

# 煤层气成藏机理及气藏类型划分

## ——以鄂尔多斯盆地东缘为例

李 勇<sup>1</sup> 孟尚志<sup>2</sup> 吴 鹏<sup>2</sup> 牛鑫磊<sup>1</sup>

1. 中国矿业大学(北京)地球科学与测绘工程学院 2. 中联煤层气有限责任公司

**摘 要** 随着我国煤层气勘探开发工作的不断深入,定义和归纳赋存状态多样化的煤层气藏,并据此指导煤层气有利勘探目标优选就显得愈发重要。为此,在系统梳理国内外煤层气富集成藏理论的基础上,结合鄂尔多斯盆地东缘煤层气勘探开发的地质规律,借鉴常规油气藏按照圈闭成因进行分类的方法,提出了煤层气圈闭的概念和煤层气藏类型的划分方案。研究成果包括:①结合煤层、砂岩、泥岩和石灰岩在垂向上的组合关系,刻画了“泥裹藏、砂通煤、水包气”的气体封闭样式,“泥裹藏”即以泥岩等致密岩层封闭煤储层而成藏,“砂通煤”即上覆砂岩与煤层连通而与煤层统一形成气藏,“水包气”即在水力封闭和水力封堵作用下,气体在煤层中富集而成藏;②阐释了物性封闭、气压封闭、水压封闭和吸附封闭在煤层气藏形成过程中的作用,指出气藏开发的上、下限分别为风氧化带和地应力转折带;③提出了以构造、岩性、水动力和复合型圈闭为主导的气藏类型划分方案,并分别解剖了背斜、断层、向斜、地层—岩性、水力封堵和水力辅助型煤层气藏。

**关键词** 鄂尔多斯盆地 东缘 煤层气 成藏机理 气藏类型 圈闭 气体封闭 风氧化带 地应力转折带

DOI: 10.3787/j.issn.1000-0976.2017.08.003

## Accumulation mechanisms and classification of CBM reservoir types: A case study from the eastern margin of the Ordos Basin

Li Yong<sup>1</sup>, Meng Shangzhi<sup>2</sup>, Wu Peng<sup>2</sup> & Niu Xinlei<sup>1</sup>

(1. College of Geoscience and Surveying Engineering, China University of Mining and Technology, Beijing 100083, China; 2. China United Coalbed Methane Co., Ltd., Beijing 100011, China)

NATUR. GAS IND. VOLUME 37, ISSUE 8, pp.22-30, 8/25/2017. (ISSN 1000-0976; In Chinese)

**Abstract:** With the continuous deepening of coalbed methane (CBM) exploration and development in China, it is becoming more and more important to define and summarize CBM reservoirs with diverse occurrence states and accordingly to guide the optimization of favorable CBM exploration targets. In this paper, domestic and foreign CBM enrichment and accumulation theories were systematically analyzed. Then, based on geological laws of CBM exploration in the eastern margin of the Ordos Basin, the concept of CBM traps and the classification scheme of CMB reservoirs were put forward in reference to the classification method of conventional oil and gas reservoirs based upon the genesis of traps. And the research results are as follows. First, the gas sealing pattern of "mudstone-surrounding reservoir, sandstone-connecting coal and water-enclosing gas" is depicted based on the vertical combination relationship of coal beds, sandstones, mudstones and limestones. The pattern of "mudstone-surrounding reservoir" refers to the hydrocarbon accumulation with tight rock beds (e.g. mudstones) to seal coal reservoirs. In the pattern of "sandstone-connecting coal", a gas reservoir is formed jointly by the coalbeds and its overlying sandstones when they are connected. In the pattern of "water-enclosing gas", gas is enriched and accumulated in coal beds under the effect of hydraulic sealing and plugging. Second, the effects of physical sealing, gas pressure sealing, water pressure sealing and adsorption sealing during the formation of CBM reservoirs are illustrated. And it is pointed out that the upper and lower limits of gas reservoir development are the efflorescent oxygenized zone and the in-situ stress transition zone, respectively. And third, the gas reservoir classification scheme with structural, lithologic, hydrodynamic and compound traps as the leading factors is developed, and various CBM reservoirs are dissected, including anticline, fault, syncline, stratigraphy–lithology, hydraulic sealing and hydraulic assistance CBM gas reservoirs.

**Keywords:** Ordos Basin; Eastern margin; Coalbed methane; CBM accumulation mechanism; Type of gas reservoir; Trap; Gas sealing; Efflorescent oxygenized zone; In-situ stress transition zone

基金项目: 国土资源部公益性行业科研专项(编号: 201311015-01)。

作者简介: 李勇, 1988年生, 讲师, 博士; 主要从事非常规油气地质方面的教学和科研工作。地址:(100083)北京市海淀区学院路丁11号中国矿业大学(北京)地球科学与测绘工程学院。ORCID: 0000-0001-8859-156X。E-mail: liyong@cumb.edu.cn

天然气藏分类的国标 (GB/T 26979—2011) 中, 以圈闭类型、储层特征等单因素和多因素组合为划分指标, 定义了常规气藏、凝析气藏和非常规气藏的分类标准。其中, 按照圈闭类型 (构造、岩性、地层和裂缝气藏) 定义的气藏组合是最为常见的勘探分类标准, 其划分依据主要考虑储集体的几何形态、储渗特征、流体性质和分布等, 反映了气藏的形成机制和分布规律<sup>[1]</sup>。煤层气藏与常规气藏存在天然的不同, 主要体现在圈闭界限是否明确、范围是否稳定以及有无统一的气水界面与压力系统等<sup>[2]</sup>。随着煤层气勘探开发的深入, 如何提高煤层气单井产量、寻找高产目标层位成为煤层气产业关注的重点。同时煤系非常规天然气也在近年实现突破<sup>[3-4]</sup>, 如何定义和归纳赋存状态多样化的煤层气藏, 以指导煤层气有利目标优选显得愈发重要。为此, 笔者在论述目前常见煤层气藏类型划分方案的基础上, 结合鄂尔多斯盆地东缘煤层气勘探开发实例, 并与国外典型盆地进行类比, 以期提出一个符合国内外煤层气勘探开发规律、具有普适意义的分类标准。

## 1 国外典型煤层气富集高产模式

美国埋深 1 200 m 以浅的煤层气资源量约为  $11 \times 10^{12} \text{ m}^3$ , 84% 左右的资源量分布在西部的落基山脉, 主要发育在中—新生代含煤盆地中, 东部的阿巴拉契亚和中部的石炭纪含煤盆地贡献了约 16% 的煤层气资源量<sup>[3]</sup>。在其煤层气勘探开发过程中, 以圣胡安等盆地的煤层气生成、运移和富集成藏理论为基础, 提出了“排水—降压—解吸—扩散—渗流”为主体的煤层气产出过程, 并得到了广泛认可。经

过开发实践的不断反馈和理论修正, 总结了落基山造山带高产走廊的富集成藏理论, 建立了以双孔双渗、低渗极限控制、中煤级煤生储与成藏优势、开发过程中多井干扰等为核心的煤层气勘探开发基础理论体系<sup>[5]</sup>。此外, “生物型或次生煤层气成藏”的理论也被提出<sup>[6]</sup>, 并在粉河盆地的煤层气勘探开发中得到验证。回顾全球煤层气盆地的资源开发情况, 可概括出 3 种相对独立的煤层气富集和开发模式 (表 1), 并可从有利构造位置、煤阶、煤层厚度、含气量、气体成因、煤层气赋存方式和煤层气井的产气量和产水量上进行系统对比。

## 2 煤层气藏划分方案研究进展

目前国内外的煤层气勘探开发, 主要从构造发育、沉积和煤层形态、煤层含气量、储层渗透性、煤变质程度和水动力条件考虑煤层气成藏<sup>[7-8]</sup>。许多学者进行了煤层气藏划分<sup>[9-22]</sup>, 主要包含 2 种思路: ①以压力为主线<sup>[10-11, 23]</sup>; ②将压力和构造相结合<sup>[14]</sup>, 并将煤层气藏定义为“依靠压力作用, 以吸附作用为主, 具有相近地质条件、含气特征的煤层中富集成含气层, 若干相近的含气层构成煤层气藏”<sup>[24-25]</sup>。

煤层气藏划分方案主要有: ①依据煤层气的吸附状态, 划分为自生自储吸附型、自生自储游离型和内生外储型<sup>[18]</sup>; ②依据煤阶, 分为未熟低煤阶、成熟低煤阶 ( $0.5\% < R_{o, \max} < 0.7\%$ )、中煤阶 ( $0.7\% < R_{o, \max} < 2\%$ ) 和高煤阶 ( $R_{o, \max} > 2\%$ ) 煤层气藏; ③依据煤层气成因, 划分为生物成因、热成因和无机成因; ④结合地下水动力条件和边界, 分为水动力封闭和自封闭型 2 大类, 并将水动力封闭型进一

表 1 不同盆地煤层气典型富集成藏模式分类表

对比项目	成藏模式		
	水动力封闭超压有利富集成藏	多煤层连续型模糊圈闭富集成藏	褶皱断裂区高渗高产成藏
典型盆地	圣胡安	粉河、阿尔伯塔、尤因塔	阿巴拉契亚、黑勇士、鲍恩
分布位置	盆地斜坡和中心均有分布	盆地斜坡连续分布	盆地范围内均见分布
煤阶	中低煤阶	中低煤阶	中高煤阶
煤层厚度	较厚	单层薄, 层数多	煤层较厚
含气量	高	较低	较高
气体成因	热成因气和部分次生生物成因气	热成因气和较多的次生生物成因气	热成因气、生物成因气
气体赋存方式	吸附气	吸附气, 但有一定数量的游离气	吸附气为主, 可见游离气
有利构造	缓坡单斜为主	单斜为主	半地堑最为有利
开采范围	较大面积连片	较大面积连片	变化较大
产气量	高	较高	较高
产水量	较高	较高	高产气井大多产水量较高

步划分为水动力封堵和水动力驱动型<sup>[26]</sup>；⑤根据气体饱和度，分为欠饱和、饱和及过饱和煤层气藏<sup>[27]</sup>。在成藏机理和成藏过程方面，林晓英<sup>[17]</sup>首次区分了6类煤层气藏边界，包括经济、水动力、风氧化带、物性、断层和岩性边界；界定了煤层气藏的研究方

法，刻画了静态和动态特征；孙平提出了“关键时刻”的概念；宋岩等<sup>[27]</sup>强调煤层气藏在后期均经历了晚期抬升，认为后期保存条件是煤层气成藏的关键，并在2013年提出了含气量和渗透率耦合作用控制的中高煤阶煤层气优势富集模式<sup>[28]</sup>（图1）。

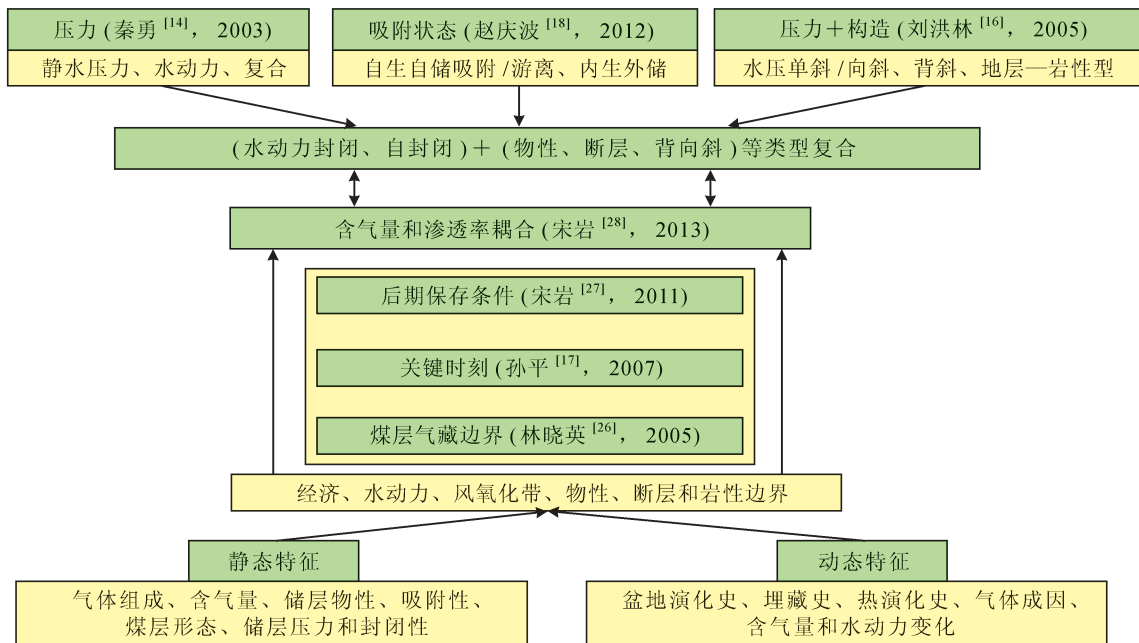


图 1 煤层气藏类型划分研究主线图

### 3 煤层气藏封闭机理

前述煤层气藏划分方案，一般将压力和构造类型结合，进行了不同于常规油气的圈闭类型划分。在煤层气勘探开发中，经常强调煤系非常规油气连续型聚集的特点<sup>[4]</sup>。在煤层气实际勘探中，低产井甚至干井的普遍存在，大幅制约了煤层气产能突破，亟需对优势煤层气藏的划分方案和成藏机理进行界定。煤层的直接上覆盖层发育有泥岩、砂岩和石灰岩等，均可形成良好的封闭条件。据此学者提出了橡皮袋封存机理和煤层上覆地层有效厚度的概念，认为一级封闭是对整个含煤岩系的封闭，二级封闭是对煤层和顶底板的封闭，三级封闭是直接顶底板对煤岩的封闭<sup>[29]</sup>。

一般认为泥岩具有良好的封闭性，其结构致密，气体分子难以突破孔喉压力而在煤层气中富集，形成封闭性气藏。当煤层的直接顶板泥岩发育裂隙的时候，也会因上覆岩层的封闭而形成气体聚集。对以泥岩不是直接顶板的煤储层来说，上部地层中的厚层泥岩还是会以封隔层的形式封闭煤层临近的砂岩等气体储集场所。综上，煤系可见三级封闭条件：

①煤层本身的吸附封闭；②受上覆砂岩中一定的气体含量影响，形成气压封闭；③砂岩之上致密泥岩的岩性封闭。籍此，存在3个层次上的气藏组合，即自生自储的煤层主体气藏，上部砂岩的辅助气藏，和在顶部良好封闭条件下，煤层内气体向下运移保存，储存在下部砂岩层的潜在气藏，定义为“砂通煤”的成藏模式（图2中）。针对太原组常见的上部石灰岩、下部泥岩的封闭模式，其上部的石灰岩层会在水文条件的辅助下形成较好的封闭条件，同时地层中的泥岩也会在一定程度上成为潜在页岩气藏，归纳为“水包气”的封闭成藏模式（图2下）。考虑到泥岩在整体地层中的封闭作用，还是起到了“泥裹藏”的保存作用，在整个地质演化时期，保存条件是决定现今煤层气富集成藏的主要因素（图2上）。

### 4 煤层气富集高产规律解剖

常规油气藏圈闭按成因分类可划分为构造、地层、岩性、水动力和复合圈闭，在此基础上划分气藏类型，借鉴该思路，解剖了鄂尔多斯盆地东缘煤层气富集高产的相关规律性。

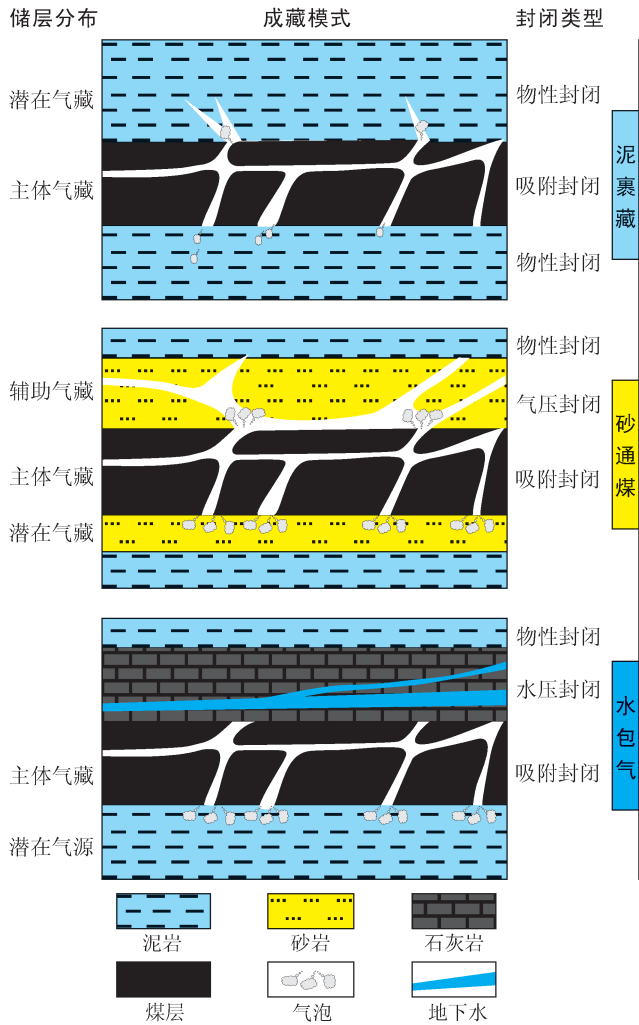


图 2 “泥裹藏、砂通煤、水包气”煤层气富集模式图

### 4.1 构造主导型

盆地东缘在大型单斜构造的基础上，发育轻微的北东向或北北东向断层，断层发育相对少且规模小。其中在中部的晋西挠折带上发育保德—兴县背斜

区、临县—柳林背斜区、永和—石楼背斜区以及蒲县—吉县背斜区，控制着中北部的煤层气地质条件。在南部的渭北挠折带主要作用于韩城地区，总体构造形态为倾向北西的具波状起伏的缓倾大型单斜构造，并交替发育背向斜构造<sup>[30]</sup>。

#### 4.1.1 背斜的影响

在构造作用下，地层产生褶皱弯曲，发育向四周倾伏的背斜，即可形成背斜圈闭，背斜油气藏即由油气在背斜圈闭中富集而形成。在东缘的勘探开发中，也发现了背斜区煤层气井易于高产的规律。东缘北部的保德区块整体为一西倾的单斜构造，但北部为西倾的鼻状构造，主力煤层埋深 400 ~ 1 200 m，煤层厚度介于 1.19 ~ 20.21 m，渗透率介于 0.4 ~ 12.0 mD，含气量介于 4 ~ 9 m<sup>3</sup>/t。目前产气量大于 2 000 m<sup>3</sup>/d 的煤层气井主要集中在北部的杨家湾地区，其中位于鼻状构造轴部的 BD-1 井，日产气量可达 6 000 m<sup>3</sup>，远高于位于鼻状构造翼部的 BD-4 井，后者日产气量仅为 1 000 m<sup>3</sup><sup>[31]</sup>。

#### 4.1.2 断层的影响

正断层或拉张性走滑断层一般都是张性断层，成为气体运移散失的通道。同时邻近断层面的区域一般储层压力较低，煤层气易于发生解吸，导致含气量降低。正断层对含气量起到破坏作用的例子比较典型的是延川南和韩城地区。以延川南地区为例，地震测线 NW470 经过了区块内的 5 条断层，在区块中部为普遍含气量高值区，可达 12 m<sup>3</sup>/t，而正断层附近（F12—F14）则是含气量的低值区，仅为 8 m<sup>3</sup>/t。在正断层规模更大的 F10 和 F9 附近，含气量仅为 2 m<sup>3</sup>/t 左右，其中 F10 断层面的开放性较强，气体散失明显（图 3）。

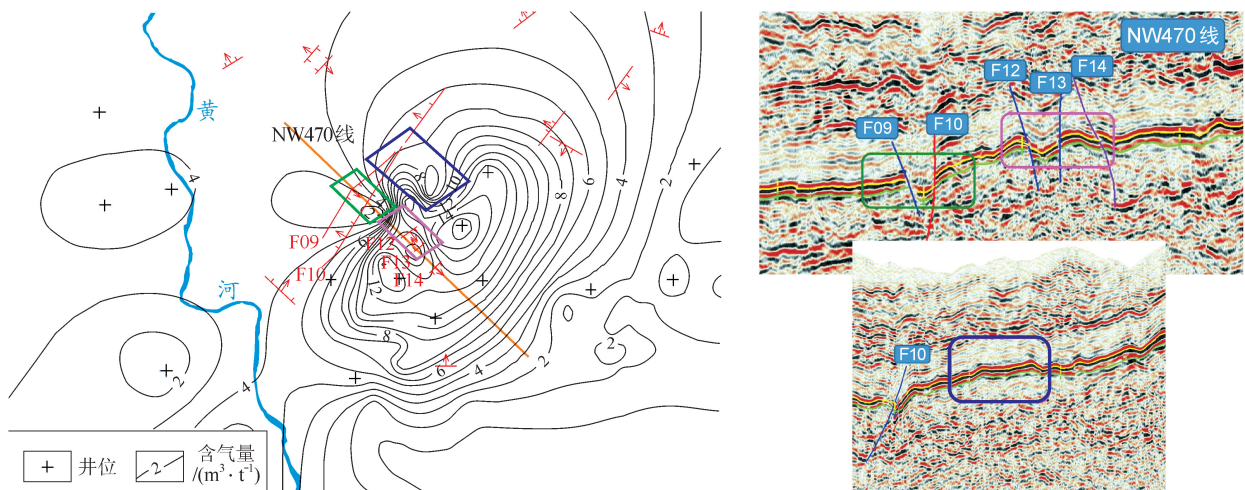


图 3 含气量与断层发育情况对比图（延川南地区 2 号煤层）

逆断层和压性走滑断层常常表现为压性或挤压性,地层封闭性相对较好,气体可以较好地保存。靠近断层面的应力相对集中,储层压力相应增大,气体吸附量也进一步增加,而且常常伴生大量挤压褶皱构造,形成利于煤层气富集的构造。东缘范围内的典型区块为大宁—吉县区块,其4+5号煤层含气量与构造关系表明,在午城—窑渠一带发育走向NE的逆断层和褶皱带,其含气量可超过 $20\text{ m}^3/\text{t}$ ,明显较区内其他区域高,是煤层气富集保存的有利区。

#### 4.1.3 向斜的影响

向斜核部一般受挤压应力影响,地层压力较高,同时向斜通常处于地下水的滞流区,有利于形成水力封堵型煤层气藏<sup>[24]</sup>。韩城北部4+5号煤层甲烷含量分布显示,向斜轴部最有利于煤层气富集,其次为缓倾斜带、背斜轴部和边浅部陡倾斜带。可见向斜构造部位煤层埋深相对较大,处于应力挤压状态,张性、张剪性断裂不发育,封闭条件好,有利于煤层气的储集和保存。值得注意的是,这与在背斜位置常见高产煤层气井并不矛盾,如果上覆地层具有良好的封盖性,背斜和向斜均可以储存大量气体,其中向斜在承压水的作用下利于煤层气的吸附储存,而背斜则有利于游离气的保存。这也是为何背斜部位煤层气井容易快速形成高产的原因之一。

### 4.2 地层—岩性主导型

地层圈闭通常是由油气储层纵向上沉积连续性发生中断而形成的,一般与地层的不整合有关。岩性圈闭通常发生于沉积或成岩—后生作用过程中,因地层岩性或物性改变而形成。岩性圈闭一般具有下列典型特征:①油气储集体尖灭或者穿插在生油岩层,地层的储盖组合条件好,油气源充足;②圈闭的形成时间早,利于形成油气聚集;③成因上受控于沉积体系和古地形,以群组形式出现。在煤层中,由于煤层在整体上是连贯的储集体,煤层气主要以吸附态的形式存在。但是在煤层气的勘探开发过程中,风氧化边界是重要的考虑因素,决定了煤层气资源的可采最低限度。

鄂尔多斯盆地东缘整体为一西倾的单斜,在单斜中部,下部煤层气向上解吸扩散,受中上部的岩性变化、水动力封堵等影响,会在中部形成气体富集区。气体在沿煤层运移过程中,当煤层上部发育泥岩、泥灰岩和致密灰岩时会形成封闭条件,即地层岩性和沉积层面的转变,为煤层气提供了良好的赋存条件。当其上部为砂岩或石灰岩时,部分气体可能会扩散到上

部,进而形成一定的岩性储集体,这已在部分地区的煤层气勘探中得到验证。如韩城WL2-015井射开煤层顶板3m厚的砂岩,日产气 $2\,400\text{ m}^3$ ;山西沁水煤层气田也发现游离气藏显示,在砂岩、石灰岩共解释气层43层156m,含气面积 $320\text{ km}^2$ ,预测储量 $251\times 10^8\text{ m}^3$ ,晋试79井试气,日产气 $4\,000\text{ m}^3$ <sup>[4]</sup>。相关案例可见韩城南部龙亭构造带的煤层气富集区<sup>[28]</sup>。

### 4.3 水动力主导型

常规油气中的水动力圈闭是指单独由水动力封闭,或与非渗透性岩层联合封闭而形成的聚油气圈闭,常见于地层产状轻微变化的挠曲带或构造鼻、单斜储集层中的岩性不均一和厚度变化带,还有地层不整合附近。水力运移逸散、水力封闭与水力封堵作用均可见于煤层气藏中。根据地层水的流动状态,一般的地下水动力系统常被划分为供水区、强交替区、弱交替区、滞缓区、滞留区和泄水区6大类。总体上,滞缓区和滞留区被认为最有利于煤层气保存。对于中、高煤阶的煤层而言,滞流区是煤层气富集成藏的有利区域,但是低煤阶则主要发育在缓流区。径流区和泄水区会导致气体的运移散失,不利于气藏的形成。

#### 4.3.1 中高煤阶的水力封堵作用

东缘中部三交、柳林地区构造简单,断层发育少,位于盆地边缘,埋深较浅,介于 $300\sim 1\,100\text{ m}$ ,渗透率介于 $0.01\sim 4.8\text{ mD}$ ,含气量介于 $5.8\sim 16.2\text{ m}^3/\text{t}$ 。以柳林地区为例,在构造上是一个NE—SW向倾伏的单斜构造,煤层埋深逐渐增大;地下水顺地层倾向,自北东向南西流动,除东北部局部地区处于补给区、径流区,大部分区域属于弱径流—滞留区,含气量总体较高。区内产气效果较好的煤层气井多数位于埋深小于 $700\text{ m}$ 的东部地区,东南部的某井组位于单斜构造上倾方向的高部位,排采仅 $200\text{ d}$ 左右,单井最高产气量即可达 $3\,600\text{ m}^3/\text{d}$ ,而西部埋深较大且处于构造低部位的井,产气效果较差。

该区太原组和山西组煤层气藏可被划分为气压封闭式和水力封闭式,煤层气井产出水化学特征、煤层顶板的流体包裹体特征和不同层位的产水状况均表明太原组自煤层形成到现今,一直与地表水保持一定的沟通关系,呈现水动力封闭和封堵的状态<sup>[22]</sup>。

#### 4.3.2 低煤阶弱径流区富集

准格尔区块在东缘的最北部,走向近南北,是一倾向西的单斜,具波状起伏。含煤段地层厚度较小,煤层形成之后遭受的埋藏深度浅,在三叠纪后基本上

没有发生大幅度的构造沉降。虽然煤层经历的演化时间较长，但煤层一直赋存于较浅部位，变质程度低，主要为长焰煤。在煤层埋深普遍超过 860 m 的区域，处在甲烷风化带以下，加上水动力作用增强，水力封堵使气体聚集在煤层中，形成水压单斜型煤层气成藏模式（图 4）。

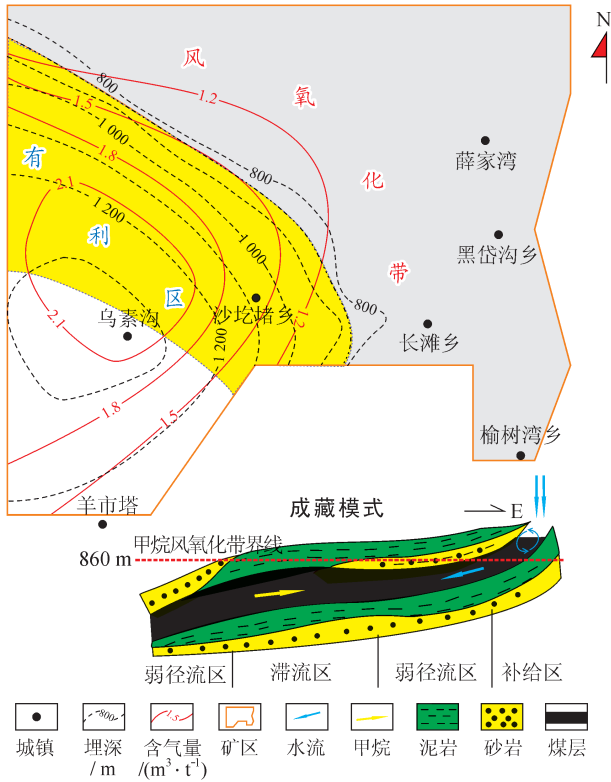


图 4 准格尔地区煤层气成藏示意图

在该地区，水动力发挥了 2 个方面的作用：①水动力封堵作用，阻止气体的向上运移，在单斜中部

形成煤层气富集区带；②提供了次生生物气形成的水文环境，也已由甲烷碳同位素测试结果证明。尽管准格尔地区降水量少，但是在地下维持生物活动对地表水补给的需求量也不大，尤其是在该区煤层埋深已达 860 m 的地区。该地区的煤层气富集成藏规律与美国圣胡安地区的煤层气富集成藏具有一定的可比性，该盆地也是在北部发生降水补给，携带产甲烷菌向盆地方向运移，产生次生生物气，并进一步由水动力封堵，形成煤层气富集区。

#### 4.4 复合型煤层气藏

前面论述了构造、地层一岩性和水动力条件在煤层气富集成藏中的作用，但是大多数适宜于开发的煤层气藏并非由单一因素控制。在常规油气藏中，当多种因素对储油气圈闭共同作用，导致复合圈闭，其中聚集了油气的称为复合油气藏。在煤层气的富集成藏中，也大多由多个因素控制。

大宁—吉县的地层剖面图形象地揭示了煤层气富集受构造、水文和地层的综合控制作用（图 5）。地表水向深部含水层补给，由于上部山西组煤层（5 号）顶底板岩性致密，孔隙度和渗透率低，地下水径流过程中 5 号煤层受到的影响较小。下部太原组 8 号煤层顶板石灰岩发育溶洞、溶孔，并且裂缝、裂隙较发育，容易受构造等影响而破碎，地下水容易注入或渗透。因此，8 号煤层含水性也较强，水动力活跃程度强于 5 号煤，产水量比 5 号煤大。同时山西组 5 号煤水样矿化度明显高于太原组 8 号煤，单排采 5 号煤层的井产水量较低，平均为 2.4 m<sup>3</sup>/d，而 8 号煤层无论是单排还是合排，产液量均较大，最高可达

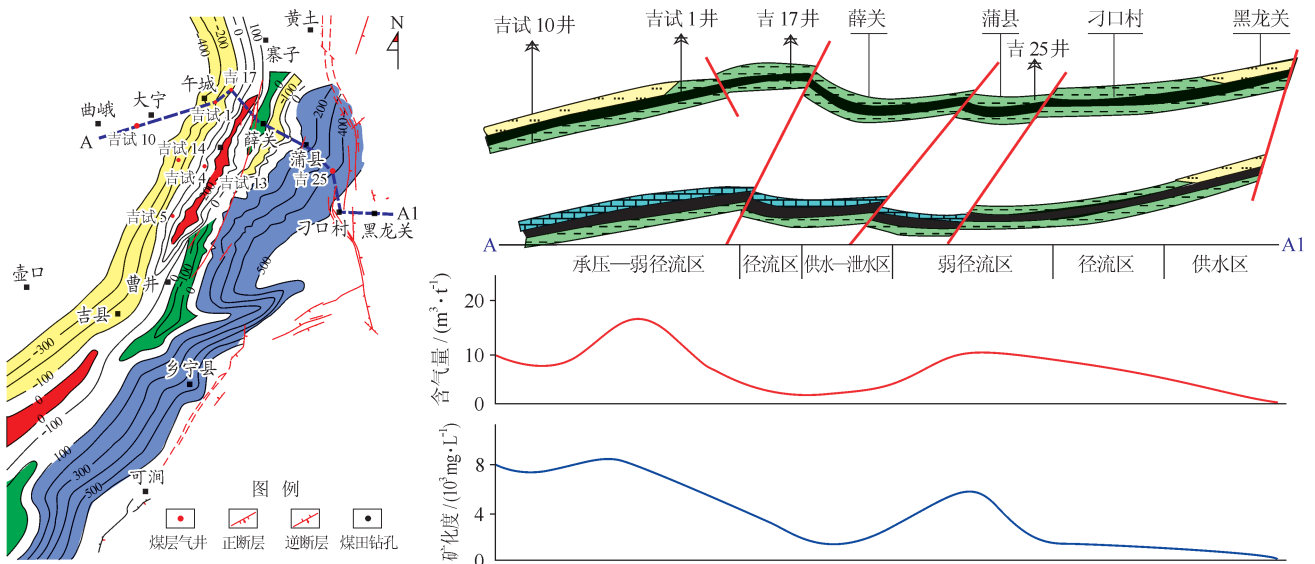


图 5 大宁—吉县地区构造—水动力对煤层气藏的控制作用示意图

到 60 m<sup>3</sup>/d, 平均为 16.7 m<sup>3</sup>/d, 印证了 8 号煤层的水动力条件强于 5 号煤层。在构造角度上, 吉 17 井附近断层发育, 水动力活跃, 煤层的含气量大幅降低, 而位于单斜缓坡上的吉试 1 井和 10 井则呈现了较高的含气量, 利于煤层气开发。

### 5 气藏类型划分

前述的顶底板岩性封闭机理, 包括物性封闭、气压封闭、水压封闭和吸附封闭, 其中吸附封闭是煤岩自身的性质, 决定了煤层气藏储气能力的高低。对比常规油气圈闭的定义——“储集层被联合封闭而形成的能聚集和保存油气的场所”, 将煤层气圈闭定义为“含煤地层沉积以后一直处于相对封闭且利于气体聚集的场所”, 主要包含如下 3 个要素: ①“含煤地层”, 指高含煤系数的地层, 涵盖煤层中间的薄砂体或者上下砂体, 被良好的盖层和遮挡层封闭, 具有统一的压力系统; ②“一直处于相对封闭”, 是指在其地质演化过程中, 最浅的埋藏时期没有经过风化或者大规模的气体逸散, 构造发育相对简单, 没有被大规模切割破坏; ③“利于气体聚集”, 是指在浮力、重力和压力的作用下易于气体运移聚集的煤岩层段, 可以在多种构造类型的地层中发育。

在定义的圈闭类型中, 物性封闭受毛细管力作用控制, 由煤储层上覆岩层的最大吼道与煤层的最小孔隙之间的毛细管压差来封闭煤层气。气压封闭是在气体较为充足的条件, 形成具有相对较高压力的封闭层, 使煤层气以吸附状态富集, 减缓和阻挡气体的逸散。吸附封闭对应着常规意义上的烃浓度封闭, 主要是由于煤储层中较高的气体浓度阻止了甲烷分子的扩散, 上限即为风氧化带。图 6 解析了不同封闭机理和成藏规律对应的煤层气藏, 其中吸附封闭作用于和伴生于所有的煤层气藏, 在某些情况下也可以相对不依赖于其他类型的封闭而存在, 在巨厚煤层中形成煤层气富集成藏。物性和气压封闭主要作用于构造和岩性煤层气藏, 气压和水压封闭则共同作用于水动力煤层气藏。在不同地带这几类成

藏模式的叠加组合构成了复合型煤层气藏, 其中埋深的最浅处即为煤层气风氧化带边界, 最深处为地应力转换边界, 当地层进入高度挤压, 再加上高温引起的吸附负效应和煤岩物理性质的改变, 已经不利于煤层气的开发。与煤层气开发的埋深上限一样, 这一下限在不同盆地和地区存在较大差异。下部边界为当前技术条件下的煤层气开发边界, 受深部地应力状态转换、深部煤层吸附能力地温场负效应和深部温压下煤岩物理性质特殊性综合控制<sup>[15]</sup>, 在当前常规开发技术条件下, 以最小水平主应力显著增加而引发的渗透率下降为边界。

### 6 结论

1) 在系统整理国内外煤层气富集成藏研究的基础上, 结合鄂尔多斯盆地东缘煤层气勘探开发的规律认识, 归纳了物性封闭、气压封闭、水压封闭和吸附封闭在煤层气藏形成中的作用, 定义了气藏开发的上下限分别为风氧化带和地应力转折带。在气藏类型上, 提出了以构造、岩性和水动力封闭分别为主导的气藏类型划分, 并实例解剖了不同气藏类型。

2) 煤层气藏的封闭类型主要呈现了 3 种样式: ①“泥裹藏”, 即以泥岩等致密岩层封闭煤储层成藏; ②“砂通煤”, 即煤层上覆砂岩与煤层连通而富含较高浓度的气体, 与煤层统一形成气藏, 常见于陆相地层; ③“水包气”, 即水力封闭和水力封堵作用下, 气体在煤层中富集而成藏, 常见于海陆过渡相地层中。

3) 定义了吸附、气压、水压和岩性封闭的概念, 并在此基础上解剖了不同的煤层气富集高产类型。其中吸附封闭是煤岩自身的性质, 其决定了煤层气藏储气能力的高低; 气压封闭则形成于甲烷浓度较高的储层, 含气量相对较高, 气体与上覆地层有所沟通, 但逸散缓慢或者没有, 一般发育于煤层上覆砂岩的地层中; 水压封闭主要是由水力作用阻止了气体的扩散和运移; 岩性封闭是指在毛细管力作用控制下的气藏封闭。其中吸附封闭主要发生在煤层内部, 气压封闭则发生在煤层和其他封闭阻挡层之间; 物性和气压封闭作用于岩性和构造煤层气藏; 气压和水压封闭共同作用于水动力煤层气藏。在不同地带这几类控藏因素叠加组合构成复合型煤层气藏, 其中成藏的最浅处即为煤层气风氧化带边界, 最深处为地应力转换边界, 随埋深加大, 地层进入高度挤压且温度升高, 进入气藏开发下限。此外, 在水动力主导的煤层气藏中, 中高煤阶以水力封闭和封堵作用为主,

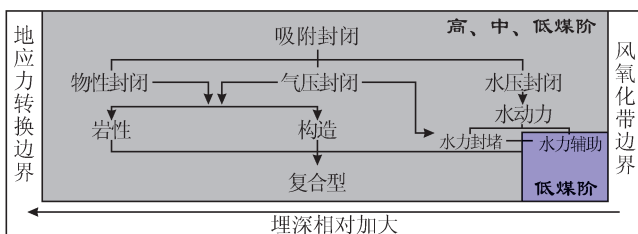


图 6 不同封闭机理对应的成藏类型示意图

低煤阶以弱缓流区的次生生物气辅助作用为主。

### 参 考 文 献

- [1] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 天然气藏分类: GB/T 26979—2011[S]. 北京: 中国标准出版社, 2012.  
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China & Standardization Administration of the People's Republic of China. The classification of natural gas pool: GB/T 26979-2011[S]. Beijing: Standards Press of China, 2012.
- [2] 邹才能, 朱如凯, 吴松涛, 杨智, 陶士振, 袁选俊, 等. 常规与非常规油气聚集类型、特征、机理及展望——以中国致密油和致密气为例[J]. 石油学报, 2012, 33(2): 173-187.  
Zou Caineng, Zhu Rukai, Wu Songtao, Yang Zhi, Tao Shizhen, Yuan Xuanjun, et al. Types, characteristics, genesis and prospects of conventional and unconventional hydrocarbon accumulations: Taking tight oil and tight gas in China as an instance[J]. Acta Petrolei Sinica, 2012, 33(2): 173-187.
- [3] Flores RM. Coal and coalbed gas: Fueling the future[M]. Amsterdam: Elsevier Science, 2013.
- [4] 赵庆波, 孙粉锦, 李五忠. 煤层气勘探开发地质理论与实践[M]. 北京: 石油工业出版社, 2011.  
Zhao Qingbo, Sun Fenjin & Li Wuzhong. Theory and practise on coalbed methane exploration and development[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2011.
- [5] Flores RM. Coalbed methane: From hazard to resource[J]. International Journal of Coal Geology, 1998, 35(1/4): 3-26.
- [6] Scott AR, Kaiser WR & Ayers Jr WB. Thermogenic and secondary biogenic gases, San Juan Basin, Colorado and New Mexico—Implications for coalbed gas producibility[J]. AAPG Bulletin, 1994, 78(8): 1186-1209.
- [7] Scott AR. Hydrogeologic factors affecting gas content distribution in coal beds[J]. International Journal of Coal Geology, 2002, 50(1/4): 363-387.
- [8] Su Xianbo, Zhang Liping & Zhang Ruilin. The abnormal pressure regime of the Pennsylvanian No. 8 coalbed methane reservoir in Liulin-Wupu District, eastern Ordos Basin, China[J]. International Journal of Coal Geology, 2003, 53(4): 227-239.
- [9] 钱凯, 赵庆波, 汪泽成. 煤层甲烷气勘探开发理论与实验测试技术[M]. 北京: 石油工业出版社, 1996.  
Qian Kai, Zhao Qingbo & Wang Zecheng. Coalbed methane development and laboratory experiment technologies[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1996.
- [10] 袁政文. 煤层气藏类型及富集高产因素[J]. 断块油气田, 1997, 4(2): 9-12.  
Yuan Zhengwen. On types of coalbed methane reservoirs and the factors of rich and high output[J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 1997, 4(2): 9-12.
- [11] 王生维, 段连秀, 陈钟惠, 张明, 张素新. 煤层气藏的封闭及其研究意义——华北石炭—二叠系煤层气藏封闭特征浅析[J]. 地球科学——中国地质大学学报, 1999, 24(1): 49-53.  
Wang Shengwei, Duan Lianxiu, Chen Zhonghui, Zhang Ming & Zhang Suxin. Research into coalbed methane pool trap and its significance: An example of Carboniferous-Permian coalbed methane pool trap in North China[J]. Earth Science—Journal of China University of Geosciences, 1999, 24(1): 49-53.
- [12] 宋岩, 赵孟军, 柳少波, 王红岩, 陈振宏. 构造演化对煤层气富集程度的影响[J]. 科学通报, 2005, 50(增刊 1): 1-5.  
Song Yan, Zhao Mengjun, Liu Shaobo, Wang Hongyan & Chen Zhenhong. The influence of tectonic evolution on the accumulation and enrichment of coalbed methane (CBM)[J]. Chinese Science Bulletin, 2005, 50(S1): 1-5.
- [13] 宋岩, 柳少波, 赵孟军, 苏现波, 李贵中, 洪峰, 等. 煤层气藏边界类型、成藏主控因素及富集区预测[J]. 天然气工业, 2009, 29(10): 5-9.  
Song Yan, Liu Shaobo, Zhao Mengjun, Su Xianbo, Li Guizhong, Hong Feng, et al. Coalbed gas reservoirs: Boundary types, main controlling factors of gas pooling, and forecast of gas-rich areas[J]. Natural Gas Industry, 2009, 29(10): 5-9.
- [14] 秦勇. 中国煤层气地质研究进展与述评[J]. 高校地质学报, 2003, 9(3): 339-358.  
Qin Yong. Advances and reviews on research of coalbed gas geology in China[J]. Geological Journal of China Universities, 2003, 9(3): 339-358.
- [15] 秦勇. 中国煤层气成藏作用研究进展与述评[J]. 高校地质学报, 2012, 18(3): 405-418.  
Qin Yong. Advances and reviews on coalbed methane reservoir formation in China[J]. Geological Journal of China Universities, 2012, 18(3): 405-418.
- [16] 刘洪林, 李景明, 王红岩, 赵庆波. 内蒙古东部低煤阶含煤盆地群的煤层气勘探前景[J]. 天然气地球科学, 2005, 16(6): 771-775.  
Liu Honglin, Li Jingming, Wang Hongyan & Zhao Qingbo. Exploring foreground of low rank coal basins in eastern Inner Mongolia of China[J]. Natural Gas Geoscience, 2005, 16(6): 771-775.
- [17] 孙平. 煤层气成藏条件与成藏过程分析[D]. 成都: 成都理工大学, 2007.  
Sun Ping. Analysis on formation conditions and process of coal bed methane reservoirs[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2007.
- [18] 赵庆波, 孔祥文, 赵奇. 煤层气成藏条件及开采特征[J]. 石油与天然气地质, 2012, 33(4): 552-560.  
Zhao Qingbo, Kong Xiangwen & Zhao Qi. Coalbed methane accumulation conditions and production characteristics[J]. Oil & Gas Geology, 2012, 33(4): 552-560.
- [19] 申建. 论深部煤层气成藏效应[J]. 煤炭学报, 2011, 36(9): 1599-1600.  
Shen Jian. CBM-reservoiring effect in deep strata[J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(9): 1599-1600.
- [20] 吴财芳, 秦勇, 傅雪海, 曾勇. 山西沁水盆地煤层气成藏的微观动力能条件研究[J]. 现代地质, 2005, 19(3): 449-457.  
Wu Caifang, Qin Yong, Fu Xuehai & Zeng Yong. Microcosmic dynamical energies of coalbed gas reservoir formation of Qinshui



Basin, Shanxi Province[J]. *Geoscience*, 2005, 19(3): 449-457.

[21] 吴财芳, 秦勇, 周龙刚. 沁水盆地南部煤层气藏的有效运移系统[J]. *中国科学(地球科学)*, 2014, 44(12): 2645-2651.  
Wu Caifang, Qin Yong & Zhou Longgang. Effective migration system of coalbed methane reservoirs in the southern Qinshui Basin[J]. *Scientia Sinica Terrae*, 2014, 44(12): 2645-2651.

[22] Li Yong, Tang Dazhen, Xu Hao, Elsworth D & Meng Yanjun. Geological and hydrological controls on water coproduced with coalbed methane in Liulin, eastern Ordos Basin, China[J]. *AAPG Bulletin*, 2015, 99(2): 207-229.

[23] 吴鲜, 廖冲, 叶玉娟, 竦莲. 水文地质条件对煤层气富集的影响[J]. *重庆科技学院学报(自然科学版)*, 2011, 13(5): 78-81.  
Wu Xian, Liao Chong, Ye Yujuan & Dou Lian. The influence of hydrogeological conditions on the enrichment of coalbed methane[J]. *Journal of Chongqing University of Science and Technology (Natural Sciences Edition)*, 2011, 13(5): 78-81.

[24] 李贵中, 王红岩, 吴立新, 刘洪林. 煤层气向斜控气论[J]. *天然气工业*, 2005, 25(1): 26-28.  
Li Guizhong, Wang Hongyan, Wu Lixin & Liu Honglin. Theory of syncline-controlled coalbed methane[J]. *Natural Gas Industry*, 2005, 25(1): 26-28.

[25] 赵庆波, 陈刚, 李贵中. 中国煤层气富集高产规律、开采特点及勘探开发适用技术[J]. *天然气工业*, 2009, 29(9): 13-19.  
Zhao Qingbo, Chen Gang & Li Guizhong. The regular patterns of highly-produced CBM, its production performance and the progress of prospecting technologies in China[J]. *Natural Gas Industry*, 2009, 29(9): 13-19.

[26] 林晓英. 煤层气藏成藏机理[D]. 郑州: 河南理工大学, 2005.  
Lin Xiaoying. The formation mechanism of coalbed methane reservoirs[D]. Zhengzhou: Henan Polytechnic University, 2005.

[27] 宋岩, 柳少波, 赵孟军, 洪峰. 煤层气与常规天然气成藏机理的差异性[J]. *天然气工业*, 2011, 31(12): 47-53.

Song Yan, Liu Shaobo, Zhao Mengjun & Hong Feng. Difference of gas pooling mechanism between coalbed methane gas and conventional natural gas[J]. *Natural Gas Industry*, 2011, 31(12): 47-53.

[28] 宋岩, 柳少波, 琚宜文, 洪峰, 姜林, 马行陟, 等. 含气量和渗透率耦合作用对高丰度煤层气富集区的控制[J]. *石油学报*, 2013, 34(3): 417-426.  
Song Yan, Liu Shaobo, Ju Yiwen, Hong Feng, Jiang Lin, Ma Xingzhi, et al. Coupling between gas content and permeability controlling enrichment zones of high abundance coal bed methane[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2013, 34(3): 417-426.

[29] 刘成林, 汪泽成, 冉启贵, 吴世祥. 煤层气藏保存条件评价[J]. *天然气勘探与开发*, 1998, 21(1): 1-5.  
Liu Chenglin, Wang Zecheng, Ran Qigui & Wu Shixiang. Evaluation of preservation condition of CBM reservoir[J]. *Natural Gas Exploration and Development*, 1998, 21(1): 1-5.

[30] 李勇, 汤达祯, 许浩, 孟尚志, 刘一楠, 张文忠, 等. 鄂尔多斯盆地东缘煤层气构造控气特征[J]. *煤炭科学技术*, 2014, 42(6): 113-117.  
Li Yong, Tang Dazhen, Xu Hao, Meng Shangzhi, Liu Yinna, Zhang Wenzhong, et al. Characteristics of structural controlled coalbed methane in east margin of Ordos Basin[J]. *Coal Science and Technology*, 2014, 42(6): 113-117.

[31] Chen Yue, Tang Dazhen, Xu Hao, Li Yong & Meng Yanjun. Structural controls on coalbed methane accumulation and high production models in the eastern margin of Ordos Basin, China[J]. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2015, 23: 524-537.

(修改回稿日期 2017-06-22 编辑 罗冬梅)



## 黑龙江天然气推广进入快车道

近日, 中国石油天然气销售北方公司黑龙江分公司与一重新能源发展集团有限公司战略合作协议签署仪式在黑龙江省大庆市举行。前者承担着黑龙江省区域内油田天然气和引进俄罗斯天然气的销售及市场开发工作, 后者是中国第一重型机械集团公司新能源业务板块的主体。经友好协商, 双方一致同意建立全面战略合作伙伴关系。

根据协议, 双方将在天然气贸易、非管网储运装备、锅炉煤改气、油气合建站、天然气非管网运输、农机双燃料加装、村村普及天然气、集装箱冰柜冷链运输等八大领域开展合作。此次战略合作协议的签署, 是天然气业务发展合作模式的有益尝试, 标志着黑龙江省天然气推广利用进入了快车道, 也将更好地“气化”龙江大地、造福龙江百姓。

(天工 摘编自中国石油新闻中心)