

# 北美页岩气资源形成的地质条件<sup>\*</sup>

李新景<sup>1</sup> 吕宗刚<sup>2</sup> 董大忠<sup>1</sup> 程克明<sup>1</sup>

1. 中国石油勘探开发研究院 2. 中国石油西南油气田公司蜀南气矿

李新景等. 北美页岩气资源形成的地质条件. 天然气工业, 2009, 29(5): 27-32.

**摘 要** Fort Worth 盆地 Barnett 页岩气藏的成功开发, 极大地推动了全球页岩气勘探开发进程。分析北美地区已开发页岩气聚集区带油气地质特征, 了解区域地质背景, 有助于建立页岩气富集模式、寻找有效页岩气储层、确定“甜点”边界、提高采收率等。研究表明, 北美克拉通盆地、前陆盆地侏罗系、泥盆系—密西西比系富集多种成因、多种成熟度页岩气资源, 页岩产层通常是含油气系统中主力烃源岩, 尤以受上升洋流影响、具有低能还原环境的海进体系域黑色页岩(腐泥型—混合型干酪根)为佳。沉积环境和热成熟度是页岩气富集区带主要控制因素, 裂缝网络发育程度决定能否获取丰厚的商业价值。因此, 古气候、古地理条件以及沉积环境、构造作用等因素的综合, 使得北美页岩气资源形成并不断得到有效开发。

**关键词** 北美 页岩气 地质特征 储集层 有机质丰度 烃源岩 富集区

DOI: 10.3787/j.issn.1000-0976.2009.05.006

统计表明, 高产且经济效益好的页岩气储层往往分布面积广、埋深适中、厚度大(大于 30 m)、有机质丰度高( $TOC > 2\%$ )、成熟程度适中( $R_o$  介于  $1.1\% \sim 2.5\%$ )、含气量较高( $3 \sim 10 \text{ m}^3/\text{t}$ )、产水量较少、黏土含量中等(小于  $40\%$ )和脆性较高(即低泊松比、高杨氏弹性模量)以及围岩条件有利于水力压裂控制。它们大多为含油气系统中主力烃源岩, 尤以受上升洋流影响、倾油混合型干酪根为主的海进体系域黑色页岩为佳, 且现今处于大量生气阶段或充注过程中, 既保存了较高的残余有机质丰度, 储集大量吸附气, 又能新增一定孔隙度, 容纳足够数量的游离气, 有助于提高基质系统的渗透性, 使生产井保持较高产气速度, 规模化开发生产的经济效益达到最大化<sup>[1]</sup>。

## 1 北美含气页岩区域地质背景

### 1.1 北美地台构造背景

北美地台有 101 个盆地, 是世界著名产油气区, 油气田数量大约 35 000 个, 其中大油气田约占世界的  $1/5 \sim 1/4$ 。从寒武系至新近系均有油气发现, 产层及其分布与北美大陆地质背景密切相关。已发现页岩气盆地主要分布在被大陆边缘演化为前陆盆地的区域和古生界克拉通地台区, 常规油气资源丰富。

例如东部 Appalachian 造山带在加里东运动时期形成, 呈北北东方向, 造山带西侧为 Appalachian 前陆盆地, 下古生代地层发育, 是美国最早开发油气地区; 西部 Rocky 造山带是北美洲 Cordillera 褶皱带的一部分, 由造山带、前缘冲断带和东部前陆盆地组成, 前陆盆地和冲断带内蕴藏着大量的油气资源。Marathon-Quachita 逆冲断皱带位于美国南部, 其北侧中央稳定地台为火山岩和变质岩结晶基底, 沉积盖层主要为古生界, 部分地区发育有中生界。在一些由宽缓的隆起分隔的构造不太复杂的盆地中, 油气资源丰富, 主要产自古生代较老岩层。地台西部和南部边缘, 由于多期构造运动影响, 构造变形强烈, 形成的盆地较地台内部沉陷更深, 构造更复杂, 但往往高产油气, 如 Permian 盆地和 Anadarko 盆地。东南部是墨西哥湾沿岸坳陷带和大西洋坳陷带。墨西哥湾平原和墨西哥湾的中生代和新生代沉积岩层披覆于 Marathon-Quachita 冲断层带的南侧, 形成向墨西哥湾楔状加厚的地层。这套地层中古近系、新近系最发育, 中、新生代岩层已产生了大量的油气, 是美国产油气的最富地区之一。

### 1.2 含气页岩区域沉积环境

北美含气页岩富集带具有多种成熟程度、天然

<sup>\*</sup> 本文受到中国石油天然气集团公司科技攻关项目(编号: 2008B-0502)的资助。

**作者简介:** 李新景, 女, 博士; 现主要从事石油地质综合研究、页岩气资源评价与选区工作。地址: (100083) 北京市学院路 20 号 910 信箱中国石油勘探开发研究院资源规划所。电话: (010) 62098666。E-mail: xinjingli@petrochina.com.cn

气成因和岩相,沉积环境复杂,例如 Texas 州西部 Bossier 含气页岩储层为页岩、砂岩和粉砂岩混合岩性<sup>[2]</sup>,东部含油气盆地如 Appalachian 盆地、墨西哥湾地区 Fort Worth 盆地、加拿大西部沉积盆地以黑色页岩为主。富含有机质黑色页岩可以沉积于多种多样环境、位置中,它与自生黄铁矿的出现,宏观上通常代表水流微弱或停滞的缺氧还原环境。遍及北美各盆地古生界富有机质海相黑色页岩,其沉积环境的推断与解释仍然众说纷纭。

加拿大西部沉积盆地(WCSB)泥盆系—密西西比系 Bakken 和 Exshaw 段黑色页岩来源于深水(大于 200 m)半远洋泥,为海进体系域密集段,沉积速率较低,但是水深、可容纳空间的变化导致 Williston 克拉通盆地、Prophet 海槽、北美克拉通西部边缘地区相对海平面升降幅度、储层厚度以及体系域空间叠置关系的差异,经历后期不同强度热演化史,烃源岩生烃潜力、页岩储层分布呈现出不同特征。

Algeo(2008)<sup>[3]</sup>提出 Appalachian 盆地中部泥盆系—密西西比系页岩是前陆盆地局限深水沉积产物。泥盆系 Ohio 页岩沉积期(时间跨度约 15 Ma),构造运动导致相对海平面下降,局限程度增强,晚泥盆纪—早石炭纪之交最大,使 Appalachian 海处于耗氧状态,而且稳定的分层水体确保生物有机质得以保存,TOC 较高,形成 New York 几百米厚黑色页岩,Kentucky 东北部减薄为 50~90 m<sup>[4]</sup>。

Fort Worth 盆地 Barnett 组富有机质黑色页岩主要由含钙硅质页岩(硅质主要为黏土级—粉砂级结晶质石英,属生物成因)和含黏土灰质泥岩构成,夹薄层生物骨架残骸,陆源碎屑物较少,沉积于深水(120~215 m)前陆盆地,具有低于风暴浪基面和低氧带(OMZ)的缺氧—厌氧特征,与开放海沟通有限。沉积物主要为半远洋软泥(来自浅水陆棚)和生物骨架残骸,沉积营力基本上通过浊流、泥石流、密度流等悬浮机制完成,属于静水深斜坡—盆地相<sup>[5]</sup>。这种环境生物产率高,有机质保存好,TOC 平均值达 4.5%,各岩相段显示高伽马值(大于 100 API,部分高达 400 API 以上),低声波时差、高电阻特征也进一步印证了优质烃源岩生烃潜力。同样,WCSB 水深 200 m 以内缓坡下侏罗统 Gordondale 组 C 段富有机质泥岩,陆源碎屑供应有限、放射性高(75~250 API)、U 含量高,硅质生物体(如放射虫)埋藏造成储层硅质含量高,且与 TOC 高低密切相关<sup>[6]</sup>。Arkoma 盆地 Woodford 页岩亦具有类似特征。上述实例说明北美大多数黑色页岩沉积之初海平面位

置较高,富含养分的上升洋流夹带着来自深海动植物残骸的充足养分,使生物产率高,形成较强还原环境,而赤道附近海域发育的放射虫,为细粒沉积岩创造了良好力学性质,有利于裂缝网络发育。

对于美国中陆地区诸多盆地,沉积之后的 Quachita 造山运动引发区域性地质热事件,使源岩多数达到生气门限,产生大量天然气,形成页岩气富集区带。如 Arkoma 盆地 Woodford 页岩形成于被动大陆边缘静海沉积体系中,具备良好生物产率和有机质保存能力,后期前陆盆地形成与构造演化控制了烃源岩成熟阶段。

总之,北美地台东、西、北三面环绕的 Acadian、Antler、Ellesmere 活动造山带使地台内部坳陷和隆起发生幕式调整,相对海平面升降、陆源沉积物供应量发生波动,泥/页岩厚度、分布、生烃潜力受到相对海平面变化制约。根据岩石矿物组成特征、测井响应、地球化学参数以及全球海平面升降曲线推断,北美地台高质量倾油海相烃源岩(腐泥型和混合型)多发育在海进体系域时期/高水位体系域初期,这里陆源有机质最少,倾油性组分比例高,而且强烈受地古地理、古气候影响,发育硅质生物体,有条件形成脆性页岩储层。目的层上/下发育的致密碳酸盐岩,一方面阻止了油气垂向运移,使之在黑色页岩层系中得以保存,一方面也有助于大型水力压裂的裂缝控制。

## 2 页岩气富集区带地质特征

### 2.1 页岩有机质丰度特征

根据页岩气定义,高有机质丰度既是成烃的物质基础,也是页岩气吸附的重要载体<sup>[7]</sup>,而有机质丰度高低主要受沉积环境和热演化程度控制。

沉积之初有机生物产率、随后的有机物质保存以及陆源碎屑的供给都对页岩有机质丰度产生重要影响。温度、盐度、水体深度适宜的古地理环境,水生生物发育相对繁盛,有机质生产效率高,可提供丰富的物质基础,还原、缺氧条件有利于有机质保存。相反高能、富氧环境不利于有机质保存,陆源碎屑供应量增多,有机质遭到稀释,含量相对减少。例如沉积于深水环境中的 New Albany 褐色—黑色富含有机质页岩,某些层段有机质高达 20%,表现出高放射性,甚至高出背景值 200~400 API。

经历沉积埋藏,有机物逐步进入成岩作用、深成热解作用及后成作用阶段,成熟度加深,生成大量油气。按照 Tissot 划分方案: $R_o < 0.5\%$  成岩作用阶段,生油岩处于未成熟或低成熟作用阶段; $R_o$  介于

0.5%~1.3% 为深成热解阶段,处于生油窗内; $R_o$  介于 1.3%~2.0% 深成热解作用阶段的湿气和凝析油带; $R_o>2\%$  后成作用阶段,处于干气带<sup>[8]</sup>。当然对于不同干酪根类型进入湿气阶段的界限,有一定差异,一般处于  $R_o$  为 1.2%~1.4% 范围内。例如 Fort Worth 盆地 Barnett 页岩气开发区位于成熟度高于 1.1% 的气窗内,结合围岩分布情况,又进一步划分了两个评价单元<sup>[9]</sup>。这些地区气油比高,有利于页岩气扩散和渗流。因此对于热成因含气页岩,进入生气窗是页岩气富集必要条件,勘探开发目标应首选油气比高值区(图 1)。

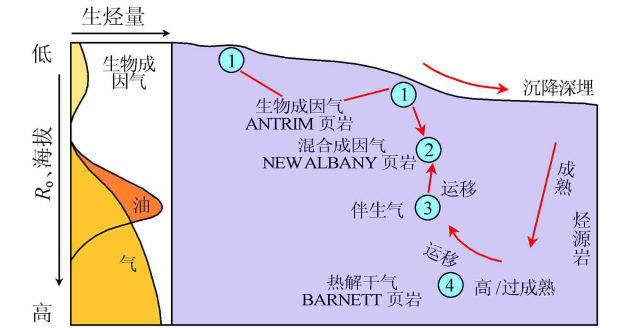


图 1 页岩气生成与富集简化模型图

需要注意:初始有机质丰度较高的烃源岩,随着热演化程度加深,生烃量增加,残余有机碳丰度、氢指数、有机质类型呈现降低、变差趋势,如  $T_{max}$  (最大热解温度)432℃、等效成熟度 0.62%,Barnett 页岩演化至  $T_{max}$  为 470℃,等效成熟度为 1.3% 时,TOC 数值可降低 36% (图 2),对于高成熟和/或过成熟烃源岩,负面影响则更大,所以简单套用残余有机碳丰度、氢指数或干酪根类型判断页岩生气能力的高低可能有失偏颇。但储集能力而言,残余有机质丰度常可表征含气量大小,特别是当两者呈现正相关情况下。北美页岩气勘探目标绝大多数选择 TOC 含量大于 2%,甚至 4% 以上,与此有关联。因此资源潜力评价过程中应综合考量有机质丰度指标,既要

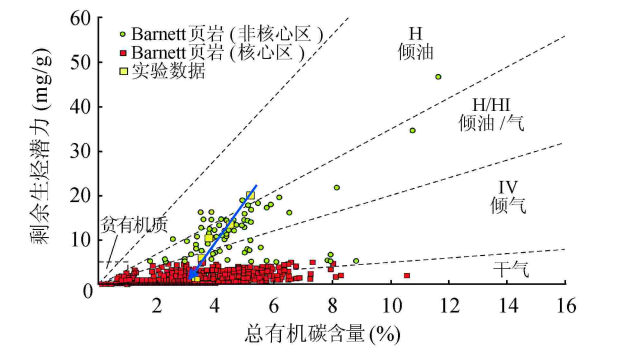


图 2 Barnett 页岩有机质演化路径图(Jarvie,2008 年)

重视源岩原始有机质丰度与生烃潜力,又要关注页岩储层残余总有机碳含量的作用。

2.2 页岩储层特征

一般认为泥页岩主要由黏土矿物组成,其次为碎屑矿物如石英、长石和少量自生非黏土矿物,包括铁、锰、铝的氧化物和氢氧化物、碳酸盐、硫酸盐、硫化物、硅质矿物及一些磷酸盐等。实际上其矿物组成与含量变化很大。富含  $SiO_2$  (有时高达 85% 以上)者为硅质泥页岩;含大量碳化有机质者为碳质泥页岩;含较多分散有机质和硫化铁者为黑色泥页岩。

从石油地质观点看,烃源岩经过一系列地质条件作用生成大量天然气,并在持续压力作用下大量排出,向渗透性地层如砂岩和碳酸盐岩运移、聚集成构造或岩性气藏,而残留在细粒沉积岩层系中的部分形成页岩气资源<sup>[10]</sup>。其中很大部分吸附在有机质和黏土矿物表面,与煤层气相似,另一部分以游离状态储集在基质孔隙和裂缝孔隙中,与常规储层相似,二者构成比例取决于多种地质作用过程,商业开发前后的一系列研究和实践也因此变得更复杂。

尽管泥页岩孔隙度(基质孔隙度几乎都小于  $0.01\times 10^{-3}\mu m^2$ )、渗透率极低,但一定范围内二者依然显示出正相关性,仍需重视储层基质孔隙度和裂缝评价。孔隙度相对较高的区带,页岩气资源潜力大,经济可采性高,特别是吸附气含量非常低的情况下<sup>[11]</sup>;裂缝则沟通致密储层孔隙,增强岩层渗透能力,扩大泄油面积,提高采收率。

裂缝发育受内、外因控制。外因主要与生烃过程、地层孔隙压力、各向异性的水平压力、断层与褶皱等构造作用相关,内因主要取决于页岩矿物学特征。图 3 展示了已开发页岩的两个分布区域:Bossier 页岩大都位于石英、长石和黄铁矿含量低于 40%,碳酸盐岩含量大于 25%,黏土矿物低于 50%

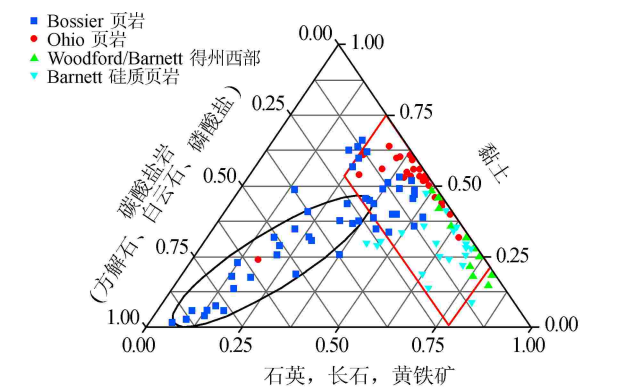


图 3 页岩储层岩矿组成三角图

(改自 Halliburton 公司 Hyden,2009 年)

区间;Ohio、Woodford/Barnett 页岩位于碳酸盐含量低于 25%,石英、长石和黄铁矿含量 20%~80%,黏土含量在 20%~80% 区间,其中 Barnett 硅质页岩黏土矿物通常小于 50%,石英等含量超过 40%,Arkoma 盆地 Woodford 页岩与其相近。即页岩膨胀性黏土矿物含量较少,硅质、碳酸盐岩等矿物较多时(Fort Worth 盆地 Barnett 页岩典型值为 40%~60%),岩石脆性与造缝能力强,裂缝网络容易产生。

美国东部页岩气项目开发早期,主要勘探目标是天然裂缝相对发育区带,随着现代钻完井技术发展,人工压裂水平提高,加之 Barnett 页岩模式的成功运作,地质和工程专家认识到微裂缝/页岩造缝能力同等重要。当然,裂缝具有双重性,一方面改善储层渗透性,一方面可能导致页岩气逸散、水窜,选择何种类型作为勘探目标应视具体地质、工程条件而定。

总之,从油藏工程观点看,脆性矿物(如硅质、碳酸盐等)富集的泥页岩比主要由黏土矿物等构成的岩石更容易产生裂缝,而页岩层系中的粉砂岩、细砂岩或砂岩夹层、开启或未完全充填的天然裂缝也可提高储层渗透性,断层和裂缝带内渗透率性更强。成熟的黑色页岩层系中常发现裂缝性油气藏,如前苏联西西伯利亚上侏罗统 Bazhenov 页岩油藏、美国 Williston 盆地 Bakken 页岩油藏、北美泥盆系、石炭系、侏罗系以及白垩系裂缝性页岩气藏、我国渤海湾盆地、松辽盆地以及西部沉积盆地均发现裂缝性油气藏,就是这一原因<sup>[7]</sup>。

### 2.3 页岩气与常规油气藏之间的关系

页岩气生烃过程与常规油气并无区别,但储集方式、富集条件以及气藏宏观分布差异较大。从天然气赋存状态来看,页岩气包含了吸附气部分,并且不同地质条件下游离气、吸附气二者相对含量变化大,开采方案、生产曲线也呈现不同特征;从油气成藏动力条件以及宏观特征上看,常规油气运移过程中需要上倾方向存在与输导体系相关的构造高部位,离散分布的低势能区域是成藏有利目标,浮力是天然气运移的主要动力,天然气不断运聚,气水界面随之下移,所以下倾方向往往是水层,而连续式富集的页岩气鲜受水动力影响,多区域性分布于坳陷中<sup>[12]</sup>,如 Appalachian、Michigan 和 Illinois 盆地泥盆系含气页岩覆盖面积约 71 200 km<sup>2</sup>,属于自生自储岩性气藏,没有明显的气水界面。

从含油气系统观点看,含油气页岩往往是盆地内厚度大、分布广的区域主力烃源岩,与常规油气资

源具有成因关系,常规和非常规油气藏并存。如果盆地存在完整的烃源岩成熟路径,页岩油、气富集带均可形成,天然气经济可采性相对更高些。例如 Illinois 盆地 98% 的油气来源于 New Albany 黑色页岩,但仍有大量生物成因和热解成因天然气残留在页岩层系内(Blocher 下段、Clegg Creek 上段页岩),估计页岩气原始地质储量 $(2.4\sim 4.5)\times 10^{12}$  m<sup>3</sup>。

### 2.4 案例分析

#### 2.4.1 Michigan 盆地页岩气富集区带

Michigan 盆地属典型克拉通内盆地,近圆形,面积  $31.6\times 10^4$  km<sup>2</sup>。构造运动较弱,沉积层序以奥陶系、志留系和泥盆系等古生界为主,由周边向盆地中心埋深加大,北部上覆几千英尺厚的冰碛层<sup>[1]</sup>。盆地油气勘探始于 20 世纪 20 年代,发现密西西比系和泥盆系背斜油气藏,70 年代以志留系 Niagaran 宝塔礁为勘探目标,80 年代初期为深部奥陶系,中后期泥盆系 Antrim 页岩。即油气大部分产自古生界,主要包括密西西比系 Stray 砂岩,泥盆系 Berea 砂岩、泥盆系 Traverse 和 Dundee 石灰岩,志留系 Salina 和 Niagara 石灰岩以及奥陶系 Trenton 和 Black River 石灰岩等,上泥盆统 Antrim 裂缝性页岩也产天然气。烃源岩主要是密西西比系、泥盆系页岩和石灰岩,部分可能来自奥陶系。除了盆地西南角和北部边缘,Antrim 页岩覆盖了大多数区域。

Antrim 黑色页岩有机质丰度高,热成熟度  $R_o$  较低(0.4%~0.6%),未进入生油窗,产气区位于盆地北部 Michigan 湖和 Huron 湖之间高角度裂缝发育带,埋深 120~600 m,厚 36~180 m,页岩气以吸附气为主(70% 以上),含气量 1.415~2.83 m<sup>3</sup>/t,高低与有机碳含量呈现良好的正相关性。由于盆地西部和北部的冰碛层形成了区域的地形高点和水头,区域分布的两组正交高角度裂缝(北东向和北西向)为地层水提供了有利的储集空间和渗流通道,使流体沿边缘向盆地内部运移,而地层流体中的厌氧菌以有机质和储层中的油气为养分,并在代谢过程中生成 CH<sub>4</sub>、CO<sub>2</sub>,地层水氧同位素组成( $\delta D$ )、溶解无机碳同位素  $\delta^3 C_{DIC}$ 、 $\delta^8 O$ 、 $\delta^3 C_{CO_2}$  化学组成、地层水氯离子浓度(小于 4 mol)、淡水含量(大于 50%)、 $\delta^3 C_1$  与天然气组成等进一步证实盆地边缘 Antrim 页岩气属于生物成因气,是中—低盐度淡水中的微生物作用结果<sup>[13]</sup>。盆地方向热成因甲烷有所增加,但产量有限。

盆地北部页岩产区生产井 9 382 口,日产 1 042  $\times 10^4$  m<sup>3</sup>。1998 年产量高峰过后,气田年递减率 4%

~5%,单井9%,据此估计2030年累计产量约 $1\,246 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。虽然Antrim页岩气富集带规模有限,但埋藏较浅,钻井费用较低,且属于晚期成藏,现今仍处于持续充注阶段<sup>[14]</sup>,有利于实现经济可采,适于中小规模企业开发。

#### 2.4.2 Appalachian盆地页岩气富集区带

美国东部Appalachian盆地面积 $53.2 \times 10^4 \text{ km}^2$ ,包括New York西部、Pennsylvania、West Virginia、Ohio、Kentucky和Tennessee州等。东临Appalachian山脉,西濒中部平原,构造上属于Appalachian褶皱带的山前拗陷,伴随Laurentian古陆经历了由被动边缘型向前陆盆地的演化过程。盆地以前寒武纪结晶岩为基底,古生代沉积岩呈巨大的楔形体(最大厚度12 000 m)埋藏于不对称的、向东变深的前陆盆地中。寒武系和志留—密西西比系为碎屑岩夹碳酸盐岩,奥陶系为碳酸盐岩夹页岩,宾夕法尼亚系为碎屑岩夹石灰岩及煤层。总体上由富有机质泥页岩(主要为碳质页岩)、粉砂质页岩、粉砂岩、砂岩和碳酸盐岩等形成3~4个沉积旋回构成,每个旋回底部通常为富有机质页岩,上部为碳酸盐岩。泥盆系黑色页岩处于第3个旋回之中,分布于泥盆纪(距今380 Ma)Acadian造山运动下形成的碎屑岩楔形体内<sup>[15]</sup>。

盆地沉积剖面中页岩约占一半,泥盆系中、上部黑色页岩最为发育,超过240 m,是泥盆系—中上古生界含油气系统中常规油气和非常规油气的主力烃源岩。泥盆系—中上古生界含油气系统分布广泛,从东北部New York一直延伸到西南部的Tennessee,油气分布主要受岩性控制,构造影响其次。寒武系—宾夕法尼亚系均产油气,泥盆系特别是上泥盆统产油气最多,占盆地油气可采储量52%以上,岩性有砂岩、碳酸盐岩和裂缝性页岩,与源岩相邻的储集层发育常规油气藏。例如上泥盆统向东过渡为红色陆相沉积,向西为海相暗色泥岩,其间砂页岩互层成为常规油气聚集的有利地带,内部发育裂缝性黑色页岩气藏,位于Virginia西南、Kentucky东部、West Virginia西南、Ohio南部,面积约777 km<sup>2</sup>的Big Sandy气田Ohio组Huron段含气页岩就是其中之一。

Big Sandy气田于1918年发现,1921年开始生产泥盆系页岩气,至今很多井已生产40多年。高产井多沿北东方向分布,与高角度多组裂缝发育紧密相关,裂缝不发育地区往往低产。裂缝网络的形成主要受地质时期地壳应力作用强度和方向影响,尤

其是Rome断槽形成中伴生的断裂作用。West Virginia州Jackson县Cottageville气田研究揭示埋深1 127.8 m的Ohio组页岩Huron段,虽然裂缝局部充填白云石,但残余孔洞常具有连通性,渗透率较高。因此20世纪80年代以来的众多研究认为,这一地区页岩气产量主要控制因素是有机质含量、热成熟度、天然裂缝展布以及黑色页岩与灰色页岩空间分布关系。

Big Sandy气田是阿巴拉契盆地页岩气历史累计产量最高地区。绝大多数来自上泥盆系页岩气,现今储层还包括中泥盆统Marcellus页岩,上泥盆统Rhinstreet页岩、Cleveland页岩以及密西西比系Sunbury含气页岩,埋藏深度510~1 800 m,测井孔隙度1.5%~11%,平均4.4%<sup>[16]</sup>。1996年该区估算原始地质储量 $5\,660 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,可采储量 $962 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,剩余可采储量 $255 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,估计单井极限可采储量 $14 \times 10^4 \sim 2\,260 \times 10^4 \text{ m}^3$ ,平均 $250 \times 10^4 \text{ m}^3$ <sup>[17]</sup>。

与盆地西部浅层相比,中、东部地区埋藏深、热成熟度高,原油进入裂解成气阶段,黑色页岩比例、TOC含量和页岩储层产气能力均上升,如中泥盆系Marcellus页岩已成为Pennsylvania、New York州新的勘探目标,按照Barnett页岩开发模式,围岩发育Onondaga等致密灰岩无疑为应用水平井钻探、大规模水力压裂提供了天然屏障,与此同时Ohio组Huron页岩也进入新一轮开发,页岩气勘探开发在该盆地将再次繁荣。

### 3 结论

1)天然气成因确定是页岩气资源评价、勘探目标选择、开发方案制订的基础。盆地斜坡/中心,倾油有机质经历充分热降解或热裂解,热成因页岩气较发育;有机质成熟度较低、水动力条件优越的盆地边缘,生物成因气发育。同属上泥盆统—下密西西比统海相黑色页岩,Michigan盆地北部浅层低成熟的Antrim页岩气为生物成因,Appalachian盆地Ohio页岩、Fort Worth盆地Barnett页岩、Arkama盆地Woodford页岩气为热解成因,Illinois盆地New Albany页岩气为混合成因气。

2)北美页岩气勘探开发目标是成熟盆地含油气系统主力烃源岩。致密页岩分布范围广、有效厚度大、有机质丰富、含气量大、裂缝系统发育、原始地质储量丰厚,埋深和黏土含量相对较少的岩石类型有利于实施水力压裂,规模生产效果比较好。其中烃源岩有机质丰度和热裂解生烃潜力决定页岩气资源

富集程度,裂缝网络发育程度决定能否获取丰厚的商业价值。这些说明泥页岩不仅可以充当烃源岩、盖层,一定条件下还是重要的储层,形成资源庞大、现实的页岩气聚集区带。勘探开发目标首选沉积环境、地化、岩石学特征、保存、埋深等综合地质条件优越和经济可采价值高的区域。

3)广泛发育的北美克拉通盆地、前陆盆地的含气黑色页岩沉积于缺氧还原环境,多数层段陆源碎屑供应量较少,有机碳含量高且放射性强。古环境、古气候和古地理因素在区域内保持基本一致导致细粒沉积岩组合特征具有一定共性;盆地主要发展阶段的构造演化、水动力背景导致优质烃源岩形成不同成因、不同成熟程度页岩气。因此,倾油有机质沉积环境和热成熟度是页岩气富集带主要的区域控制因素。这一点与常规油气藏寻找高孔渗储层的思路有所区别。

4)细粒沉积岩层序地层划分、等时格架的建立尚需更多研究,利用地球化学实测数据标定沉积层序,对解释黑色页岩沉积环境、生烃潜力、空间分布、预测页岩气聚集带,评价页岩气资源具有指导意义。海进体系域多发育高质量倾油烃源岩,这与陆源碎屑少和低沉积率、高有机质产率有关。

### 参 考 文 献

- [1] JOHN B CURTIS. Fractured shale-gas systems [J]. AAPG, 2002, 86(11): 1921-1938.
- [2] DANIEL M JARVIE, RONALD J HILL, TIM E RUBLE, et al. Unconventional shale-gas systems: the Mississippian Barnett Shale of north-central Texas as one model for thermogenic shale-gas assessment [J]. AAPG, 2007, 91(4): 475-499.
- [3] THOMAS J ALGEO, BARRY MAYNARD J. Trace-metal covariation as a guide to water-mass conditions in ancient anoxic marine environments [J]. Geosphere, 2008, 5(4): 872-887.
- [4] AHMED CHAOUICHE. Petroleum system attributes of the Bossier Shale of East Texas and Barnett Shale of North-Central Texas; evolving ideas and their impact on shale and tight sand gas resource assessment [J]. Gulf Coast Association of Geological Societies Transactions, 2006, 56: 139-149.
- [5] ROBERT G LOUCKS, STEPHEN C RUPPEL. Mississippian Barnett Shale: Lithofacies and depositional setting of a deep-water shale-gas succession in the Fort Worth Basin, Texas [J]. AAPG, 2007, 91(4): 579-601.
- [6] DANIEL J K ROSS, MARC R BUSTIN. Characterizing

the shale gas resource potential of Devonian-Mississippian strata in the Western Canada sedimentary basin: application of an integrated formation evaluation [J]. AAPG, 2008, 92(1): 87-125.

- [7] 李新景, 胡素云, 程克明. 北美裂缝性页岩气勘探开发启示 [J]. 石油勘探与开发, 2007, 34(4): 392-400.
- [8] TISSOT B P, WELTE D H. 石油形成与分布 [M]. 徐永元, 徐谦, 郝石生, 译. 北京: 石油工业出版社, 1989.
- [9] MONTGOMERY SL, JARVIE DM, BOWKER KA, et al. Mississippian Barnett Shale, Fort Worth basin, north-central Texas: Gas-shale play with multi-trillion cubic foot potential [J]. AAPG, 2005, 89(2): 155-175.
- [10] 田文广, 姜振学, 庞雄奇, 等. 岩浆活动热模拟及其对烃源岩热演化作用模式研究 [J]. 西南石油学院学报, 2005, 27(1): 12-16.
- [11] DANIEL J K ROSS, MARC BUSTIN R. Characterizing the shale gas resource potential of Devonian-Mississippian strata in the Western Canada sedimentary basin: Application of an integrated formation evaluation [J]. AAPG, 2008, 92(1): 87-125.
- [12] JAMES W, SCHMOKER. Resource-assessment perspectives for unconventional gas systems [J]. AAPG, 2002, 86(11): 1993-1999.
- [13] JENNIFER C MCLINTOSH, LYNN M WALTER, ANNA M MARTINI. Extensive microbial modification of formation water geochemistry: Case study from a Mid-continent sedimentary basin [J]. Geological Society of America Bulletin, 2004, 116(5): 743-759.
- [14] MARTINI AM, WALTER LM, BUDAI JM, et al. Genetic and temporal relations between formation waters and biogenic methane: Upper Devonian Antrim Shale, Michigan basin [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1998, 62: 1699-1720.
- [15] JAMES W CASTLE. Recognition of facies, bounding surfaces, and stratigraphic patterns in foreland-ramp successions: an example from the upper Devonian, Appalachian Basin [J]. Journal of Sedimentary Research, 2000, 70(7): 896-912.
- [16] RAY BOSWELL. Play UD's: Upper Devonian black shales (in the atlas of major Appalachian gas plays) [M]. USA: West Virginia Geological and Economic Survey, 1996: 93-99.
- [17] ROBERT C MILICI. Assessment of Appalachian Basin oil and gas resources: Devonian shale-middle and Upper Paleozoic total petroleum system [EB/OL]. <http://pubs.usgs.gov/of/2004/1272/>.