

裂缝性页岩含气系统

John B. Curtis 著

李大荣 译
黎发文 校

【摘要】美国最初(1821年)的商业性天然气产量产于阿巴拉契亚盆地富含有机质的泥盆系页岩中。自70年代以来,了解有机页岩地层的地质和地球化学特征和提高天然气产能已先后取得数百万美元的研究价值。页岩含气系统实质上是连续的生物成因(占主导地位)、热成因或生物-热复合成因气藏,其特征表现为含气饱和度分布广、具有隐蔽圈闭机理、具有不同岩性的盖层和相对较短的运移距离。页岩气既可以游离气状态储藏在天然裂缝和粒间孔隙中,也可以气态形式吸附在干酪根和粘土颗粒表面或溶解在干酪根和沥青中。

美国现有5套商业性产气页岩,它们的5个关键参数变化极大,这5个关键参数是:热成熟度(用镜质体反射率表示)、吸附气馏分、储层厚度、总有机碳含量和天然气地质储量。另一方面,在基岩低渗透率页岩储层中,天然裂缝的发育程度是控制天然气产能的一个重要因素。迄今为止,仅在少数未实施增产措施的页岩井中获得商业产气量,这些井钻遇天然裂缝网络中。在大多数其它情况下,在成功的页岩气井中必需进行水力压裂。1999年总共生产了380 bcf页岩气,其中,产自密执安盆地泥盆系Antrim页岩和阿巴拉契亚盆地泥盆系俄亥俄页岩中的气约占84%。但是,产自后来相继投入勘探和开发的另外3套主要有机页岩的天然气年产量稳定增加,这3套有机页岩分别是伊利诺伊盆地泥盆系New Albany页岩、沃思堡盆地密西西比系Barnett页岩和圣胡安盆地白垩系Lewis页岩。

在已估算天然气储量的那些盆地中,页岩气的资源量为497~783 tcf。所估算的技术上可采的资源量(Lewis页岩除外)为31~76 tcf。在2套页岩中,Ohio页岩中的天然气资源量占有最大的份额。

【主题词】圣胡安盆地 低渗透率 天然气 裂缝 阿巴拉契亚盆地 美国

前言和系统定义

产气页岩出现在美国陆上古生代和中生代地层中。大多数属于非常规或连续性气藏,这些含气系统显示出潜力大、技术上可采的气资源丰富,但已获得的产气量和探明储量都比较小(图1)。图1中所描述的资源金字塔的概念首次在70年代后期用于分析低渗透储层中天然气藏。如果勘探和开发公司估算的天然气储量接近金字塔底部的天然气资源量,那么不断攀升的天然气价格、较低的开发成本和采用更先进的开采技术等综合因素则要求人们更经济地开采出天然气。开采资源金字塔内高一级别的天然气则要求人们充分认识到这种含油气系统的潜力。

自19世纪初期以来,美国已钻了28000多口页岩气井。据

目前所知,在美国以外,尚未报导产气页岩,其原因可能在于页岩气不具经济产量和气井成本偿还期长,而不是缺乏具潜在生产能力的页岩气系统。

这些细粒和富含粘土有机碳的岩石既是含油气系统的气源岩,又是含油气系统的储集岩。天然气具有热成因或生物成因,要么吸附于干酪根和粘土颗粒表面,或呈游离气储藏在裂缝和粒间孔隙中和以状态溶解在干酪根和沥青中。圈闭机理属于典型的隐蔽圈闭,其含气饱和度覆盖很大的地理范围。假定的盖层组成是变化的,其包括:膨润土(圣胡安盆地)、页岩(阿巴拉契亚和沃思堡盆地)、冰碛物(密执安盆地)和页岩/碳酸盐岩(伊利诺伊盆地)。

在页岩气储层中存在热成因气和生物成因气,但是,在密执安和伊利诺伊盆地的远景区内似乎生物成因气占主导地位。

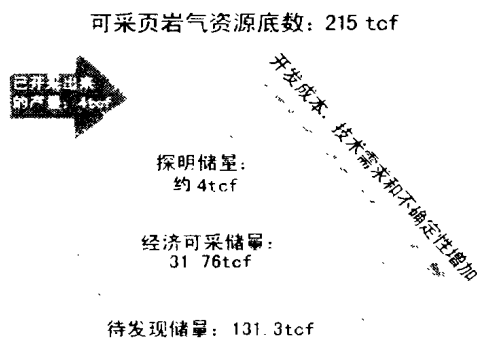


图1 描述页岩气总资源底数的资源金字塔

如果气井普遍地不能进行经济开采,那么就需要提高页岩气藏的原有基岩低渗透率($< 0.001\text{d}$)。完井作业应使用水力压裂技术,以便形成天然裂缝系统和产生新的裂缝。有不到10%的页岩气井在没有制定出储层增产措施的情况下就进行了完井。为了压裂这些地层,曾使用了硝化甘油炸药、推进剂和各种各样的水力压裂技术。

本文对美国5套主要页岩含气系统的特征进行了综述,特别是对页岩含气系统中的Antrim和俄亥俄页岩进行了重点介绍,这5套页岩是:(1)Antrim页岩;(2)俄亥俄页岩;(3)New Albany页岩;(4)Barnett页岩和(5)Lewis页岩。

历史回顾

早在1627-1669年,法国的勘测人员和传教士就对阿巴拉契亚盆地富含有机质的黑色页岩进行过描述。他们所提到的石油和天然气现在被认为来源于纽约西部的泥盆系页岩。1821年被公认为是美国年青的天然气工业的开端。第一气口井是在纽约Chautauga县泥盆系Dunkirk页岩中完井的。天然气用于Fredonia城市的照明。这种发现预计比在宾夕法尼亚石油小溪发现著名的德雷克油井早35年。Peebles(1980)对这段历史事件提供了如下资料:

在靠近Canadaway河流的地方,一群小孩意外的引燃了天然气气苗,从而使当地市民发现了这种“燃烧泉”的潜在价值。市民们钻了一口27 ft深的井并用小空心圆木管把天然气输送到附近的房子中用于照明。这些原始圆木管后来被3/4英寸的铅管所替代,这种铅管是由当地的军械工人William Hart制造出来的。William Hart把25 ft深处的天然气注入到一个倒置的装满水的大水槽中(称之为“贮气罐”),并从天然气发现处到Abel House(当地的一个小旅馆)铺设了管线,从而使天然气在当地用于照明。1825年12月,Fredonia市的新闻人物宣称:“我们在12月31日晚上亲眼看到了由贮气罐供给的天然气点燃的66个漂亮的煤气灯和150个照明灯。现在有充足的天然气供应给其它的贮气罐。”Fredonia的供气被称为“在世界上是前所未有的。”

19世纪70年代,页岩气开发沿西部扩展到伊利湖南岸和俄亥俄东北部。1863年在伊利诺伊盆地肯塔基西部泥盆系和密西西比系页岩中发现了天然气。到20世纪20年代,钻探页岩气已发展到弗吉尼亚西部、肯塔基和印第安纳。到1926年,肯塔基东部和弗吉尼亚西部的泥盆系页岩气田已成为世界

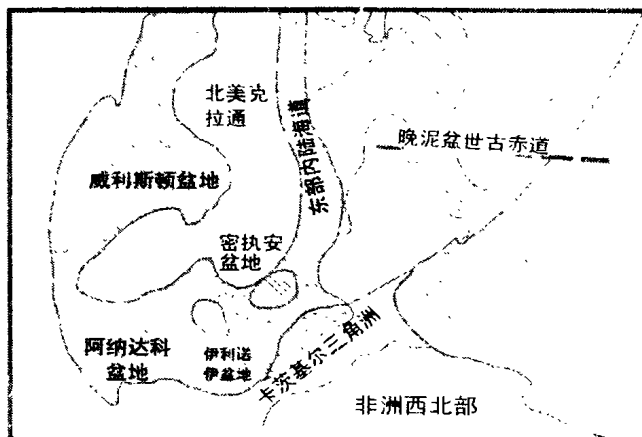


图2 重建的晚泥盆世古地理

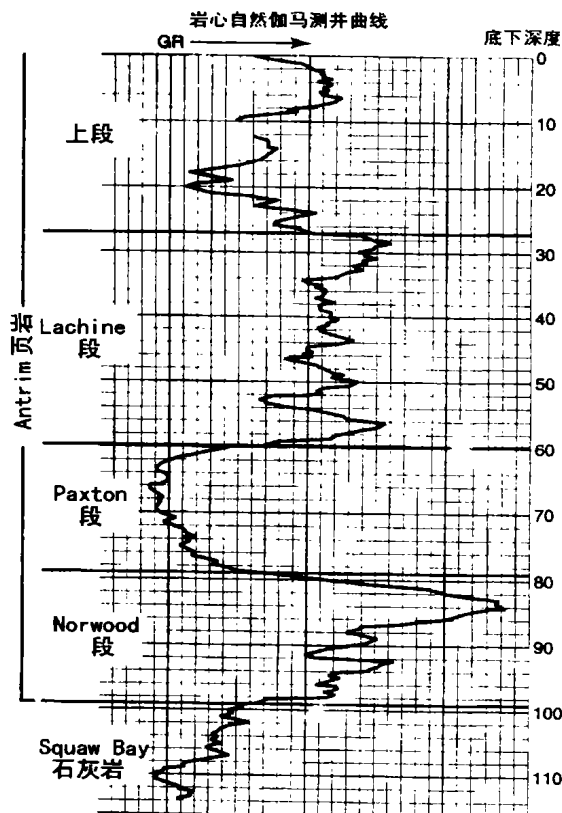


图3 密执安Alpena县Paxton采石场Antrim页岩自然伽马测井曲线

上最大的已知气田。

美国能源部东部天然气页岩研究项目始于1976年,作为地质、地球化学和石油工程研究的一系列研究项目重点在于研究增产措施。20世纪80年代和90年代初期,天然气研究院[GRI;现在称为天然气技术研究院(GTI)]基于这项研究,对美国泥盆系和密西西比系页岩中天然气潜力进行了比较完整的评价并提高了天然气产量。

20世纪80年代,沃思堡盆地密西西比系

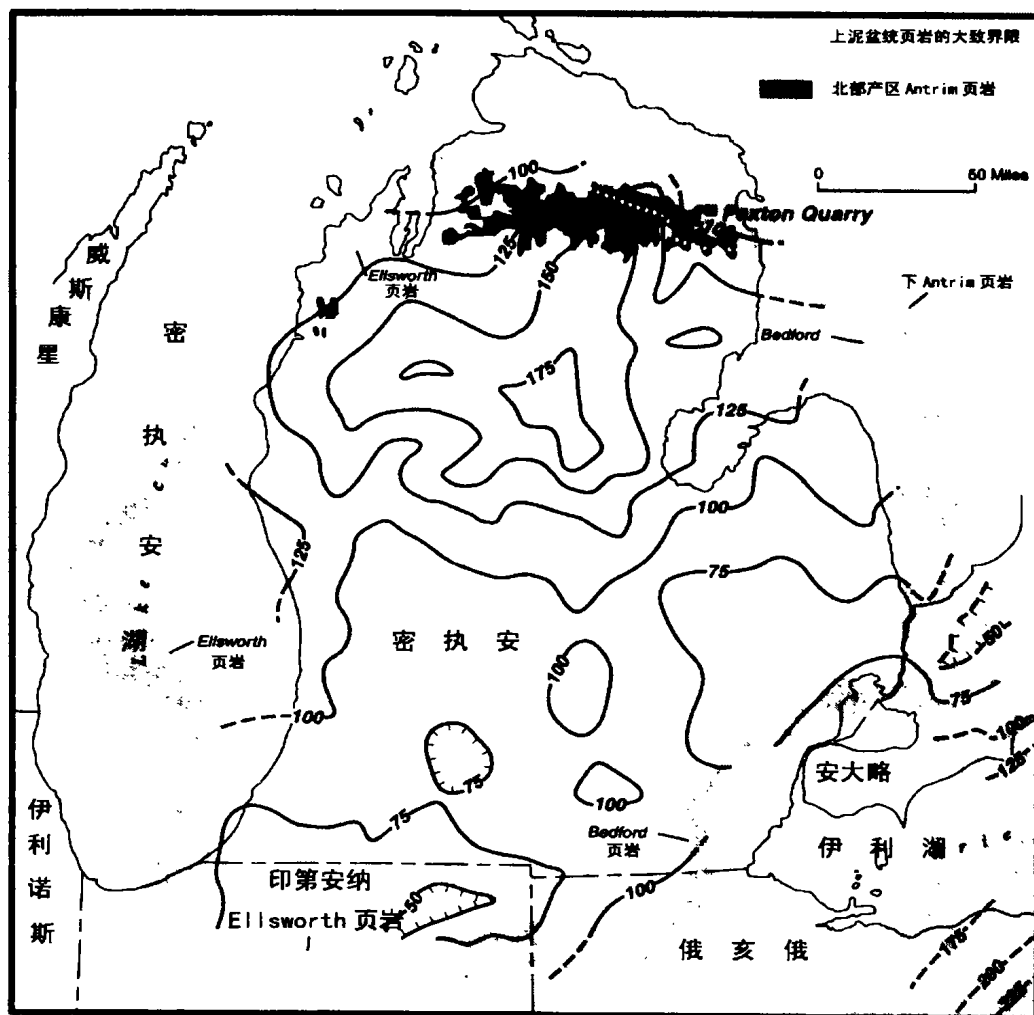


图4 Antrim 下段页岩等厚图

Barnett 页岩和圣胡安盆地白垩系 Lewis 页岩是商业性产气区,到了 20 世纪 90 年代,密执安盆地泥盆系 Antrim 页岩已成为了美国最主要的天然气远景区。1979 年 ~ 1999 年,页岩气产量增加 7 倍以上(俄亥俄)。1998 年,页岩气产量占到了美国干气总产量的 1.6%,页岩气储量占到了探明天然气储量的 2.3%。

地质结构

密执安盆地的 Antrim 页岩属于大范围富含有机质的页岩沉积系统,该系统大面积地覆盖了北美古大陆的中-下泥盆统(图 2)。克拉通内的密执安盆地是东部内陆海道中的一个沉积中心。盆地沉积物厚度超过 5182 m,其中包括 274 m 厚的 Antrim 页岩和伴生的泥盆纪-密西西比纪岩石。靠近现代构造盆地中心的 Antrim 页岩底部大约低于海平面 732 m。

Antrim 地层相对简单(图 3)。Antrim 下段页岩的 Lachine 和 Norwood 小层在钻井剖面中是很完整的,Antrim 下段页岩等厚图显示 Antrim 页岩下段的总计厚度接近 49 m(图 4)。Lachine 和 Norwood 小层的总有机碳含量(TOC)按重量计算占 0.5%~24%。这些黑色页岩富含二氧化碳(微晶石英和风成粉砂占 20%~41%)并含有大量的白云岩和石灰岩结核、碳酸盐岩、硫化物和硫酸盐胶结物。Antrim 下段中间的 Paxton 小层是灰质泥岩和灰色页岩的混合物,其 TOC 为 0.3%~8%,二氧化硅占 7%~30%。根据藻类化石 Foerstia 的相关性已确定出阿巴拉契亚盆地 Antrim 上段页岩、俄亥俄页岩的 Huron

小段(图 5)和伊利诺伊盆地 New Albany 页岩的 Clegg Creek 段的时代。

Antrim 下段页岩的大规模构造相对简单。Antrim 页岩含油气系统的圈闭和盖层是隐蔽的,下面的章节将对此进行讨论。

表 1 讨论了 Antrim 页岩含气系统和美国其它 4 个页岩含气系统的主要地质、地球化学和工程参数,这些参数变化范围大,属典型的非常规气藏。勘探和开采数据所需的实验室和现场测试专业技术及对低孔隙度和特低渗透性气藏的地层评价技术都是由美国能源部和天然气技术研究院制定的。图 6 描述了 5 个关键参数的变化范围:(1)镜质体反射率($R_o\%$);(2)以吸附状态存在的天然气馏分;(3)储层厚度;(4)TOC;(5)每英亩-英尺储层的天然气地质储量。对所给定的盆地而言,这 5 个参数值的变化最大为 5,最小为 0。图 6 的检验结果表明,尽管其他裂缝性富含有机质的页岩参数与 Antrim 页岩的参数差别很大,但这些页岩仍然可进行商业性天然气

表1 表1 5种页岩含气系统的地质、地球化学和储层参数

参 数	Antrim	Ohio	New Albany	Barnett	Lewis
深度 (ft)	600-2400	2000-5000	600-4900	6500-8500	3000-6000
总厚度 (ft)	160	300-1000	100-400	200-300	500-1900
净厚度 (ft)	70-120	30-100	50-100	50-200	200-300
井底温度 (°F)	75	100	80-105	200	130-170
总有机碳 (%)	0.3-24	0-4.7	1-25	4.50	0.45-2.5
镜质体反射率 (%R)	0.4-0.6	0.4-1.3	0.4-1.0	1.0-1.3	1.6-1.88
总孔隙度 (%)	9	4.7	10-14	4-5	3-5.5
天然气充满的孔隙度 (%)	4	2.0	5	2.5	1-3.5
水充满的孔隙度 (%)	4 2.5-3.0	4-8	1.9		1-2
渗透率厚度 [Kh(md-ft)]	1-5000	0.15-50	-	0.01-2	6-400
气体含量 (scf/ton)	40-100	60-100	40-80	300-350	15-45
吸附气 (%)	70	50	40-60	20	60-85
地层压力 (psi)	400	500-2000	300-600	3000-4000	1000-1500
压力梯度 (psi/ft)	0.35	0.15-0.40	0.43	0.43-0.44	0.20-0.25
井成本 (\$ 1000)	180-250	200-300	125-150	450-600	250-300
完井成本 (\$ 1000)	25-50	25-50	25	100-150	100-300
产水量 (b/d)	5-500	0	5-500	0	0
天然气产量 (mcf/d)	40-500	30-500	10-50	100-1000	100-200
单井的控制面积 (ac)	40-160	40-160	80	80-160	80-320
采收率 (%)	20-60	10-20	10-20	8-15	5-15
天然气地质储量 (bcf)	6-15	5-10	7-10	30-40	8-50
储量 (mmcf/井)	20-1200	150-600	150-600	500-1500	600-2000
历史上的产气区	Otsego 县	Pike 县	Harrison 县	Wise 县	San Juan 和 Rio Arriba 县
数据来源	密执安	肯塔基	印第安拉	得克萨斯	新墨西哥

开采。应该注意的是只有 Antrim 和 New Albany 页岩中才产出大量有特殊意义的水。除了在进行页岩气开采之前需要进行无特殊意义的气层脱水之外,这种共生水与煤层甲烷开采中的水相似。

1998 年,Antrim 页岩气产量稳定在 195 bcf。1999 年,有 6500 口产气井,只气产 190 bcf,大约比 1998 年减少了 2%。大多数产气井分布在北部第三个盆地中,被称之为“北部产气带”(图 4)。平均每口井产气 116 mcf/d,产水 30 bbl/d。

在北部产气带已识别出 2 组天然主裂缝,一组裂缝的走向为西北向,另一组裂缝的走向为东北

向,2 组裂缝都呈现出近垂直-垂直倾角。这些通常未胶结或被细粒的方解石覆盖的裂缝已绘制成图,在其垂直方向上长达数米,在其水平方向上暴露于地表几十米。在设法确定北部产气带以外 Antrim 页岩中天然气产量时,由于天然裂缝很小、渗透率很低,往往到富含天然气的有机页岩。

在几个分散的气田尚未探明 Antrim 页岩的产气量。但是,对其他连续性的气藏而言,页岩的含气饱和度覆盖范围较大,对这些气藏通过实施增产措施扩大现有天然裂缝,从而进行商业性开采是可能的。20 世纪 90 年代初期,在北部产气带的南部

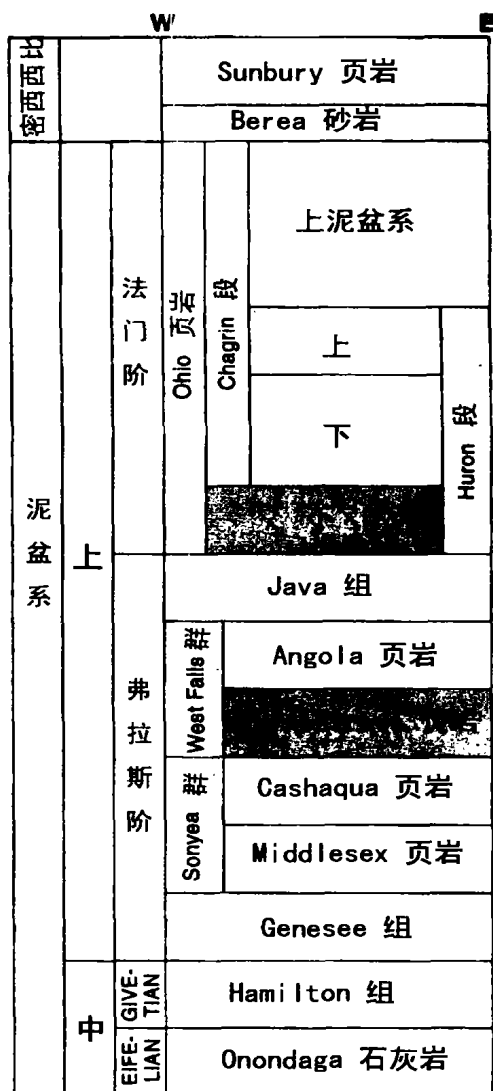


图 5 阿巴拉契亚盆地西部中泥盆统—下密西西比系地层

和东部所钻探的 Antrim 页岩深井钻遇到甲烷气，由于渗透率太低，因而尚未进行开采。

Antrim 页岩气似乎具有双重成因，干酪根的热成熟使其具有热成因，甲烷菌的代谢作用使其具有微生物（或生物）成因。Martini 等人（1998）对地层水的化学性质、采出气和地史进行综合研究表明，北部产气带中以产生物成因气为主，发育良好的裂缝网络不仅可使 Antrim 页岩内的天然气和原生水发生运移，而且可使来自含水层的充满细菌的雨水侵入到上覆更新世冰川沉积物中。甲烷和其共生地层水的重氢同位素（ δD ）为甲烷的细菌成因提供了最有力的证据。Martini 等人（1998）针对裂缝发育程度与更新世冰蚀之间的关系，提出了一种动力学关系。他们认为，由于发生了冰盖填充物的多次充填事件，水力压头使先前存在的天然裂缝扩大

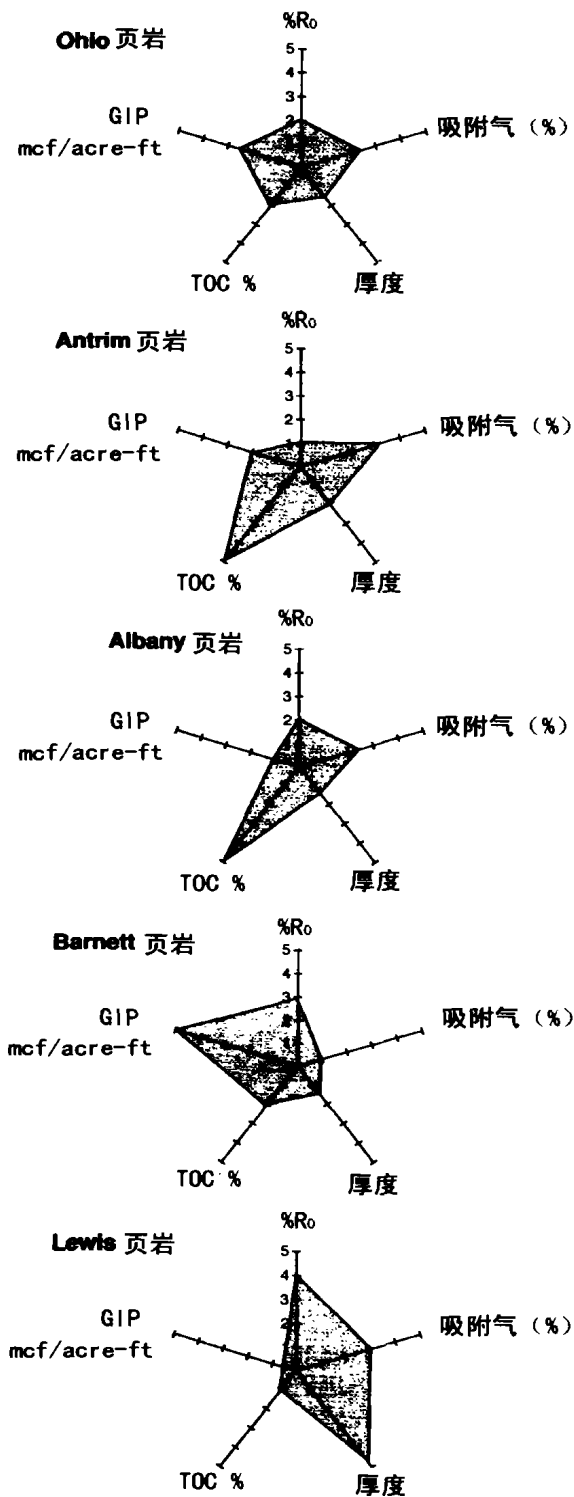


图 6 页岩气地质和地球化学性质对比（GIP 为天然气地质储量）

并使雨水流入（再充填），这就更进一步支持了甲烷的细菌成因学说。

根据甲烷 / （乙烷 + 丙烷）比值和丙烷碳同位素值（ $\delta^{13}C$ ）已识别出热成因气所占体积较小（<

20%)。热成因气成分和干酪根热成熟度朝盆地方向成比例地增加。

Antrim 页岩含油气系统

深入分析烃源岩、储集岩、圈闭和盖层之间的相互关系是评价商业性油或气藏的传统要求,这种要求是通过分析复合含油气系统的上述因素来实现的。Magoon 和 Dow (1990)提出的这种概念用于评价有效烃源岩和已形成的油气藏之间的成因关系。含油气系统的基本要素是烃源岩、储集岩、密封岩和上覆岩石。必需考虑的形成过程包括圈闭的形成、油气生成、运移、聚集和所有这些要素在时间和空间上适当地配置。应用这种概念的重点是确定关键时刻,即最大限度地描述油气生成、运移和聚集的时间。

本文对与其他非常规含油气系统进行讨论,该系统不具有 Magoon 和 Daw (1994) 所定义的含油气系统的所有组成部分。例如,Antrim 下段页岩的 Lachine 和 Norwood 小层中的富含有机质页岩层既是烃源岩,又是储集岩。导致产能系数和渗透率增加或扩大的裂缝既可能是由地层内的干酪根和沥青热成熟所产生的压力而形成的,也可能是由地层外部构造作用力而形成的,或者是由内部压力和外部构造作用力共同作用形成的。此外,这些事件显然发生在不同的时代。在任何事件中,页岩内的油气运移距离都比较短。位于页岩上部或下部的常规油气藏也可能被相同的页岩烃源岩所生成的油气同时充填 (Cole 等人,1987)。

图 7 描述了 Antrim 下段页岩在地史中关键事件发生的时间 (Magoon 和 Dow, 1994)。尽管油气生成可能出现在不同的地质时代,但目前所形成的天然气很可能只有数十万年 (Martini 等人, 1998)。充填的热成因气可能在整个地质时代中

已经从页岩储层中泄漏。从逻辑上讲,近代形成的天然气与更新世冰蚀相结合,既可因为上覆冰碛物的作用延伸到圈闭地层,又可因为冰盖载荷/卸载作用形成裂缝。由于含油气系统中仍然有生物气生成,因此,继油气生成、运移和聚集之后开始的含油气系统的保存时间接近于零 (Magoon 和 Dow, 1994)。

俄亥俄页岩

阿巴拉契亚盆地的俄亥俄页岩在许多方面与 Antrim 页岩含油气系统不同。正如在上述部分所讨论的一样,Antrim 页岩含油气系统在美国最早进行商业性天然气开采。

图 5 是西弗吉尼亚中部和西部产气层中泥盆系

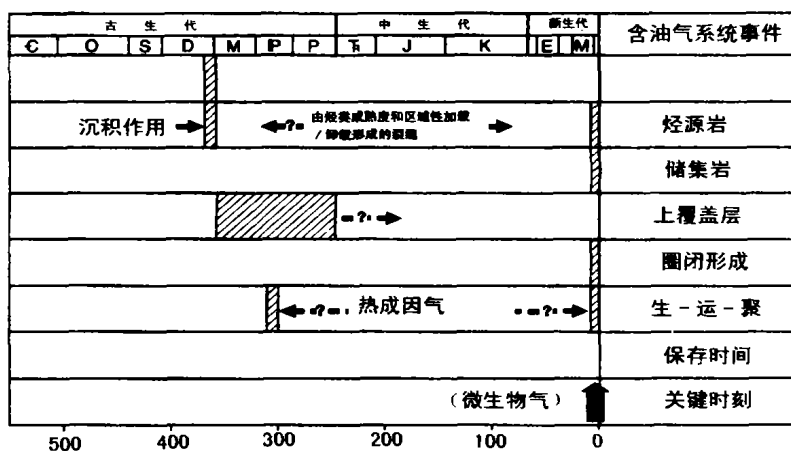


图 7 描述 Antrim 页岩气生成的关键时刻事件图



图 8 中-上泥盆统放射性黑色页岩总净厚度

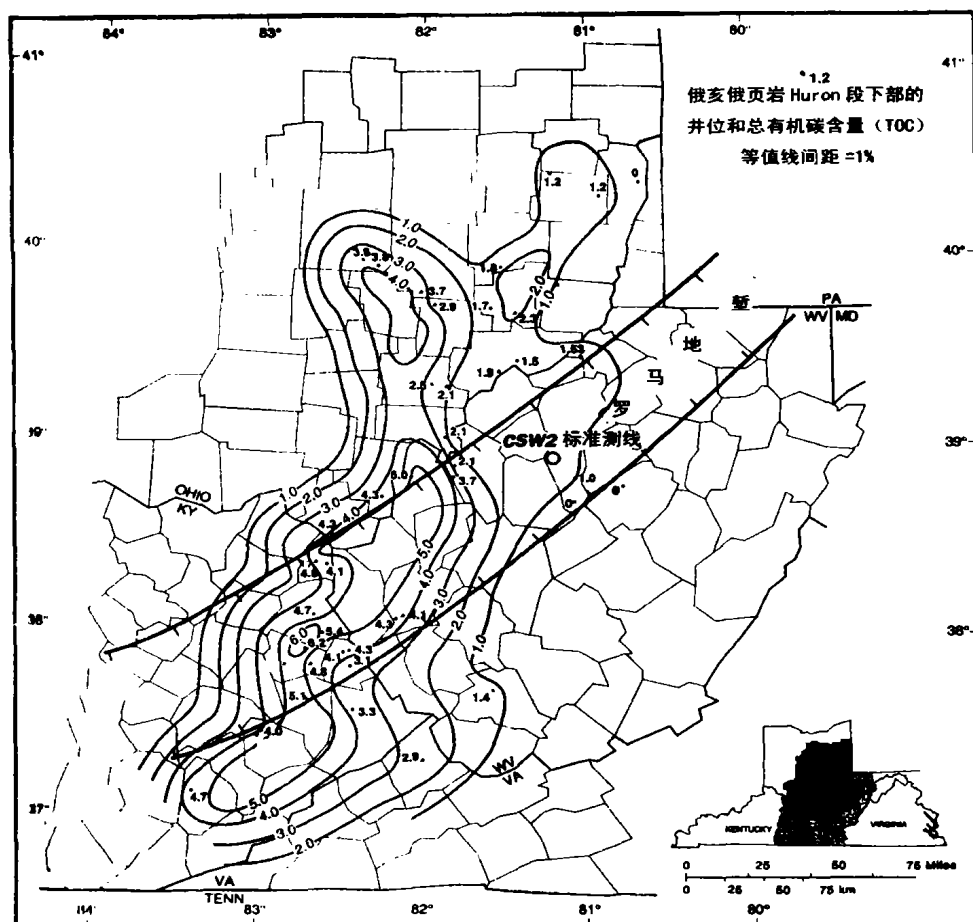


图9 俄亥俄页岩Huron段底部总TOC分布

CSW2代表天然气研究院(现在的天然气研究院,GTI)综合研究的2号井

页岩地层的地层剖面。由于盆地沉积环境的变化,局部地层显然比图上显示的要复杂的多。中、上泥盆统页岩地层大约覆盖了331520 km²,露头暴露于盆地边缘周围。地下地层厚度超过1524 m,富含有机质的黑色页岩净厚度超过152 m(图8)。

阿巴拉契亚盆地中古生代沉积岩的巨大楔形体反映了富含有机质岩层(主要是碳质页岩)、其他碎屑岩(砂岩、粉砂岩和有机质贫乏的粉砂质页岩)和碳酸岩盐的巨大旋回沉积作用(Roen, 1993, 1994)。这些岩层为不对称沉积,随着劳伦古大陆从被动陆缘向聚敛大陆边缘过渡演变成向东部加深的前陆盆地。至少存在着3个大的古生代沉积旋回,每个旋回都是由上面覆盖有碎屑岩和碳酸盐岩的底部碳质页岩组成。泥盆系黑色页岩层属于最年轻的第二个旋回部分。页岩层进一步分为5个蚀变碳质页岩和粗粒碎屑岩旋回。这5个页岩旋回与阿卡迪亚造山运动和西郭卡茨基尔三角洲前积的动力学相对应(图2)。

罗马地堑(图9)是由Iapetus海所形成的被动大陆边缘地堑系在晚元古代期间演变成的复杂地堑

系统。在后来的塔康、阿卡迪亚和阿勒格尼造山运动期间,地堑形成的断裂带复活,晚泥盆世在内陆浅海底部形成凹陷。Curtis和Faure(1997, 1999)认为断层边界次盆地与这些凹陷相结合控制了俄亥俄页岩Huron下段和West Falls组Rhinestreet页岩层中藻类衍生的有机质的保存条件(图5)。由于这些次盆地缺乏循环水,限制了氧的补给,因此,这些次盆地是缺氧的。在局部盆地上方,由于塔斯马尼亚页岩和水中相同的藻类具有间歇性石油荧光显示,说明有机质的保存条件得到了提高。有机质大量富集所产生的藻类石油荧光显示说明有机质排出了氧的供给,因此,即使在次盆地边界以外的沉积物中也可以保存藻类物质。

图9描述了俄亥俄页岩主要源岩层Huron下段干酪根(用TOC表示)的分布。根据镜质体反射率研究,Huron下段页岩中所包含的所有有机质基本上都处于油气生成的热成熟阶段。有机质以II型干酪根(液体和偏气型)为主。图9中TOC等值线所包围的地区包括了西弗吉尼亚、肯塔基东部和俄亥俄南部的大部分地区。在西弗吉尼亚Calhoun县,Huron下段的底部是产气区,这与图10中所示的、GRI研究的典型测井曲线中的最大自然伽马测井读数相吻合。总的说来,该地区的TOC为1%,但是,在底部产气区,TOC可高达2%。

黑色页岩的比例、TOC含量和采气指数沿西弗吉尼亚附近的肯塔基Big Sandy气田的西部(图9)增加到最大值。这些结果与所测量的TOC和干酪根含量大致上是一致的。从1921年起,Big Sand气田就已开采页岩气,历史上,阿巴拉契亚盆地中页岩气的产量贡献最大。

Hunter和Young(1953)对俄亥俄页岩含油气系统进行了深入研究。对3400口井的研究表明,有6%的井未采取增产措施就进行了完井。这些可能具有交叉天然裂缝网络的未采取增产措施的井平均无

阻流量为 1055 mcf/d。其它井钻井之后明显的没有无阻流量,平均无阻流量仅为 61 mcf/d。其后,对其余井采取油田早期射孔工艺技术实施增产措施,用 3000~7000 磅硝化甘油炸药在井下实施爆炸。实施增产措施之后,井的无阻流量平均大约为 285 mcf/d,是实施增产措施之前的 4 倍。Hunter 和 Young (1953)断定射孔能使裂缝孔隙度和渗透率增大,可使将要开采的天然气达到商业性产量。尽管射孔作为目前的增产措施不能明显地给人留下深刻的印象,但这项增产措施对储层是很有效的,而且伤害也很小。现代井通常采用液氮泡沫和砂支撑剂实施压裂增产措施 (Milici, 1993)。

1994 年以前,美国页岩气大部分产于俄亥俄页岩,直到钻井发现密歇根石油城,Antrim 页岩气产量才上升到最高位置 (俄亥俄)。

New Albany 页岩

伊利诺伊盆地的 New Albany 页岩 (图 2) 部分与俄亥俄页岩和 Antrim 页岩有关。New Albany 页岩厚度为 30~122 m,深度在 182~1494 m。研究表明,与其他黑色页岩相类似,New Albany 页岩中的天然气既可以游离气状态贮藏在裂缝和基岩孔隙中,又可以气态吸附在干酪根和粘土颗粒表面。研究结果还表明,商业性开采与涉及到的断层、褶皱的裂缝有关,同时还与碳酸盐岩隆上方页岩的覆盖层有关。

New Albany 页岩中的大多数天然气产量产于肯塔基西北部和靠近印第安纳南部的近 60 个气田中。但是,过去和目前的产量事实上都比产于 Antrim 页岩或俄亥俄页岩的产量小 (俄亥俄)。密执安 Antrim 页岩远景区的成功开发推动了 New Albany 页岩的勘探和开发,但勘探和开发的结果并不是十分有利。New Albany 页岩中开采出来的生物成因气中含有大量的地层水。水的出现似乎代表了地层渗透率的等级。正如对 Antrim 和俄亥俄页岩形成机理并不是完全了解一样,对控制天然气产状和生产的机理也不是很了解,但盆地研究人员正在对这个课题进行合作研究。

最近,GIT 资助合作完成了对天然裂缝、产水量、完井作业、经济要素和 New Albany 页岩气产量的综合研究。这些研究成果包括 Walter 等人 (2002) 关于水的化学性质对天然气产量的控制作用研究。尽管对 New Albany 页岩气的开采潜力还不是很了解,但随着近年来井口天然气价格的增涨,已加快了勘探和钻井的速度 (Hill, 2001)。

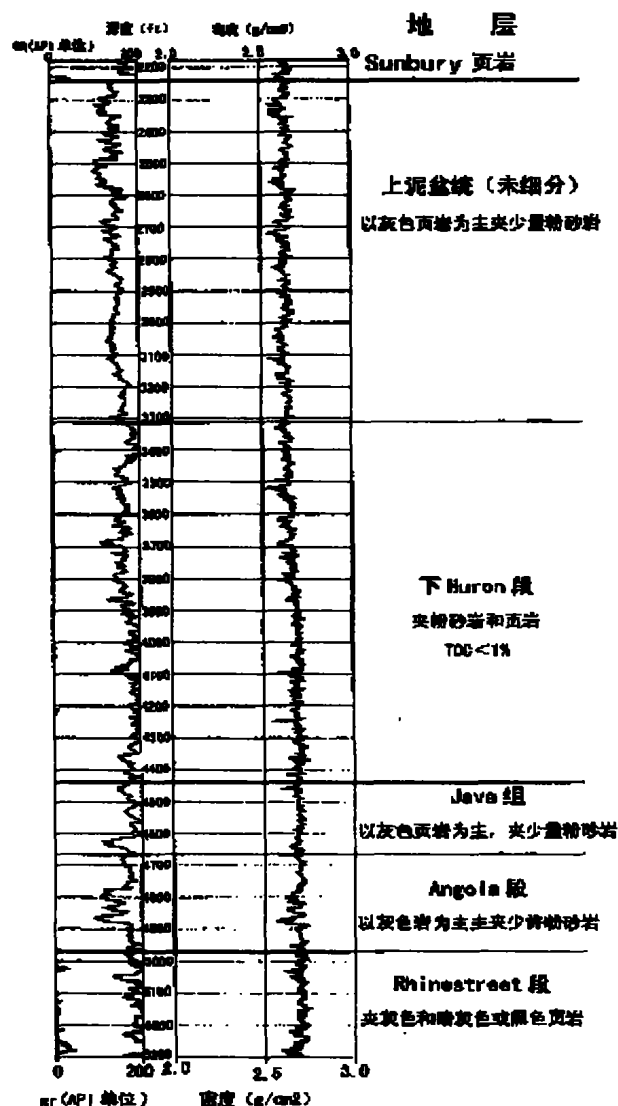


图 10 西弗吉尼亚 Calhoun 县 GT1 CSW2 井的标准测井曲线 CSW2 代表天然气研究院 (现在的天然气技术研究院, GTI) 综合研究的 2 号井

Barnett 页岩

米切尔能源开发公司 (MEDC) 于 1981 年在沃思堡盆地密西西比系 Barnett 页岩中开始进行商业性天然气开采。尽管纽瓦克东部气田是主要的生产区,但 MEDC 公司 (现在已与德文能源公司合并) 与其他合作机构已把商业性产气区扩大到其他地区。纽瓦克东部气田中的 Barnett 页岩深度为 1981~2591 m,页岩净厚度为 15~61 m (表 1)。

Barnett 页岩的地球化学和储层参数与其他产气区页岩的地球化学和储层参数有明显的差别,特别是天然气地质储量差别更大 (图 6)。例如, Barnett 页岩气是热成因气。根据图 11 所描述的模

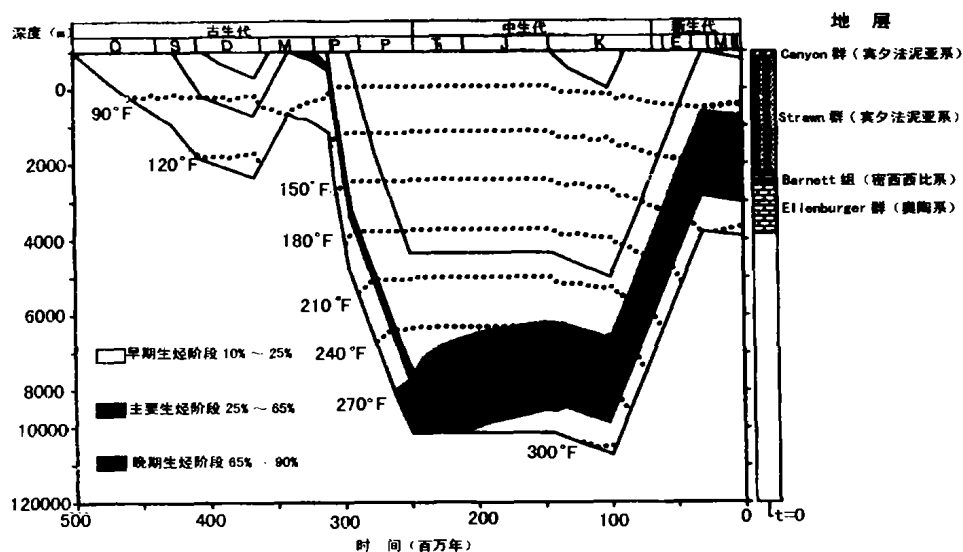


图 11 沃思堡盆地的埋藏史和地层柱状图

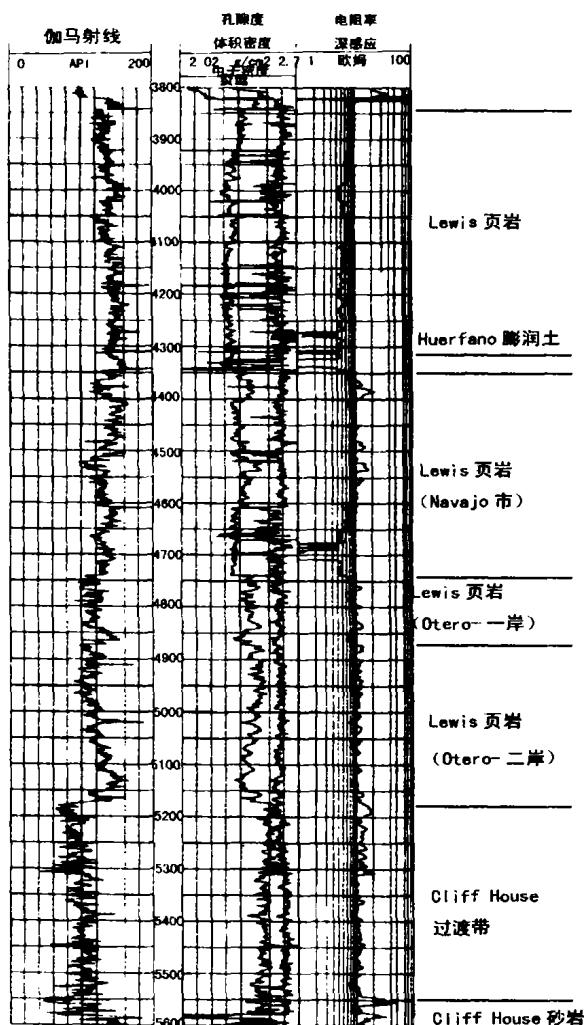


图 12 圣胡安盆地 Lewis 页岩标准测井曲线

型, 油气生成始于晚古生代, 延续到整个古生代, 随着白垩纪期间地层抬升和放射性衰减而停止。此外, Barnett 页岩中的有机质已生成液态烃。Jarvie 等人 (2001) 已从沃思堡盆地西部奥陶纪—宾西法尼亚纪的其他 13 套地层中识别出来源于 Barnett 页岩层的原油。这些原油的热解分析结果表明其气源岩为石油生成的母源岩。

鉴于 Barnett 页岩含油气系统具有世界第一流水平的石油潜力, Jarvie 等人 (2001) 还认为, 如下 2 种因素相结合妨碍了石油和天然

气的开采: (1) 当其他含油气系统要素 (运移通道、储集岩和圈闭) 在时间和空间未达到最佳组合状态时, 油气发生了阶段性排出, (2) 盖层的密封性发生周期性破坏。

尽管如此, Barnett 页岩气产量仍在继续增加, 900 多口井的年产量超过 400 mcf/d。除历史上的产气区以外, Barnett 远景区正在不断扩大, 但受到市场、基础设施和距达拉斯—沃思堡中心城市的距离等条件的限制。

Lewis 页岩

科罗拉多和新墨西哥圣胡安盆地中部的 Lewis 页岩无论在地质时代, 还是在商业性开发方面都是最年轻的页岩气远景区。

Lewis 页岩是一种富含石英质的泥岩, 其 TOC 含量大约为 0.5%~2.5% (表 1)。人们认为, Lewis 页岩是晚白垩世下滨面至远端滨外沉积。

在图 12 所显示的 Lewis 页岩标准测井曲线上已识别出 4 个层段和一套盆地范围的特殊膨润土标志层。距剖面底部三分之二处渗透率最高。渗透率增加可能是粒径和与南北/东西向区域裂缝系统伴生的微裂缝增大的结果。

图 6 和表 1 表明 Lewis 页岩在所讨论的 5 个含油气系统中的净厚度最大、热成熟度最高。吸附气含量也是任何页岩气远景层中最高的。

20 世纪 90 年代末期 Lewis 页岩产气层开始投产。作业者把 Lewis 页岩中新井第二次完井层或者老井重新完井层作为开采目标 (Hill 和 Nelson, 2000)。这些完井作业导致储量新增附加成本大约 0.30 美元/mcf。俄亥俄显示, 尽管与俄亥俄页岩和

表2 美国历史上含气页岩资源量

盆 地	阿巴拉契亚	密执安	伊利诺伊	沃思堡	圣胡安
位 置	俄亥俄 肯塔基 纽约 宾夕法尼亚 西弗吉尼亚 弗吉尼亚	密执安 印第安纳 俄亥俄	伊利诺伊 印第安纳 肯塔基	得克萨斯	科罗拉多 新墨西哥
主要页岩单元	俄亥俄页岩	Antrim 页岩	New Albany 页岩	New Albany 页岩	Barnett 页岩
盆地面积 (mi ²)	16000	122000	53000	4200	1100
总有机碳 (%)	0~4.5	1~20	1~25	4.5	0.45-2.5
热成熟度 (%R ₀)	0.4~1.3	0.4~0.6	0.4~1.0	1.0~1.3	1.6-1.88
页岩气地质资源量 (tcf) 参考资料	225~248 NPC(1980,1992)	35~76 NPC(1980,1992)	86~160 NPC(1980,1992)	54~202 Jarvie 等 (2001)	96.8 1997 年 Burlington 估算 的资源量
估算的可采页岩气资源量 (tcf) 参考资料	14.5~27.5 NPC(1980,1992)	11~18.9 NPC(1992) USGS(1995)	1.9~19.2 NPC(1992) USGS(1995)	3.4~10.0 Schmoker 等人 (1996) Kuuskraa 等人 (1998)	无资料
估算的未探明页岩气总资源量 (tcf)	90.7	40.6	无资料	无资料	无资料

Antrim 页岩天然气产量相比, Lewis 页岩天然气产量很小,但其产量却是逐年快速增长。

不能把圣胡安盆地 Lewis 页岩气远景层与怀俄明和科罗拉多的 Washakie、Great Divide 和 Sand Wash 盆地白垩系 Lewis 页岩气远景层混为一谈。这些盆地 Lewis 页岩的天然气产量产于封闭在海相页岩中的浊积砂,这种浊积砂与圣胡安盆地 Lewis 页岩的地质时代不相同。

地层评价

储层参数(图6,表1)的变化很大,显然控制5个含油气系统中页岩气开采的速度和产量,其中最重要的是热成熟度、天然气地质储量、TOC、储层厚度和吸附气量。正如前面所讨论的一样,天然裂缝网络必然会增大基质页岩极低的渗透率。因此,在钻井前后评价已知页岩系统时,必须把地质学和地球化学结合起来进行研究。有几种这样的综合模式已用于更完整地评价页岩气系统。

泥盆系页岩的 GTI 标准测井曲线模板已成功用于俄亥俄页岩。GTI-Holditch 的 Antrim 页岩储层

研究模式近期已取得很大的发展。根据 Antrim 页岩和 New Albany 页岩系统的研究结果, Martini 等人(1998)和 Walter 等人(2000)针对可采气的生物成因提出了勘探模式。

资源量和目前的产气量

针对所研究的5个页岩含气系统,根据已公布的天然气资源总量估算的净探明储量是相当大的,单个系统的净探明储量高达783 tcf(表2)。相比之下,2000年美国开采了大约19.3 tcf 天然气,主要从加拿大进口和补充了3.4 tcf 天然气。

补充的天然气资源量数据来源于天然气潜在储量委员会(PGC)。尽管PGC每两年一次的评定未公布地层层位并未列入表2中,但委员会近6年在Antrim和Lewis页岩中从事的勘探和开发活动已从技术上增加了密执安和圣胡安盆地可采气储量的估算值。

在评价这些估算值时,必须考虑估算值应是根据地地质远景带或根据完善的计算模式计算出来的,

