

# 福特沃斯盆地 Barnett 页岩气藏特征及启示

聂海宽, 张金川, 张培先, 宋晓薇

(中国地质大学海相储层演化与油气富集机理教育部重点实验室, 北京 100083)

**摘要:**福特沃斯盆地 Newark East 页岩气田是美国第一大页岩气田,代表了一个集烃源岩、储层和盖层等成藏体系所有关键要素存在于同一套页岩层的非常规天然气藏——页岩气藏。根据研究资料,对福特沃斯盆地 Barnett 页岩气藏的特征进行了分析,包括页岩厚度、有机质类型及丰度、成熟度、孔渗和裂缝特征以及含气量等指标,重点研究了 Newark East 页岩气田的特征,该气田具有页岩层相对较厚、有机质丰度高、热成熟度高和被致密碳酸盐岩包围的特征。最后得出 Newark East 气田 Barnett 页岩气藏的气藏模式,并认为该页岩气藏的特征、模式在马拉松—沃希托、阿巴拉契亚逆冲褶皱带前缘的前陆盆地中具有普遍意义。

**关键词:**页岩气;模式;特征;Barnett 页岩;福特沃斯盆地

**中图分类号:**TE132.2

**文献标识码:**A

**文章编号:**1000-7849(2009)02-0087-07

福特沃斯盆地是美国德克萨斯州中北部南北向延伸的浅盆状洼地,面积约 38 100 km<sup>2</sup>。勘探实践表明,密西西比系(下石炭统,下同)Barnett 页岩是储量很大的页岩气藏。20 世纪 80 年代以前,Barnett 页岩并不是勘探的目标,当时勘探的重点是宾夕法尼亚系碎屑岩以及奥陶系、密西西比系、宾夕法尼亚系(上石炭统,下同)碳酸盐岩。虽然有很多井钻遇了 Barnett 页岩,且常有很强气显示,但却被认为是没有经济价值的“页岩气藏”<sup>[1-2]</sup>。20 世纪 80 年代,Mitchell 能源开发公司开始把 Barnett 页岩分布区作为可能的油气高产区进行了勘探开发。20 世纪 90 年代中期,在盆地北部建立了一个天然气高产区——Newark East 页岩气田。2006 年,Newark East 页岩气田成为德克萨斯州产量最大的气田,按照能源信息管理局(EIA)最近的气田储量评价,Newark East 气田的储量居全美气田第三,产量居全美气田第二<sup>[3-4]</sup>,占全美页岩气总产量的一半以上,是美国最大的页岩气田。2004 年,美国地质调查局 USGS 评价的页岩气田的资源量为 7 560 亿 m<sup>3</sup>,其中 Newark East 页岩气田为 4 134 亿 m<sup>3</sup><sup>[5]</sup>。

福特沃斯盆地 Barnett 页岩气藏的成功勘探开发可以作为一个页岩气勘探的模型来类比其他盆地页岩气的勘探<sup>[2]</sup>,尤其是位于马拉松—沃希托、阿巴拉契亚逆冲褶皱带前缘的盆地,采用这种模型,在该地区的黑勇士、阿科马、二叠以及阿巴拉契亚等盆地的相当层系也都发现了页岩气藏。Barnett 页岩气藏的成功勘探,可以为我国相关盆地的页岩气勘探

提供参考和借鉴。

## 1 构造及地层特征

福特沃斯盆地是一个边缘陡、向北加深的凹陷,基本构造图如 Barnett 页岩构造等高线所示(图 1<sup>[1,6]</sup>),它的枢纽方向大致平行于限制盆地向北一

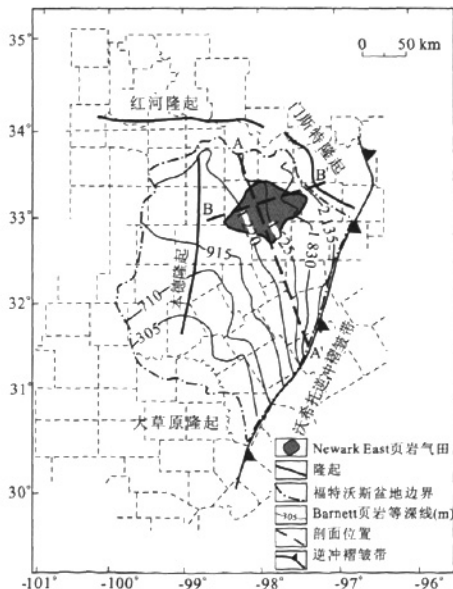


图1 福特沃斯盆地构造图<sup>[1,6]</sup>

Fig.1 The structure map of Fort Worth Basin

收稿日期: 2008-07-02

编辑: 禹华珍

基金项目: 国家自然科学基金项目(40672087,40472073);国家重点基础研究计划项目(2005CB422106)

作者简介: 聂海宽(1982—),男,现攻读矿产普查与勘探专业博士学位,主要从事油气成藏机理和非常规天然气地质研究。

北东发育的门斯特隆起,而后向南弯曲平行于沃希托逆冲褶皱带前缘,限制盆地向西—北西发育的构造在早中宾夕法尼亚世作为东部沃希托逆冲褶皱带的对应产物就已经形成<sup>[7]</sup>。福特沃斯盆地是晚古生代沃希托造山运动形成的几个弧后前陆盆地之一,沃希托造山运动是由泛古大陆变形引起的板块碰撞(北美板块和南美板块)形成逆冲断层的主要事件<sup>[8]</sup>。盆地东部边界为沃希托逆冲褶皱带,北部边界是基底边界断层控制的红河隆起和门斯特隆起,西部边界为本德隆起、东部陆棚等一系列坡度较缓的正向构造,南部边界为大草原隆起。

福特沃斯盆地发育的地层主要有寒武系、奥陶系、密西西比系、宾夕法尼亚系、二叠系和白垩系。下古生界上部为一区域性角度不整合,盆地内缺失志留系和泥盆系。上密西西比统和下宾夕法尼亚统表现为连续沉积,但在某些地区可能为平行不整合(例如在门斯特隆起附近)<sup>[9]</sup>。古生界根据构造演化历史可大致分为3段<sup>[1]</sup>:①寒武系—上奥陶统,为被动大陆边缘的地台沉积,包括 Riley—Wilberns 组、Ellenburger 组、Viola 组和 Simpson 组;②中上密西西比统,为沿俄克拉荷马坳拉槽构造运动产生沉降过程的早期沉积,包括 Chappel 组、Barnett 页岩组和 Marble Falls 组下段;③宾夕法尼亚系,代表了与沃希托逆冲褶皱带前缘推进有关的主要沉降过程和

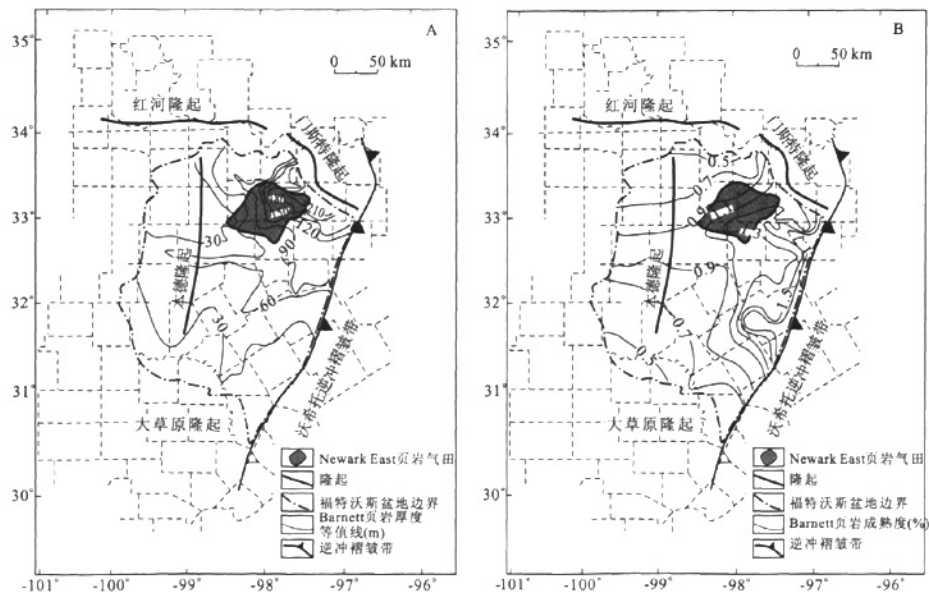
盆地充填(主要是陆源碎屑充填),包括 Marble Falls 组上段和 Atoka 组等。

## 2 Barnett 页岩层主要指标

福特沃斯盆地形成于早期的晚密西西比世,在早古生代形成的坳拉槽南部残余区域的德克萨斯州中北部沉积了一套富含有机质的黑色页岩<sup>[6]</sup>,由石灰质页岩、黏土页岩、石英质页岩和含白云石页岩组成<sup>[1]</sup>。详细的生物标志化合物和轻烃地球化学研究表明密西西比系 Barnett 页岩是福特沃斯盆地德克萨斯州中北部的主要烃源岩。在盆地中部和东部, Barnett 页岩底部常常包含一层薄薄(<3 m)的富含磷酸盐物质的区带,主要是磷灰石<sup>[1]</sup>,向盆地的北部,富含有机质的黑色页岩相变为富含碳酸盐相,碳酸盐物质可能是由一系列洪流导致的碎屑流沉积<sup>[2]</sup>。生物标志化合物研究表明 Barnett 页岩的沉积环境为:海相、缺氧、强烈上升流、正常盐度<sup>[10]</sup>。黑色富含油气的泥岩和海绿石、磷酸盐岩证据同样表明,页岩是在还原条件下缓慢沉积的。

### 2.1 厚度

Barnett 页岩的厚度和岩性在盆地范围内是变化的,东北部最厚(图 2-A<sup>[1,11]</sup>),并包含了一层向南和向西迅速变薄的灰岩。 Barnett 页岩层的北部被



m<sup>[1,5-6,12-13]</sup>。在 Newark East 气田的北部和东北部, Barnett 页岩的碳酸盐含量大量增加<sup>[14]</sup>, 主要是因为波浪和水流把盆地西部 Capple 礁的碳酸盐碎屑运移到此处, 使 Barnett 页岩下段的细粒钙质物质相当丰富<sup>[15]</sup>。Barnett 页岩向西、向南迅速变薄, 在大草原隆起区域其厚度只有几米到十几米, 如在 Lampasas 县和 San Saba 县境内沿大草原隆起出露的地层厚 9~15 m, 并且富含油气<sup>[16]</sup>。总的来说, Barnett 页岩在下列地区是缺失的: ①北部和东北部红河隆起和门斯特隆起被剥蚀区域; ②南部沿大草原隆起区域; ③西部剥蚀区域。

## 2.2 有机质类型、丰度及成熟度

Barnett 页岩的油气分布、饱和度以及生产能力等都非常复杂并且强烈依赖有机质丰度、热成熟度和埋藏史等条件<sup>[1]</sup>。随岩性的不同, 有机质丰度也发生变化, 在富含黏土的层段有机质丰度最高, 而且成熟的地下标本和不成熟的露头标本有很大差别。对不同深度钻井岩屑的分析结果表明, 其有机碳质量分数在 1%~5% 之间, 平均为 2.5%~3.5%, 岩心分析数据通常比钻井岩屑分析的高, 为 4%~5%<sup>[12,17]</sup>, 如 Newark East 气田 T. P. Sims 2 井采出的 Barnett 页岩岩心的有机碳质量分数为 4.5%<sup>[6]</sup>; Henk 等<sup>[18]</sup>同时测量了岩心和钻井岩屑的有机碳质量分数, 发现其岩心测量值比钻井岩屑测量值高 2.4 倍, 表明钻井岩屑测量的有机碳质量分数具有稀释效应。Jarvie 等<sup>[19]</sup>和 Pollastro 等<sup>[20]</sup>测得 San Saba 县和 Lampasas 县 Barnett 页岩露头样品的有机碳质量分数高达 12%。虽然 Barnett 页岩的有机碳质量分数变化较大, 但总体来说其有机碳质量分数是相当高的, 平均大于 2%, 表明在中低成熟度时, 该页岩层具有很好的生油气能力, 有机碳质量分数高是 Barnett 页岩气藏被成功勘探开发的重要因素。

Barnett 页岩的有机质以易于生油的 II 型干酪根为主。在镜质反射率  $R_o$  小于 1.1% 时, 以生油为主, 生气为辅。干气区主要分布在盆地东北部和冲断带前缘, 这些地区埋藏较深, 成熟度较高,  $R_o$  超过 1.1%~1.4%, 处在生气窗内, 如 Wise 县生产的伴生湿气的  $R_o$  为 1.1%, 干气的  $R_o$  在 1.4% 以上; 油区主要分布在盆地北部和西部成熟度较低的区域,  $R_o$  为 0.6%~0.7%; 在气区和油区之间是过渡带, 既产油又产湿气,  $R_o$  在 0.6%~1.1% 之间<sup>[1,5-6]</sup>。然而, 在 Newark East 页岩气田及其邻区生产的天然气可能是后期高成熟度 ( $R_o \geq 1.1\%$ ) 原油和沥青的二次裂解形成的<sup>[6]</sup>。天然气技术研究所 GTI 公布 Barnett 页岩气藏产气区页岩的  $R_o$  为 1.0%~1.3%, 实际上产气区的  $R_o$  西部为 1.3%, 东部为

2.1%, 平均为 1.7%<sup>[4,6]</sup> (图 2-B<sup>[1,11]</sup>)。

重建的埋藏史图表明<sup>[1,20]</sup>, 福特沃斯盆地 Barnett 页岩在宾夕法尼亚纪、古近纪和新近纪经历了明显的抬升和剥蚀, 并经历了 3 期热史 (图 3<sup>[1]</sup>): 第一期, 宾夕法尼亚纪—二叠纪快速沉降和埋深时期; 第二期, 晚二叠世—中晚白垩世, Barnett 页岩一直处于恒温状态, 只是在中白垩世才被加快埋深的短暂时期打断; 第三期, 以晚白垩世—古近纪的抬升和轻微超压为标志。Ewing<sup>[21]</sup>进一步研究了福特沃斯盆地的埋藏史, 并指出最大埋深、最大受热和最大生烃都发生在二叠纪、三叠纪、侏罗纪和白垩纪。从埋藏史图上可以看出 Barnett 页岩从晚宾西法尼亚世开始生烃, 在二叠纪、三叠纪和侏罗纪达到生烃高峰, 并一直延续到白垩纪末。Barnett 页岩可能也经历了幕式的排气过程, 这些天然气主要来自于沥青裂解, 其次是原油裂解<sup>[1,6,17-18,20]</sup>。我国南方地区同样经历了长期的构造运动和热演化, 演化历史复杂, 热成熟度较高, 为勘探增加了难度, Barnett 页岩气藏成功勘探开发的经验可以为我国南方地区的页岩气勘探提供借鉴。

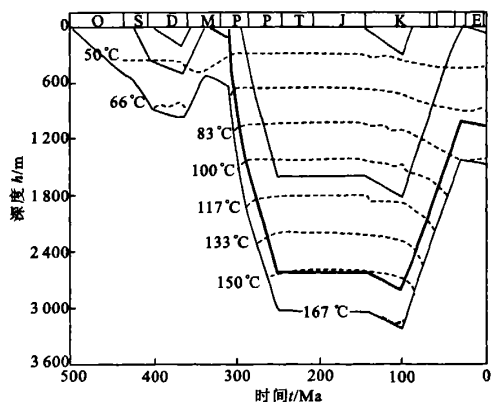


图3 福特沃斯盆地 Eastland 县单井埋深史图<sup>[1]</sup>

Fig. 3 Burial-history reconstruction for individual wells in Eastland County, Fort Worth Basin

O. 奥陶系; S. 志留系; D. 泥盆系; M. 密西西比系; P. 宾夕法尼亚系; T. 二叠系; J. 三叠系; K. 侏罗系; E. 白垩系; E. 古近系

## 2.3 孔渗和裂缝特征

Barnett 页岩高产气层段的基本孔渗和裂缝特征主要依靠岩心分析获得。研究资料表明有生产能力的、富含有机质的 Barnett 页岩的孔隙度为 5%~6%, 渗透率低于  $0.01 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ , 平均吼道半径小于  $0.005 \mu\text{m}$  (大约是甲烷分子半径的 50 倍)<sup>[2]</sup>, 平均含水饱和度为 25%, 但随碳酸盐含量的增加而迅速升高<sup>[1]</sup>。

Barnett 页岩含有天然裂缝, 孔隙度和渗透率伴

随有机质成熟(由液态烃到气态烃)而增大,并导致微裂缝的生成。天然气除吸附在有机质(干酪根)上外,还储存在这些微裂缝之中。然而对 Wise 县 Mitchell Energy T. P. Sims 2 井岩心的详细研究以及其他井岩心样品的观察表明:绝大多数裂缝全部或大部分被钙质胶结<sup>[22]</sup>。关于裂缝在 Barnett 页岩气藏中的作用,很多学者都进行过探讨<sup>[1,2,23]</sup>,但都没有得出实质性的结论。Bowker<sup>[2]</sup>认为高气体体积含量、易扩散以及能进行压裂等因素是 Barnett 页岩气藏被成功勘探开发的关键。而且在构造弯曲部位(背斜或向斜)和岩溶上方的页岩气井产量要比非构造部位的页岩气井产量低<sup>[2,24]</sup>,因为这些部位裂缝发育,水力压裂的水会沿着裂缝进入其下的 Viola 组和(或)Ellenburger 组灰岩层,不能在 Barnett 页岩中获得良好的有利于页岩气生产的裂缝。

#### 2.4 含气饱和度

Barnett 页岩气藏天然气的赋存方式包括两种:游离态和吸附态,尤其是吸附态天然气的含量直接决定着页岩气藏的品质,所以,国内外学者在这方面做了大量的工作<sup>[1,12,23,25-29]</sup>。Bowker<sup>[12]</sup>利用 Newark East 气田南部 Johnson 县 Chevron 地区 Mildred Atlas 1 井的岩心样品分析了罐装解析气量并绘制了真实的反映总吸附气量随压力变化的吸附等值线,表明在气田常规气藏条件下(20.70~27.58 MPa),Barnett 页岩中吸附气的体积含量为 2.97~3.26 m<sup>3</sup>/t,比早期分析的数据(约 1.13 m<sup>3</sup>/t)高很多<sup>[1]</sup>。Humble Geochemical 公司近期研究 Sims 2 井的资料后指出,计算的气体体积含量实际上超过 Mildred Atlas 1 井,而这两口井的总有机碳质量分数相近,Sims 2 井为 4.79%,Mildred Atlas 1 井为 4.77%<sup>[4]</sup>。在 Denton 县的 Mitchell Energy Kathy Keel 3 井(后被称为 K. P. Lipscomb 3 井),现今的有机碳质量分数为 5.2%,吸附气体积含量为 3.40 m<sup>3</sup>/t<sup>[25]</sup>,占天然气总体积含量(5.57 m<sup>3</sup>/t)的 61%<sup>[1]</sup>。

在对 Wise 县 T. P. Sims 2 井重新研究的基础上制成的甲烷等温线也得出了类似的结论(图 4<sup>[1]</sup>)。这些等值线包括了吸附气量和总气量,与 Mildred Atlas 1 井以及 Kathy Keele 3 井的结论相似。在气藏压力下(26.21 MPa),吸附气的体积含量占总气体体积含量(4.81~7.08 m<sup>3</sup>/t)的 35%~50%,即 1.70~3.54 m<sup>3</sup>/t,平均水平是 2.41 m<sup>3</sup>/t 的吸附气和 2.97 m<sup>3</sup>/t 的游离气,分别占总气体体积含量(5.38 m<sup>3</sup>/t)的 45%和 55%。

以上资料表明,Barnett 页岩气藏中有 40%~60%的天然气以吸附态赋存于页岩中,比早期研究的数据大很多,说明 Barnett 页岩比以前认为的有更大的资源储量潜力。Barnett 页岩气藏的丰度比

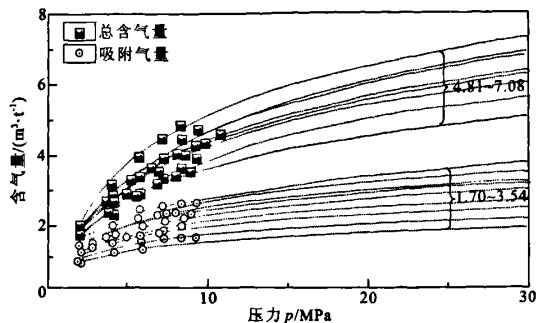


图 4 福特沃斯盆地 Wise 县 Barnett 页岩岩心气体等温线图<sup>[1]</sup>  
Fig. 4 Adsorption isotherms for Barnett Shale, Wise County, Fort Worth Basin

Wise 县 Mitchell Energy T. P. Sims 2 井,含气饱和度和吸附气体积含量分别为 4.81~7.08 m<sup>3</sup>/t 和 1.70~3.54 m<sup>3</sup>/t,油藏压力 26.21 MPa

美国其他盆地的页岩气藏(密执安盆地的 Antrim 页岩气藏、伊利诺斯的 New Albany 页岩气藏、阿巴拉契亚盆地的 Ohio 页岩气藏以及圣胡安盆地的 Lewis 页岩气藏)的丰度要大。Barnett 页岩以 II 型干酪根为主,以生油为主,有机碳质量分数高,在没有大量排烃之前,液态烃就已赋存于页岩内(有机碳对液态烃具有吸附作用),随着温度的升高,液态烃发生裂解,生成更轻的气体烃类,这些气体烃类同样以吸附态赋存于富含有机质的页岩内。进一步可以预测,在目前演化程度较高的情况下有大量液态烃的地方也应该有大量的气体烃类组分。

### 3 Newark East 页岩气田及特征

Barnett 页岩气藏中采出的天然气基本上出于 Newark East 气田,包括 Denton 县大部、Wise 县东部以及 Tarrant 县西北部,面积 1 036 km<sup>2</sup>,有 2 340 口生产井,探明储量 765 亿 m<sup>3</sup>。在 Newark East 气田,Barnett 页岩被 Forestburg 灰岩层分为上下两段,在门斯特隆起附近,Forestburg 灰岩层厚约 61 m,甚至可能更厚,但向南和向西迅速减薄,并在最南部的 Wise 县和 Denton 县境内尖灭。在 Forestburg 灰岩层缺失的地方,Barnett 页岩上段和下段在测井曲线上没有差别。在气田的中心部位,Barnett 页岩直接覆盖在奥陶系 Viola 组灰岩或更老的 Simpson 组之上,这个区域角度不整合面的性质正在被研究,因为它控制着目前公认的商业天然气生产区域的西部边界。Barnett 页岩上段(平均厚 46 m)和 Forestburg 灰岩层在气田大部分地区都有分布。Barnett 页岩下段厚约 91 m,直接沉积在区域角度不整合面之上,其中有 75%或更多的天然气

是从 Barnett 页岩下段生产的<sup>[1]</sup>。穿过 Barnett 页岩气藏主要产区向南和向西 Barnett 页岩下段很快尖灭,在产区北部的 Wise 县和 Denton 县中心厚度超过 61 m,但在产区南部边界的这两个县其厚度只有几米。在气田的西部和西南部,Barnett 页岩迅速减薄,只有下段存在。

在 Newark East 气田,Barnett 页岩埋深为 1 982~2 592 m,厚度为 92~152 m,有机质丰度高(现今平均有机碳质量分数 $>2.5\%$ ),轻微超压(12.21 kPa/m),含气饱和度为 75%。生产层的孔隙度为 6%,渗透率从几毫微  $\mu\text{m}^2$  到  $0.01 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。镜质体反射率  $R_o$  在 1.3%~2.1%之间,平均为 1.7%<sup>[4]</sup>,并在向东—南东方向增大,气/油体积含量比值也在这一方向上增大,反映了高成熟度。与其他页岩气藏相比,Newark East 页岩气田具有以下显著的特点。

(1)Barnett 页岩气藏的天然气全部是热成因形成的,并在盆地内伴随石油大面积分布。Barnett 页岩经历了一个多期次复杂的热史,导致地球化学条件成为控制成藏的主要因素。Barnett 页岩气藏的产层很深,因此,其压力比其他页岩气藏高,具有轻微超压特征<sup>[2]</sup>。笔者认为,二叠纪—中晚白垩世的持续埋深、持续受热、持续生烃,以及晚白垩世的快速抬升是 Barnett 页岩气能成功成藏的关键。持续的受热、生烃,达到了过成熟阶段,且快速的抬升使天然气仍然保持在页岩中,形成轻微超压,储存了大量的各类天然气(吸附态和游离态),这正是 Barnett 页岩气藏区别于其他页岩气藏的关键所在。钻井压裂之前,页岩气藏处于压力平衡状态,吸附气的孔隙压力刚好等于岩石的毛细管压力,钻井压裂之后,平衡被打破,气体开始从颗粒表面解吸并进入裂缝流入井筒。

(2)在 Barnett 页岩气藏天然裂缝不是生产所必须的,甚至在某些情况下,它还降低了井的性能。Bowker<sup>[2,12]</sup>认为裂缝是气藏成功的重要因素,但不是关键因素。Bowker<sup>[14]</sup>和 Montgomery 等<sup>[1]</sup>认为位于高裂缝发育区的井的产能往往最差。例如:在构造高点、局部断层或者被与喀斯特有关的塌陷包围的井,裂缝比较发育,但这些部位的井的生产能力比其他地区的要差,尤其是位于断层附近的井,常常表现为生产能力下降和含水提高。Montgomery 等<sup>[1]</sup>对岩心和生产方式的研究表明大裂缝在许多情况下对井的性能具有不利影响,这是因为它们的喉道被高矿化度的方解石所胶结,阻碍了流体的流动。

笔者经过分析认为:由于晚白垩世盆地抬升,高裂缝发育地区不利于超压的保持,压力较低,气体过早地从吸附态解析出来而变成游离态,导致游离态

气体体积含量多,吸附态气体体积含量少,并造成了绝对意义上的天然气减少(与裂缝不发育地区相比),游离态赋存的天然气很容易散失,吸附态气体体积含量少可直接导致井的稳产时间不长;而裂缝欠发育或不发育的地区则由于保持了轻微的超压,压力较大,气体被压缩在裂缝或孔隙中,以吸附态赋存的天然气也被压缩在吸附剂的表面,未能解析出来而有大的含气量。因此,最理想的钻井位置就是没有断裂和裂缝存在的地方,这些区域的含气量比较高(吸附气量也高),在进行压裂后,能获得很好的产能。由此也说明,Barnett 页岩气藏并不是一个“裂缝性气藏”,而是一个可以被压裂的页岩气藏。

(3)位于 Barnett 页岩上覆的 Marble Falls 组、Chappel 组(主要分布在 Newark East 气田西部)、夹层的 Forestburg 组以及其下伏的 Viola 组或 Simpson 组、Ellenburger 组等灰岩隔层的存在,形成了几套致密的隔板层,把大量的原始和诱发裂缝限制在 Barnett 页岩内部,不利于烃类的排出,却有利于页岩气井的生产(图 5-a, b<sup>[2,12]</sup>)。Viola 组或 Simpson 组是比高孔含水的 Ellenburger 组灰岩层更好的隔层,在 Newark East 气田外围,Viola 组或 Simpson 组灰岩层向西和南西方向尖灭,构成了 Newark East 气田的西部边界,阻止了诱发裂缝的产生以及高生产能力的 Barnett 页岩下段与天然裂缝发育且具喀斯特地貌、含有水的 Ellenburger 组灰岩层的直接接触。在西部和南部,Viola 组或 Simpson 组灰岩层缺失,Barnett 页岩直接覆盖在 Ellenburger 组灰岩层之上。在 Marble Falls 组等灰岩层缺失的地方,对钻井可能发生两种负面影响:①压裂的能量散失,即达不到压裂的效果,水力压裂的能量不能保存在富含天然气的 Barnett 页岩中,从而限制了井的产能;②诱发的裂缝可能进入多孔且富含水的 Ellenburger 组灰岩层中,使井的产能大大降低,导致很多的生产问题,如高盐度的水进入上覆的 Barnett 页岩,可能造成水淹等。所以说,Barnett 页岩及其上下地层的岩性和物性特征是 Barnett 页岩气藏被成功勘探开发的关键,是确定“甜点”的关键因素。最近,在这些地区(页岩上下被裂缝灰岩包围)的页岩气藏开发中,采用水平井技术可以在某种程度上减少这种伤害的影响。

这些致密灰岩层在一定程度上起到了“盖层”或“隔层”的作用,阻止了 Barnett 页岩的排烃,致使在 Barnett 页岩中保存了大量的烃类。这种上下被 Marble Falls 组、Ellenburger 组或 Viola 组或 Simpson 组以及中间夹层 Forestburg 组等致密灰岩层“封闭”的页岩层,成为一种独特的页岩气藏模式(图 6-c<sup>[2,12]</sup>)。这种成藏模式在北美其他盆地也得到了

证实。如阿巴拉契亚盆地的泥盆系 Marcellus 页岩,上下分别为 Tully、Onondaga 或 Huntersville 灰

岩层所“封闭”,并被 Pucell 灰岩层分为上下两段,是 Barnett 页岩气藏模式的又一佐证。

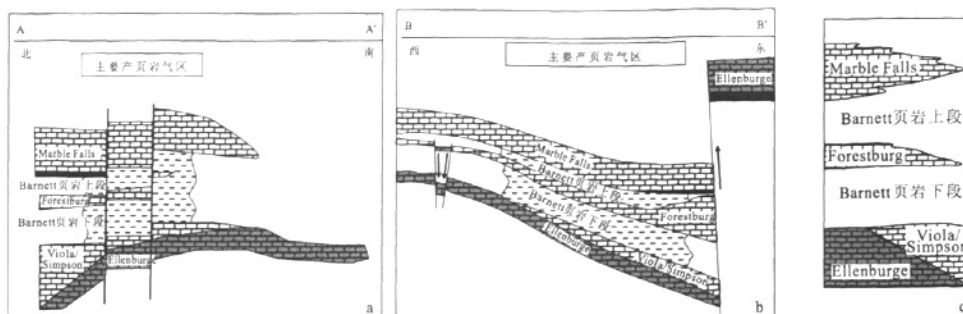


图5 福特沃斯盆地 Newark East 页岩气田剖面图<sup>[2,12]</sup>(a,b)(剖面位置见图2)和 Barnett 页岩气藏成藏模式图(c)(据文献<sup>[2,12]</sup>修改)

Fig. 5 The cross section of Newark East shale gas field(a, b) and the shale gas reservoir model (c) of the Barnett shale, Fort Worth Basin

#### 4 结语与启示

(1)福特沃斯盆地 Barnett 页岩气藏成为世界级的非常规页岩气藏,既有其偶然性,也有其必然性。高有机碳质量分数、轻微超压以及巨大数量的原地含气量和高吸附气量是 Barnett 页岩气藏成功成藏的关键因素。

(2)尽管致密的 Forestburg 组等灰岩层并不是勘探目标,但却形成了几套致密的隔板层,把水力压裂的动力限制在 Barnett 页岩上段和下段,形成页岩气藏生产必须的诱发裂缝。几套上覆、下伏或位于烃源岩夹层中心的灰岩层没有勘探的价值,而在位于其上和其下的页岩层中却发现大量的天然气资源,其中缘由值得进一步深入研究。

(3)Barnett 页岩气藏的成功勘探开发为美国及世界其他地区页岩气藏的勘探开发积累了大量的理论基础和丰富的经验教训,建立了 Barnett 页岩气藏模式,按照这种模式在马拉松—沃希托、阿巴拉契亚逆冲褶皱带前缘的黑勇士、阿科马、二叠以及阿巴拉契亚等盆地均发现了大量的页岩气资源。与 Barnett 页岩气藏勘探开发相关的理论和经验在我国页岩气的勘探开发中也将被证明是有价值的。

#### 参考文献:

[1] Montgomery S L, Jarvie D M, Bowker K A, et al. Mississippian Barnett Shale, Fort Worth Basin, north-central Texas: Gas-shale play with multi-trillion cubic foot potential[J]. AAPG Bulletin, 2005, 89(2): 155-175.  
[2] Bowker K A. Barnett Shale gas production, Fort Worth Basin: Issues and discussion[J]. AAPG Bulletin, 2007, 91(4): 523-533.

[3] EIA(Energy Information Administration). Annual energy review 2004[C/OL]// U. S. Department of Energy. Energy Information Administration report DOE/EIA-0384 (2004). 2005 August; 435. <http://www.eia.doe.gov/oiaf/aer> (accessed June 2006).  
[4] Martineau D F. History of the Newark East field and the Barnett Shale as a gas reservoir[J]. AAPG Bulletin, 2007, 91(4): 399-403.  
[5] Pollastro R M. Total petroleum system assessment of undiscovered resources in the giant Barnett Shale continuous(unconventional) gas accumulation, Fort Worth Basin, Texas[J]. AAPG Bulletin, 2007, 91(4): 551-578.  
[6] Pollastro R M, Jarvie D M, Hill R J, et al. Geologic framework of the Mississippian Barnett Shale, Barnett-Paleozoic total petroleum system, Bend arch-Fort Worth Basin, Texas [J]. AAPG Bulletin, 2007, 91(4): 405-436.  
[7] Tai D T W. Subsurface study of Atoka(lower Pennsylvanian) clastic rocks in parts of Jack, Palo Pinto, Parker, and Wise counties, north-central Texas[J]. AAPG Bulletin, 1979, 63(1): 50-66.  
[8] Thompson D M. Fort Worth Basin[M]// Sloss L L. The geology of North America. [S. l.]: Geological Society of America, 1988: 346-352.  
[9] Flippin J W. The stratigraphy, structure, and economic aspects of the Paleozoic strata in Erath County, north central Texas[M] // Martin C A. Petroleum geology of the Fort Worth basin and Bend arch area. [S. l.]: Dallas Geological Society, 1982: 129-155.  
[10] Hill R J, Jarvie D M, Zumbege J, et al. Oil and gas geochemistry and petroleum systems of the Fort Worth Basin[J]. AAPG Bulletin, 2007, 91(4): 445-473.  
[11] Jarvie D M, Hill R J, Pollastro R M. Assessment of the gas potential and yields from shales: The Barnett Shale model[C] // Cardott B J. Unconventional energy resources in the southern midcontinent, 2004 symposium. [S. l.]: Oklahoma Geological Survey Circular 110, 2005: 37-50.

- [12] Bowker K A. Recent development of the Barnett Shale play, Fort Worth Basin[J]. *West Texas Geological Society Bulletin*, 2003, 42(6): 4-11.
- [13] Pollastro R M, Hill R J, Jarvie D M, et al. Assessing undiscovered resources of the Barnett-Paleozoic total petroleum system, Bend arch-Fort Worth basin province[C]// Anon. *AAPG Southwest Section Convention*, Fort Worth, Texas. [S. l.]: [s. n.], 2003: 1-5.
- [14] Bowker K A. Recent developments of the Barnett Shale play, Fort Worth Basin[C]// Law B E, Wilson M. *Innovative gas exploration concepts symposium*. Denver, Colorado: Rocky Mountain Association of Geologists and Petroleum Technology Transfer Council, 2002: 16.
- [15] Henry J D. Stratigraphy of the Barnett Shale (Mississippian) and associated reefs in the northern Fort Worth Basin[M]// Martin C A. *Petroleum geology of the Fort Worth basin and Bend arch area*. [S. l.]: Dallas Geological Society, 1982: 157-178.
- [16] Cheney M G. Geology of north-central Texas[J]. *AAPG Bulletin*, 1940, 24(1): 65-118.
- [17] Jarvie D M, Hill R J, Ruble T E, et al. Unconventional shale-gas systems: The Mississippian Barnett Shale of north-central Texas as one model for thermogenic shale-gas assessment[J]. *AAPG Bulletin*, 2007, 91(4): 475-499.
- [18] Henk F, Breyer J, Jarvie D M. Lithofacies, petrology, and geochemistry of the Barnett Shale in conventional core and Barnett Shale outcrop geochemistry (Abs.) [C]// Brogden L. *Barnett shale symposium*, Fort Worth, Texas. [S. l.]: Oil Information Library of Fort Worth, 2000: 7.
- [19] Jarvie D M, Hill R J, Pollastro R M, et al. Evaluation of unconventional natural gas prospects: The Barnett Shale fractured shale gas model (Abs.) [C/CD]// Anon. *21st International Meeting on Organic Geochemistry* (Vol. 2). Krakow, Poland: CD-ROM, 2003: 3-4.
- [20] Pollastro R M, Hill R J, Jarvie D M, et al. Geologic and organic geochemical framework of the Barnett Paleozoic Total Petroleum System, Bend arch Fort Worth basin, Texas[C]// Anon. *AAPG Annual Meeting Program Abstracts* (Vol. 13) [S. l.]: [s. n.], 2004: 113.
- [21] Ewing T E. Mississippian Barnett Shale, Fort Worth Basin, North-central Texas: Gas-shale play with multi-tercf potential; Discussion[J]. *AAPG Bulletin*, 2006, 90(6): 963-966.
- [22] Corporation C E R. Geological, petrophysical and engineering analysis of the Barnett Shale in the Mitchell Energy Corporation T. P. Sims No. 2, Wise County, Texas[R]. Gas Research Institute Contract Report No. 5091-212-2242, 1992: 83.
- [23] Curtis J B. Fractured shale-gas systems[J]. *AAPG Bulletin*, 2002, 86(11): 1 921-1 938.
- [24] Zhao H. Thermal maturation and physical properties of Barnett Shale in Fort Worth Basin, north Texas (Abs.) [C]// Anon. *AAPG Annual Meeting Program Abstracts* (Vol. 13). [S. l.]: [s. n.], 2004: 154.
- [25] Matt M. Barnett Shale Gas-in-Place Volume including Sorbed and Free Gas Volume[C]// Anon. *AAPG Southwest Section Meeting*. Texas: Fort Worth, 2005. <http://www.fwgs.org/swsec/techsessions.htm>.
- [26] 张金川, 薛会, 张德明, 等. 页岩气及其成藏机理[J]. *现代地质*, 2003, 17(4): 466.
- [27] 张金川, 金之钧, 袁明生. 页岩气成藏机理和分布[J]. *天然气工业*, 2004, 24(7): 15-18.
- [28] 张金川, 聂海宽, 徐波, 等. 四川盆地页岩气成藏地质条件[J]. *天然气工业*, 2008, 28(2): 151-156.
- [29] 李新景, 胡蒙云, 程克明. 北美裂缝性页岩气勘探开发的启示[J]. *石油勘探与开发*, 2007, 34(4): 392-400.

## Shale Gas Reservoir Characteristics of Barnett Shale Gas Reservoir in Fort Worth Basin

NIE Hai-kuan, ZHANG Jin-chuan, ZHANG Pei-xian, SONG Xiao-wei

(Key Laboratory for Marine Reservoir Evolution and Hydrocarbon Accumulation Mechanism of Ministry of Education, China University of Geosciences, Beijing 100083, China)

**Abstract:** Barnett shale gas reservoir in Fort Worth Basin is the American biggest shale gas field which serves as essential factors of the petroleum accumulation system, such as source rock, seal rock, and reservoir existed in the same shale bed to a world-class unconventional natural gas accumulation (shale gas reservoir), is also the representative of American shale gas reservoirs. The paper studies the characteristics of Barnett shale gas reservoir in Newark East shale gas field. Barnett shale is relatively thick, organic rich, thermally mature, and enclosed by dense limestone units able to contain induced fractures. Also the research has obtained the shale gas reservoir model of Barnett shale. The gas reservoir characteristics and mode of Barnett shale gas reservoir should be of the universal significance in the foreland basin in the Ouachita and Appalachian thrust front.

**Key words:** shale gas; model; characteristics; Barnett shale; Fort Worth Basin