最大值 1.38 MPa 情况下,利用等温吸附曲线计算深部煤层气综合可采系数为65%。

3.2 甜点组合的开发方式

3.2.1 煤系砂岩气高产特征及原因

大牛地气田部分地区石炭系太原组发育一套障壁岛砂岩沉积体,厚度10 m左右的砂岩储层直接或间接上覆于8#煤层。研究区内62口水平井显示两类不同组合类型的砂岩产量差异较大,直接接触型(12口井)较间接接触型日产量高($7450 \text{ m}^3/\text{d}$)(图5),直接接触

型气井压裂返排液煤粉含量高且呈黑色。据此判断压裂过程中煤层和砂岩一起被改造,达到间接改造煤层的效果。

由于天然气中甲烷碳同位素值 $\delta^{13}\text{C}_1$ 具有优先吸附和滞后解吸的性质^[30-33],易与重烃赋存于煤层导致其天然气中 $\delta^{13}\text{C}_1$ 值和组分较致密砂岩气偏高和变湿的现象。天然气组分和碳同位素实验分析结果表明:直接接触型碳同位素均值($\delta^{13}\text{C}_1 = -36.70 \text{ ‰}$)较间接接触型的碳同位素均值($\delta^{13}\text{C}_1 = -38.76 \text{ ‰}$)高,直接接触型的天然气组分较间接接触型的天然气组分更偏向于湿气。故直接接触型砂岩气井动用了下伏煤层气无疑。

3.2.2 地质和工程“甜点”组合

太原组砂岩气藏生产特征说明,煤层顶板中钻水平井进行压裂改造可以较好动用煤层气。大牛地气田8#煤层分布范围广,在前文所述的4类组合圈闭中煤层顶、底板岩石大多具有较好的可改造性。因此深部煤层气的动用应该做好顶、底板岩性的可改造性评价,将顶底板可改造性好的岩石作为工程“甜点”。

煤系非常规圈闭组合中天然气资源量是目标评价的核心。实测含气量数据显示:在煤系非常规岩石组合内煤层含气量均值最高为 $20.68 \text{ m}^3/\text{t}$,炭质(泥)页岩含气量均值为 $4.56 \text{ m}^3/\text{t}$,粉细砂岩含气量均值为 $2.15 \text{ m}^3/\text{t}$,泥岩和灰岩含气量小于 $1 \text{ m}^3/\text{t}$ 。研究区内500口井的含气量与煤系厚度加权计算结果显示,煤层气在非常规天然气中资源量占比高达80%以上。故深部煤层气是煤系非常规动用的地质“甜点”。

综上所述,在煤系非常规天然气开发动用时要根

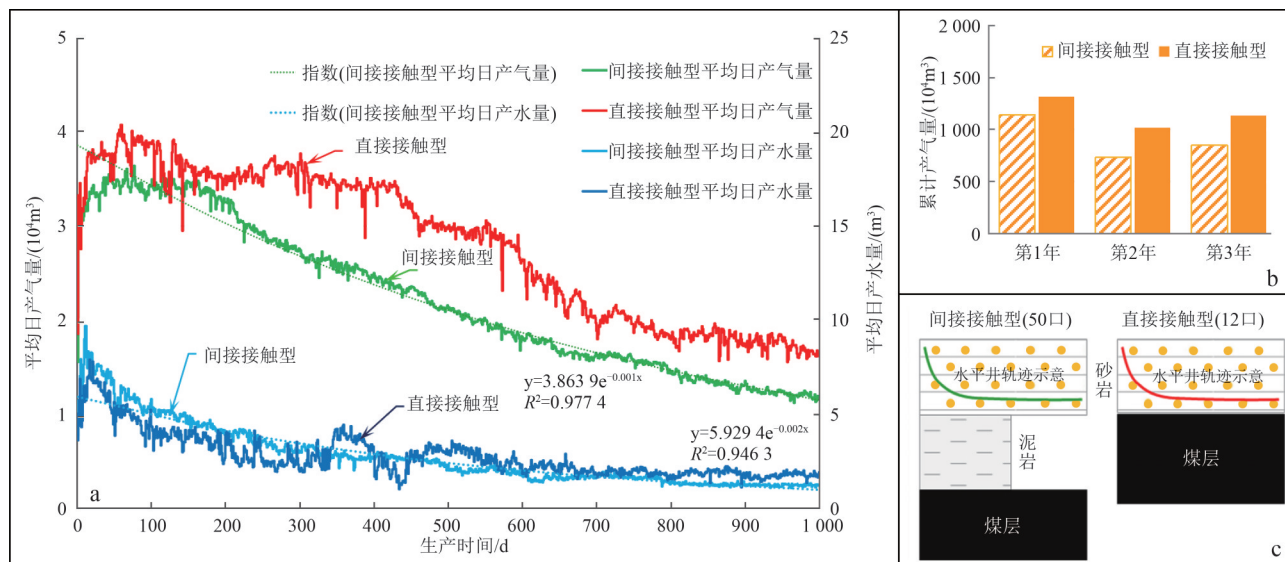


图5 鄂尔多斯盆地大牛地气田8#煤层顶部砂岩气藏生产特征对比

Fig. 5 Comparison of production performance of sandstone gas reservoirs at the top of 8# coalbed in the Daniudi gas field, Ordos Basin

a. 归一化生产特征对比 b. 累计产气特征对比 c. 煤层与砂岩接触类型

据煤系地层结构特征,厘清煤系非常规圈闭中的地质和工程“甜点”的分布位置,为完井方案和储层改造措施的制定提供依据。

3.3 深部煤层气开采的成本优势

国内外深部煤层气勘探开发获得成功的报道较少,但从少量文献资料结果认为深部煤层有可动用性和较大的勘探开发潜力。1981年,Exxon公司利用压裂改造技术,在皮申斯盆地部署的Vega2井深部(埋深2 500 m)煤层中获天然气的稳定产量约为 $1.25 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ^[34]。2012年,准葛尔盆地白家海凸起C504等3口井,在深部(埋深3 300 m)煤层中获天然气的稳定产量为 $1\,000 \sim 8\,870 \text{ m}^3/\text{d}$ 。2017年,鄂尔多斯盆地临兴区块LXX-24井和LXX-23-2井在深部(埋深2 200 m)煤层压后自喷,产气量稳定且高于 $2\,900 \text{ m}^3/\text{d}$ ^[35]。

目前研究区内深部煤层气开发的配套设施已较为完备和成熟,有效开发的有利条件包括:①建设成熟的天然气管道(网)和增压设施等均可用于煤层气抽采和输送;②逐年增加的致密砂岩气藏废弃或停产的老井均可作为深部煤层气开发再利用;③成熟和多样的钻完井、压裂、采气等技术进行集成创新后,可为老井再利用创造有利条件。合理利用上述地上和地下设施和技术,深部煤层气产能建设总体费用可以减少50%以上:按照天然气价格为 $1\,170 \text{ 元}/10^3 \text{ m}^3$,税后内部收益率为10.9%,静态投资回收期为5.8 a测算,单井稳产要求从 $1.20 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 降低到 $0.6 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 以下,对产能要求的降低为深部煤层气的有效开发创造了条件。

4 结论

1) 大牛地气田含煤地层中煤层含气量均值最高 $20.68 \text{ m}^3/\text{t}$,炭质(泥)页岩含气量均值 $4.56 \text{ m}^3/\text{t}$,粉细砂岩含气量均值 $2.15 \text{ m}^3/\text{t}$,泥岩和灰岩含气量小于 $1 \text{ m}^3/\text{t}$ 。厚度、密度和含气量加权平均计算结果表明煤层气在煤系非常规气资源中占比高达85%。推测鄂尔多斯盆地深部煤层气资源丰度高于 $3.86 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{km}^2$,地质条件类似的地区内资源量大于 $12 \times 10^{12} \text{ m}^3$ 。

2) 深部8#煤层中至今仍保存有34%的游离气含量;煤系非均质岩石组合中,煤层与砂岩的喉道半径相对较大,与泥岩和灰岩等致密岩石叠合形成了煤系复杂岩性圈闭;(煤)岩性圈闭是煤层游离气保存的主控因素。

3) 岩心含水饱和度6.5%~30.0%,较低的含水饱和度使常规煤层气开采过程中的“排水减压”变成了“排气降压”,有利于深部煤层气的动用;同时原生-碎裂型煤体结构也是储层压裂改造的有利特征。

4) 深部煤层气是煤系“甜点”资源,辅以科学合理的技术和经济手段可实现有效开发。

参 考 文 献

- [1] 韩德馨,杨起. 中国煤田地质学(下册)[M]. 北京:煤炭工业出版社,1980:19.
Han Dexin, Yang Qi. Coal geology of China (vol. 2) [M]. Beijing: Coal Industry Publishing House, 1980:19.

- [2] 缪奋. 我国煤地质学研究的进展及趋向[J]. 煤田地质与勘探, 1980, 2: 40-46.
Miao Fen. Progress and trend of coal geology research in China [J]. Coalfield Geology and Exploration, 1980(2): 40-46.
- [3] 房忱琛, 戴金星, 吴伟, 等. 中国晚古生代煤系相关的气田及其在天然气工业上的重要意义[J]. 天然气地球科学, 2016, 27(6): 960-973.
Fang Chenchen, Dai Jinxing, Wu Wei, et al. The Late Paleozoic gas fields related to coal measure in China and their significances on natural gas industry[J]. Natural Gas Geoscience, 2016, 27(6): 960-973.
- [4] 杨起, 韩德馨. 中国煤田地质学[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1984.
Yang Qi, Han Dexin. China coal geology[M]. Beijing: Coal Industry Press, 1984.
- [5] 张韬. 中国主要聚煤期沉积环境与聚煤规律[M]. 北京: 地质出版社, 1995.
Zhang Tao. Sedimentary environment and coal accumulation in main coal accumulating stage of China[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1995.
- [6] 戴金星. 成煤作用中形成的天然气和石油[J]. 石油勘探与开发, 1979, 6(1): 10-17.
Dai Jinxing. Petroleum and natural gas generation in coalification [J]. Petroleum Exploration and Development, 1979, 6(1): 10-17.
- [7] 戴金星, 王少昌, 宋岩, 等. 我国煤系的油气地球化学特征、煤成气藏形成条件及资源评价[M]. 北京: 石油工业出版社, 2001.
Dai Jinxing, Wang Shaochang, Song Yan, et al. Geochemical features of hydrocarbon from coal measures, formation and resource evaluation of coal-formed gas reservoir in China[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2001.
- [8] 孙鸿烈. 20世纪中国知名科学家学术成就概览: 地学卷地质分册: 卷二[M]. 北京: 科学出版社, 2013: 53-56.
Sun Honglie. 20th century academic overview of Chinese renowned scientists: Earth science, geology: Vol. 2[M]. Beijing: Science Press, 2013: 53-56.
- [9] 戴金星, 邹才能, 李剑, 等. 中国煤成大气田及气源[M]. 北京: 科学出版社, 2014: 42-50.
Dai Jinxing, Zou Caineng, Li Jian, et al. Giant coal derived gas fields and their gas sources in China[M]. Beijing: Science Press, 2014: 42-50.
- [10] 戴金星, 倪云燕, 廖凤蓉, 等. 煤成气在产气大国中的重大作用[J]. 石油勘探与开发, 2019, 46(3): 417-432.
Dai Jinxing, Ni Yunyan, Liao Fengrong, et al. The significance of coal-derived gas in major gas producing countries [J]. Petroleum Exploration and Development, 2019, 46(3): 417-432.
- [11] 戴金星, 夏新宇, 洪峰, 等. 中国煤成大中型气田形成的主要控制因素[J]. 科学通报, 1999, 44(22): 3-5.
Dai Jinxing, Xia Xinyu, Hong Feng, et al. Main controlling factors for the formation of large and medium-sized coal-based gas fields in China [J]. Scientific bulletin, 1999, 44(22): 3-5.
- [12] 戴金星, 何斌, 孙永祥, 等. 中亚煤成气聚集域形成及其源岩中亚煤成气聚集域研究之一[J]. 石油勘探与开发, 1995, 22(3): 1-6+125.
Dai Jinxing, He Bin, Sun Yongxiang, et al. Formation and source rocks of coal derived gas accumulation domain in Central Asia: Part I of the study on coal derived gas accumulation domain in Central Asia [J]. Petroleum Exploration and Development, 1995, 22(3): 1-6+125.
- [13] 李良, 袁志祥, 惠宽洋等. 鄂尔多斯盆地北部上古生界天然气聚集规律[J]. 石油与天然气地质, 2000, 21(3): 268-271.
Li Liang, Yuan Zhixiang, Xi Kuanyang, et al. Accumulation regularity of Upper Paleozoic gas in North Ordos Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2000, 21(3): 268-271.
- [14] 郝蜀民, 惠宽洋, 李良, 等. 鄂尔多斯盆地大牛地大型低渗气田成藏特征及其勘探开发技术[J]. 石油与天然气地质, 2006, 27(6): 762-768.
Hao Shumin, Xi Kuanyang, Li Liang, et al. Reservoiring features of Daniudi Low-Permeability gas field in Ordos Basin and its exploration and development technologies [J]. Oil & Gas Geology, 2006, 27(6): 762-768.
- [15] 李仲东, 郝蜀民, 李良, 等. 鄂尔多斯盆地上古生界气藏与深盆气藏特征对比[J]. 石油与天然气地质, 2009, 30(2): 149-155.
Li Zhongdong, Hao Shumin, Li Liang, et al. Comparison between the Upper Paleozoic gas reservoirs in Ordos Basin and deep basin gas reservoirs [J]. Oil & Gas Geology, 2009, 30(2): 149-155.
- [16] 李勇, 王延斌, 孟尚志, 等. 煤系非常规天然气合采地质基础理论进展及展望[J]. 煤炭学报, 2020, 45(4): 1406-1418.
Li Yong, Wang Yanbin, Meng Shangzhi, et al. Progress and prospect of geological basic theory of combined mining of unconventional natural gas in coal measures [J]. Acta Coal Sinica, 2020, 45(4): 1406-1418.
- [17] 欧阳永林, 田文广, 孙斌, 等. 中国煤系气成藏特征及勘探对策[J]. 天然气工业, 2018, 38(3): 15-26.
Ouyang Yonglin, Tian Wenguang, Sun Bin, et al. Characteristics of coal measure gas accumulation and such gas exploration strategies in China [J]. Natural Gas Industry, 2018, 38(3): 15-26.
- [18] 匡立春, 董大忠, 何文渊, 等. 鄂尔多斯盆地东缘海陆过渡相页岩气地质特征及勘探开发前景[J]. 石油勘探与开发, 2020, 47(3): 435-447.
Kuang Lichun, Dong Dazhong, He Wenyuan, et al. Geological characteristics and exploration and development prospect of marine continental transitional shale gas in the eastern margin of Ordos Basin [J]. Petroleum Exploration and Development, 2020, 47(3): 435-447.
- [19] 孙万禄, 陈召佑, 陈霞等. 中国煤层气盆地[M]. 北京: 地质出版社, 2005.
Sun Wanlu, Chen Zhaoyou, Chen Xia, et al. Coal Bed Methane Basin in China [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2005.
- [20] 韩海青, 王少波, 李晓波, 等. 中国矿产资源报告[M]. 北京: 地质出版社, 2015: 1-10.
Han Haiqing, Wang Shaobo, Li Xiaobo, et al. Zhongguo Kuang-

- chan Ziyuan Baogao 2015 [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2015: 1-10.
- [21] 康永尚,姜杉钰,张兵,等. 煤层气资源可动用性定性/半定量评价方法研究[J],煤炭学报,2017,42(11): 2914-2924.
Kang Yongshang, Jiang Shanyu, Zhang Bing et al. Qualitative / semi-quantitative evaluation method of coalbed methane exploitation feasibility [J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42 (11): 2914-2924.
- [22] 宋岩,柳少波,马行陟,等. 中高煤阶煤层气富集高产区形成模式与地质评价方法[J]. 地学前缘,2016,23(3):1-9.
Song Yan, Liu Shaobo, Ma Xingzhi, et al. Research on formation model and geological evaluation method of the middle to high coal rank coalbed methane enrichment and high production area [J]. Earth Science Frontiers, 2016, 23(3): 1-9.
- [23] 范俊佳, 琚宜文, 侯泉林, 等. 不同变质变形煤储层孔隙特征与煤层气可采性[J],地学前缘,2010,17(5):325-335.
Fan Junjia, Ju Yiwen, Hou Quanlin, et al. Pore characteristics and coalbed methane recovery of coal reservoirs with different metamorphism and deformation[J]. Geoscience Frontier, 2010, 17 (5): 325-335.
- [24] 杨华, 张军, 王飞雁, 等. 鄂尔多斯盆地古生界含气系统特征[J]. 天然气工业,2000,20(6):7-11.
Yang Hua, Zhang Jun, Wang Feiyan, et al. Characteristics of Paleozoic Gas System in Ordos [J]. Natural Gas Industry, 2000, 20 (6): 7-11.
- [25] 何自新, 付金华, 席胜利, 等. 苏里格大气田成藏地质特征[J]. 石油学报,2003,24(2):6-12.
He Zixin, Jinhua, Xi Shengli, et al. Geological features of reservoir formation of Sulige Gas Field [J]. Acta Petrolei Sinica, 2003, 24 (2): 6-12.
- [26] 马新华. 鄂尔多斯盆地上古生界深盆气特点与成藏机理探讨[J]. 石油与天然气地质,2005,26(4):230-236.
Ma Xinhua. Discussion on characteristics and reservoiring mechanism of deep basin gas in Upper Paleozoic in Ordos Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2005, 26(4): 230-236.
- [27] 杨起,韩德馨. 中国煤田地质学[M]. 北京:煤炭工业出版社, 1984.
Yang Qi, Han Dexin. China Coal Geology [M]. Beijing: Coal Industry Press, 1984.
- [28] 张韬. 中国主要聚煤期沉积环境与聚煤规律[M]. 北京:地质出版社,1995.
Zhang Tao. Sedimentary environment and coal accumulation in main coal accumulating stage of China [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1995.
- [29] 田在艺. 中国含油气盆地岩相古地理与油气[M]. 北京:地质出版社,1997.
Tian Zaiyi. Petrographic palaeogeography and oil and gas in petroliferous basins of China [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1997.
- [30] 王双明. 鄂尔多斯盆地叠合演化及构造对成煤作用的控制[J]. 地学前缘,2017,24(2):54-63.
Wang Shuangming. Ordos Basin superposed evolution and structural controls of coal forming activities [J]. Earth Science Frontiers, 2017, 24(2): 54-63.
- [31] 王双明. 鄂尔多斯盆地构造演化和构造控煤作用[J]. 地质通报,2011,30(4): 544-552.
Wang Shuangming. Ordos Basin tectonic evolution and structural control of coal [J]. Geological Bulletin of China, 2011, 30 (4): 544-552.
- [32] 孟召平, 张纪星, 刘贺, 等. 煤层甲烷碳同位素与含气性关系[J]. 煤炭学报,2014,39(8):1683-1690.
Meng Zhaoping, Zhang Jixing, Liu He, et al. Relationship between the methane carbon isotope and gas-bearing properties of coal reservoir [J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39 (8): 1683-1690.
- [33] 孙健, 魏强, 晏波, 等. 煤层吸附气的全解吸过程及组分与碳同位素变化:基于热模拟实验结果[J]. 煤炭学报,2018,43(10):2848-2856.
Sun Jian, Wei Qiang, Yan Bo, et al. Total desorption process and component and carbon isotope changes of coalbed adsorbed gas: Based on the results of thermal simulation experiment [J]. Acta Coal Sinica, 2018, 43(10): 2848-2856.
- [34] Choate R, Jurich D, Saulnier G J. Geologic overview, coal deposits, and potential for methane recovery from coalbeds, Piceance Basin-Colorado [A]. Craig T Rightmire, Greg E Eddy, James N Kirr. Coalbed Methane Resources of the United States [C]. AAPG Studies in Geology Series 17, 1984.
- [35] 康永尚, 皇甫玉慧, 张兵, 等. 含煤盆地深层“超饱和”煤层气形成条件[J]. 石油学报,2019,40(12):1426-1438.
Kang Yongshang, Huangpu Yuhui, Zhang Bing et al. Formation conditions for deep oversaturated coalbed methane in coal-bearing basins [J]. Acta Petrolei Sinica, 2019, 40(12): 1426-1438.

(编辑 董立)