

北美典型克拉通盆地页岩气成藏特征、模式及启示

杨振恒¹, 韩志艳¹, 李志明¹, 聂海宽²

(1. 中国石化 油气成藏重点实验室, 江苏 无锡 214151; 2. 中国石化 石油勘探开发研究院, 北京 100083)

摘要:北美含页岩气克拉通盆地主要以密执安盆地、伊利诺斯盆地和德拉华盆地为代表。对上述盆地的岩性特征、有机质类型、生气方式、埋深、热成熟度、吸附气含量、裂缝对页岩气成藏的作用进行了探讨,梳理了北美克拉通盆地页岩气的两种成藏模式,分别以密执安盆地 Antrim 页岩气成藏模式(A型模式)和德拉华盆地 Barnett 页岩气成藏模式(B型模式)为代表。A型模式主要特征为:从盆地周缘较浅至较深部位赋存着具有生物成因和热成因的“二元”成因结构的天然气,依次从生物气过渡到混合气,最后为热成因气。B型模式主要特征为:页岩气生气方式为热成因天然气“原地”生成聚集,在不同成熟度的区域,产出不同热成因类型的天然气。结合我国克拉通盆地油气地质特征认为,德拉华盆地 Barnett 页岩气成藏模式(B型模式)对我国页岩气勘探更有意义,密执安盆地 Antrim 页岩气成藏模式(A型模式)对我国页岩气勘探的意义不能忽视。

关键词:成藏模式;热成因气;生物成因气;页岩气;克拉通盆地

中图分类号:TE121.1

文献标识码:A

Characteristics and patterns of shale gas accumulation in typical North American cratonic basins and their enlightenments

Yang Zhenheng¹, Han Zhiyan¹, Li Zhiming¹, Nie Haikuan²

(1. Key Laboratory of Petroleum Accumulation Mechanisms, SINOPEC, Wuxi, Jiangsu, 214151;

2. Exploration and Production Research Institute, SINOPEC, Beijing 100083)

Abstract: Michigan Basin, Delaware Basin and Illinois Basin are the typical cratonic basins with shale gas plays in North America. This paper analyzed shale gas reservoir lithology, organic matter type, hydrocarbon generation, burial depth, thermal maturity, adsorbed gas content and the role of fracture in shale gas accumulation. We summarized two shale gas accumulation patterns: the Antrim shale gas accumulation pattern in Michigan Basin (A-pattern) and the Barnett shale gas accumulation pattern in Delaware Basin (B-pattern). The primary features of A-pattern is that, from the shallow periphery to the deep basin, biogenic gas, mixed gas and thermogenic gas occur in sequence. The main characteristics of B-pattern are that the shale gas is of thermogenic origin and is indigenously generated and accumulated, Shale gas of different genetic types occur in areas with different thermal maturities. We suggested that the Barnett shale gas accumulation pattern (B-pattern) of Delaware Basin is of greater significance for shale gas exploration in China, and Antrim shale gas accumulation pattern in Michigan Basin (A-pattern) also cannot be ignored for shale gas exploration.

Key words: accumulation pattern, thermogenic gas, biogenic gas, shale gas, cratonic basin

作为源岩残余烃类的主要产物,页岩气的存在具有广泛的意义,页岩气为天然气在源岩层系内就近聚集的结果,表现为典型的“原地”成藏模式^[1]。美国已发现的页岩气盆地类型主要为前陆盆地和克拉通盆地。前陆盆地以阿巴拉契亚盆地、福特沃斯盆地和圣胡安盆地为代表^[2-12](图1)。同时在密执安盆地、伊利诺斯盆地和德拉华盆地为代表的克拉通盆地也发现了大量的页岩气,所发现的地质资源量和可采资源量分别占24.3%~34.4%和41.9%~50.4%^[2,4,13],克

拉通盆地页岩气产量在美国页岩气产量中占重要的地位。本文旨在对美国克拉通盆地发育的页岩气藏的特征及模式进行总结和探讨,以便能对指导我国克拉通盆地页岩气勘探有所启示和帮助。

1 地质演化及沉积建造

北美含页岩气的克拉通盆地主要为克拉通内部发育的简单的拗陷型盆地,一般称之为克拉通(内拗)盆

收稿日期:2013-01-20;修订日期:2013-07-08。

第一作者简介:杨振恒(1979—),男,工程师,非常规油气地质。E-mail:yangzh.syky@sinopec.com。

基金项目:国家自然科学基金项目(41202103)。

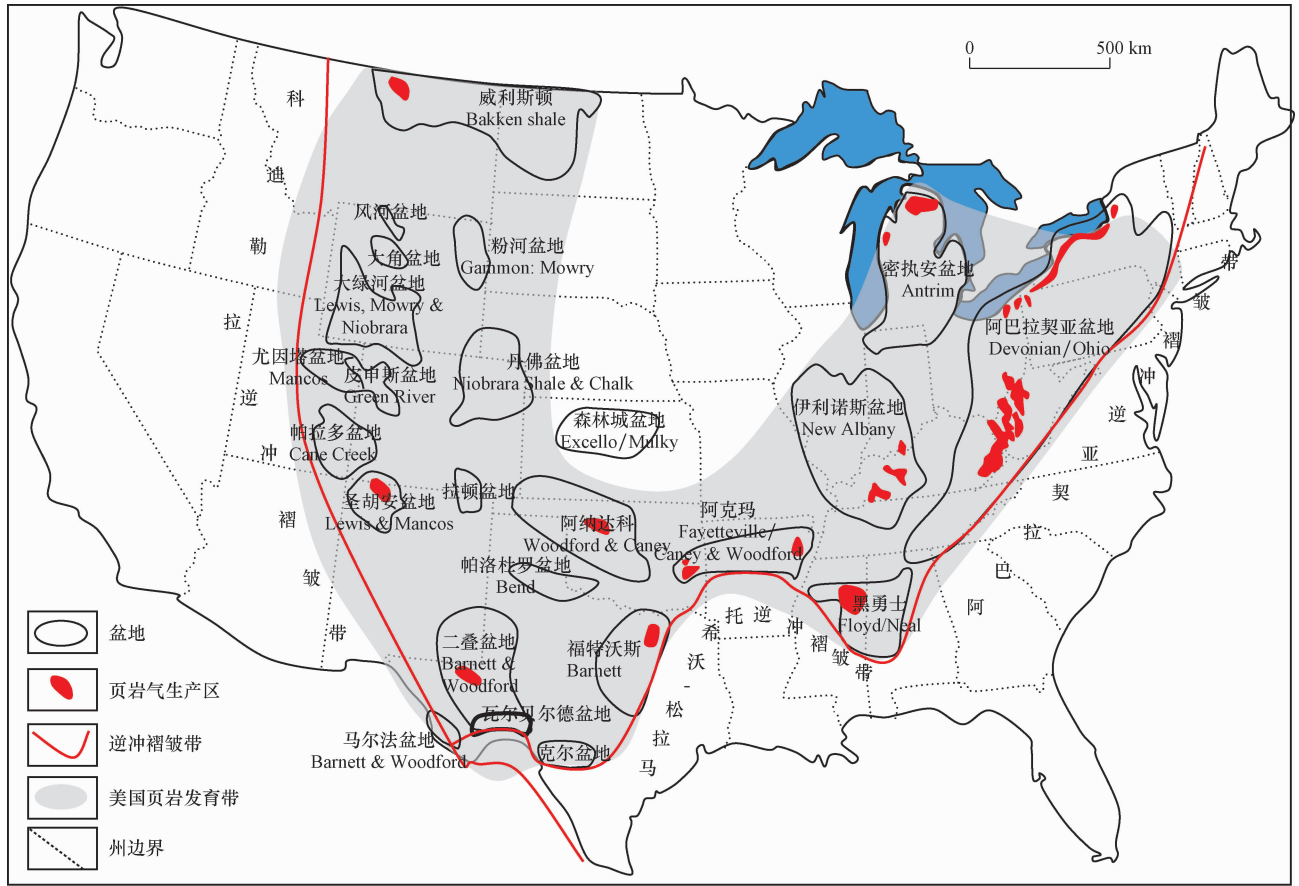


图 1 北美富含页岩气盆地分布^[13]

Fig. 1 Distribution of shale gas-rich basins in North America^[13]

地。这些盆地大致经历了相同的构造变形和接受相同的沉积建造^[13-14],富含页岩气的地层通常是对比层。盆地基底由前寒武系组成,如伊利诺斯盆地的基底由前寒武纪花岗岩、流纹岩和闪长岩组成。大部分此类盆地演化始于早、中寒武世超大陆裂解时期,从衰亡的裂谷拗拉槽或地堑开始,随后演化为克拉通海湾,即以“槽盆”的形态分布在克拉通边缘或者内部。在裂谷演化阶段后期,盆地进入热沉降阶段,在裂谷沉积地层上沉积了砂岩和碳酸盐岩地层。在中奥陶世到中密西西比世,主要为岩石圈伸展的构造均衡沉降阶段,如密西西比纪期间,德克萨斯西新墨西哥东南德拉华盆地位于北美克拉通中部大陆南部的一巨大的下古生界构造洼陷^[2]。

一般克拉通盆地伸展范围受早期裂谷范围的限制,沉积较缓慢,富含有机质的黑色页岩就是这一时期沉积的。密执安盆地含有一套巨厚的上泥盆统沉积层序,包括富含有机质的 Antrim 页岩。Antrim 页岩地层与晚泥盆世富含有机质的相似黑色页岩(如伊利诺斯盆地的 New Albany 页岩)为对比层,这两套页岩层序都是烃源岩^[4]。德拉华盆地从早中古生界开始沉降并接受了从寒武纪到密西西比纪的巨厚沉积后,在宾夕法尼亚纪晚期到白垩纪晚期的构造运动增多,盆地继续沉降,碳酸盐岩滩堆积于盆地边缘^[2]。碎屑沉积被

其后的碳酸盐岩滩包围,形成了一个饥饿性盆地^[2],也造成了盆地现今的构造形态。

2 成藏特征

2.1 页岩层岩性及有机质特征

北美克拉通盆地页岩气勘探主要层位为晚古生界泥盆系和石炭系,其中泥盆系的密西西比系为可对比层位,分布范围广,在岩性上非常类似。页岩气成藏泥页岩主要为暗色或者黑色的细颗粒沉积层,呈现薄层状或者块状,很多属于静水缺氧环境沉积的产物。北美典型页岩气发育区泥页岩有机碳含量相对较高,这是生烃潜力的重要保证,也为吸附储集天然气提供了有利条件。含有较多的硅质或钙质矿物,有机质类型主要为 I 型或者 II 型干酪根为主。

密执安盆地 Antrim 页岩由含黄铁矿薄层状粉砂质泥岩和富有机质页岩组成,夹灰色、绿色页岩和碳酸盐岩层。主要由 4 段组成,其中 Norwood 段和 Lachine 段有机质含量最高(总有机碳含量为 0.5%~24%),为最主要的页岩气勘探层系^[4]。干酪根类型以 I 型为主,可能源于塔斯马尼亚藻(Tasmanites),通常存在于 Antrim 页岩沉积的局限陆缘浅海中^[3-4]。伊利诺斯盆地 New Albany 页岩主要由富含有机质的岩石(主要是

炭质页岩)组成,另外含有碎屑岩(砂岩、粉砂岩和贫有机质的粉砂质页岩)和碳酸盐岩的旋回沉积。德拉华盆地从上 Barnett 页岩到下 Barnett 页岩,颜色从褐灰色变为黑色,页岩含有很高的有机质,其中较高的 D 层段有机碳含量平均为 4.4%^[2],而且容易破碎。上 Barnett 页岩和下 Barnett 页岩都含有一些黄铁矿和方解石。从岩石薄片上可见,下 Barnett 页岩的地层含有很多的钙质,到密西西比灰岩变成灰色薄层状页岩^[2]。

2.2 埋深及成熟度

北美克拉通盆地页岩气藏埋藏普遍较浅,但也不乏埋深相对较深的层位。伊利诺斯盆地 New Albany 页岩现今埋深 182~1 494 m^[4]。目前在该类盆地发现的页岩气藏埋深通常小于 1 000 m,伊利诺斯盆地 New Albany 页岩气藏和密执安盆地 Antrim 页岩气藏大约有 9 000 口井,深度范围为 200~610 m。由于埋深较浅,成熟度不高。但是,德拉华盆地 Barnett 页岩相对埋深较大。在盆地西部边界 Barnett 页岩深度约为 2 133 m,在盆地轴部区域深度较大,约为 5 486 m。经历了较高的热成熟度,而且某些区域受火山等热物质影响,在相对不深的区域呈现较高的热成熟度。

北美克拉通页岩气盆地(例如密执安盆地和伊利诺斯盆地)周缘成熟度相对较低,但也有成熟度高的盆

地(例如德拉华盆地),其热物质相对活动,成熟度主要受埋深控制,可能受到火山活动的影响。伊利诺斯盆地 New Albany 页岩成熟度为 0.4%~1.0%。用镜质体反射率(R_o)方法测得密执安盆地北缘 Antrim 页岩的热成熟度为 0.4%~0.6%^[4],表明热成熟度比较低(生油前)。然而,盆地中部 Antrim 页岩样品的 R_o 达到 1.0%^[4],足以生成石油。德拉华盆地三叠纪火山活动沿着先前的德拉华盆地西边缘 Laramide 构造带发生,并且影响到当地有机质的成熟度^[2]。在德拉华盆地 Reeves 县西南钻了第一口页岩气井并产出了少量的天然气(350 MMcf/d)和一些凝析油,这表明这一地区的热成熟度不高^[2]。在大部分区域,镜质体反射率随着深度的增加而增加。盆地中心较深部的镜质体反射率值为 1.60%~2.27%。但是,发现镜质体反射率的最大值在盆地西部较浅的区域。据 Barker 和 Pawlewicz 1987 年作图可知,这些异常的 R_o 高值很有可能与第三系当地的热侵入有关^[2](图 2)。

2.3 生气方式

以密执安盆地和伊利诺斯盆地为代表的北美克拉通盆地周缘以生物成因气为主,部分混入热成因气,但是在盆地中心较深的区域为热成因气,生物成因气和大气淡水淋滤渗透有直接关系。根据固-气-液系统

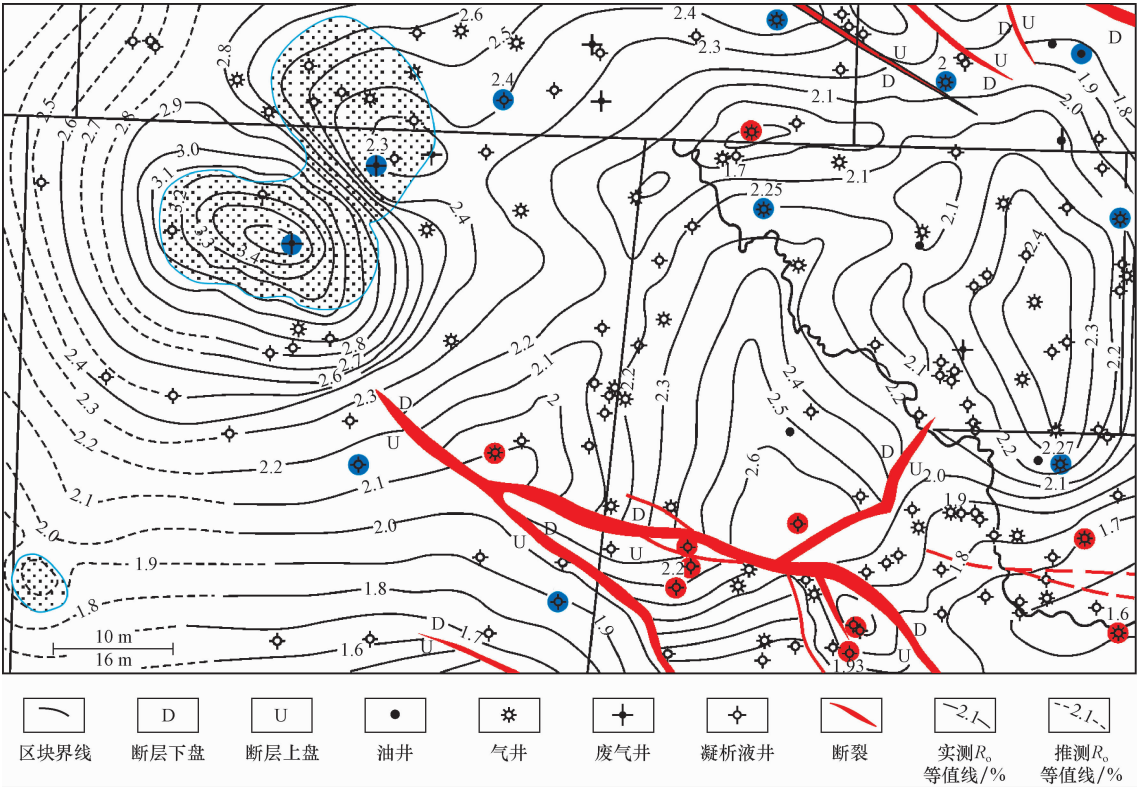


图2 德拉华盆地地下 Barnett 页岩镜质体反射率(R_o)等值线^[2]

Fig. 2 Vitrinite reflectance (R_o) contour map for the Lower Barnett shale in the Delaware Basin^[2]

(斑点状区域为受火山等热物质活动影响的区域;蓝色点是从 Pawlewicz 等(2005)获取数据的井;红色点是本次研究收集资料的井。)

中相关化学组分和同位素成分的变化,北美密执安盆地泥盆系黑色页岩——Antrim 页岩产出的天然气为微生物成因气和未成熟的热成因气(图 3)^[2,4]。在 Antrim 页岩中,有经济价值的微生物气藏位于盆地边缘附近,页岩热成熟度比较低,而且有淡水渗入渗透性裂缝网络^[4]。Martini 等认为裂缝发育和冰川作用之间存在动态关系,即多次冰席载荷形成的水力压头加速了先存天然裂缝的膨胀并使其中有雨水补给从而有利于生物成因气的生成^[4]。New Albany 页岩的天然气(认为是生物成因气和热成因气)生产伴有大量的地层水产出。水的存在似乎说明地层有一定的渗透性。这和密执安盆地 Antrim 页岩受淡水渗入裂缝性网络而有利于甲烷生物气的生成有一定的类似,但现在没得到证实。同样,伊利诺斯盆地 New Albany 页岩与密执安盆地 Antrim 页岩的生气方式以及生物气和热成因气的分布具有相似性。

在德拉华盆地从 Fasken 州 36-1 井可知,天然气碳同位素值表明天然气是油的伴生气。评价 Barnett 页岩生气和生油结果表明,在主要的第一次干酪根裂解过程中生成了 70% 的油和 30% 的气^[2]。进一步的研究表明,德拉华盆地 Barnett 页岩大部分处于生气窗内,有少部分处于生油窗内。在研究区南边 Dallas Production 钻了有两口井,产出了部分油,有伴生气,并且含有凝析油,在这些井中, Barnett 页岩深度不足 3 048 m,成熟度也较低,天然气主要为生油过程中的伴生气。研究区内,镜质体反射率随着深度的增加而增加。盆地中心较深部的镜质体反射率值为 1.60%~2.27%,干酪根裂解生气。但是,发现镜质体反射率的最大值在盆地西部较浅的区域^[2]。在那里,天然气主要源于干酪根的裂解生气或者石油的裂解生气。

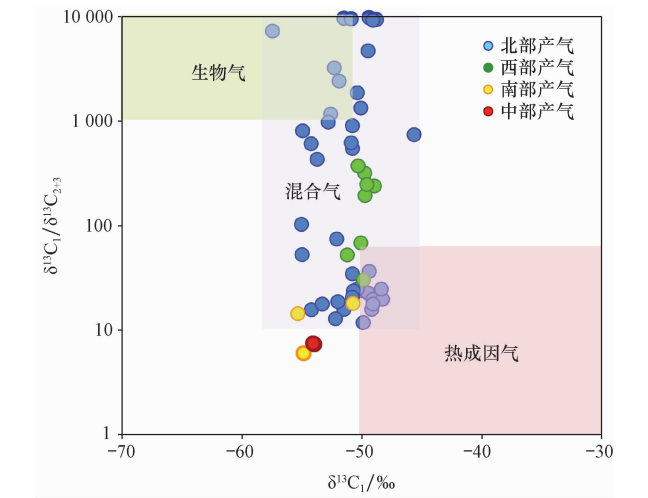


图 3 密执安盆地 Antrim 页岩气成因划分^[2,4]
Fig. 3 Genetic types of Antrim shale gas in the Michigan Basin^[2,4]

表 1 北美克拉通盆地与前陆盆地吸附气含量对比^[2-6,13]
Table 1 Comparison of adsorbed gas content between cratonic basins and foreland basins in North America^[2-6,13]

盆地名称	克拉通盆地			前陆盆地		
	密执安盆地	伊利诺斯盆地	德拉华盆地	福特沃斯盆地	阿巴拉契亚盆地	圣胡安盆地
吸附气含量/%	70	40~60	~50	20	50	60~85

2.3 吸附气含量

相对于造山带前的前陆盆地而言,北美克拉通盆地埋藏比较浅,现今地层温度并不高,这有利于吸附更多的天然气^[15]。气体饱和度较低,相应的吸附气含量较高,一般大于 50%^[13]。如密执安盆地 Antrim 页岩气藏的吸附气含量高达 70%。伊利诺斯盆地 New Albany 页岩气吸附气含量约为 40%~80%。德拉华盆地 Barnett 页岩气吸附气含量在 50% 左右(表 1)。3 个典型的克拉通盆地的页岩气吸附量占总含气量的比例总体较福特沃斯、阿巴拉契亚和圣胡安盆地要大。

2.4 裂缝系统及其作用

早期裂缝为大气淡水的淋滤渗透提供了通道,雨水补给从而有利于生物成因气的生成,这是克拉通盆地页岩气生成的一个条件之一。例如密执安盆地分布在 Antrim 页岩中的裂缝网络充当了流体的储集空间和通道,因此在隐伏露头附近发生了流体运移和大气补给。盆地北缘和西缘的冰川冰碛物形成的区域性地形隆起为大气补给提供了液压压力。冰川融水大大促进了伊利诺斯盆地东缘同时代的 New Albany 页岩的生物生成甲烷的作用。在与 Antrim 页岩相当的 New Albany 页岩中可观察到地层水中类似的地球化学特征和气体化学性质^[4]。

后期裂缝是储存天然气的主要空间,密执安盆地 Antrim 页岩中的天然气是自生自储气藏。估计 Antrim 页岩中大约 20%~25% 的产出气是赋存于页岩内的裂缝和孔隙中^[4]。New Albany 页岩气裂缝和孔隙的赋存的天然气比例更大,估计在 50% 左右。另外,无论是闭合的裂缝还是开启的裂缝,都是页岩气开采时的良好的输导体系的一部分。密执安盆地 Antrim 页岩中区域性的发育天然裂缝,可能形成于深埋期间。主要存在两组共轭裂缝,一组为北东走向,另一组为北西走向。两组裂缝几乎为垂直的。已观察到两组裂缝贯穿于整个泥盆系剖面 and 盆地北缘。在密执安盆地周围也存在类似裂缝^[4]。这是水和气的良好通道,在页岩气勘探中,地质条件相似的情况下,裂缝发育的区域往往是勘探的首选区域。

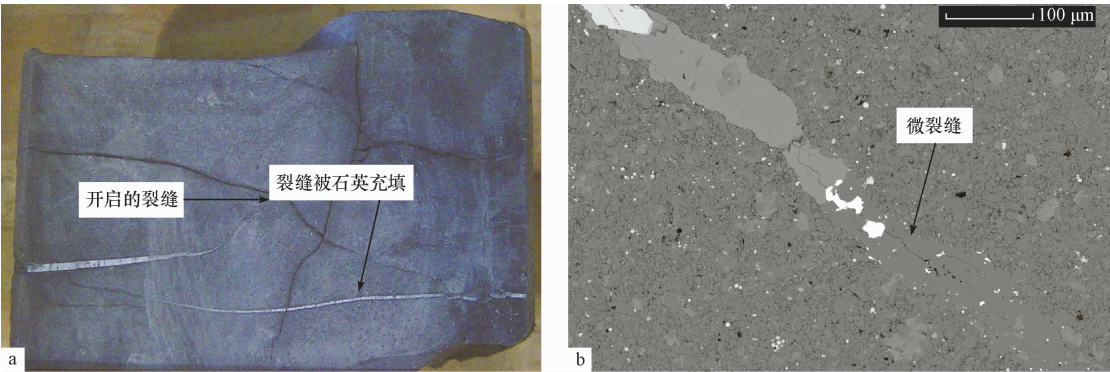


图 4 德拉华盆地 Barnett 页岩裂缝照片^[17]

Fig. 4 Fracture photos of Barnett shale in Delaware Basin^[17]

相对于密执安盆地和伊利诺斯盆地而言,德拉华盆地裂缝系统主要起的作用为天然气储存的主要空间和为天然气开采的良好输导体系^[2]。在德拉华盆地 Barnett 页岩中,发现了大量的开启的天然裂缝,这一方面增加了天然气的储存空间,同时为天然气良好的输导通道,另外,在页岩气开采过程中,开启的裂缝是压裂工艺实施的主要考虑因素之一。同时发现了很多封闭的裂缝,主要被石英或者方解石充填,对实施压裂工艺产生重要的影响(图 4)。

3 页岩气成藏模式

3.1 密执安盆地 Antrim 页岩气成藏模式 (A 型模式)

密执安盆地 Antrim 页岩气成藏特征具有北美克拉通页岩气成藏的一般性与典型性。在盆地的周缘比较浅的部位赋存着具有热成因和生物成因的“二元”成因的天然气,气藏呈环状分布。在其附近,页岩在盆地边缘隐伏于冰川沉积物之下。生物气是在冰川作用期间和以后生成的,热成因气在深部生成并随周缘的裂缝运移到较浅的部位(图 5)。其成藏模式可作为一种克拉通页岩气成藏的典型模式,伊利诺斯盆地页岩气成藏模式与密执安盆地具有类似性。

岩在盆地边缘隐伏于冰川沉积物之下。生物气是在冰川作用期间和以后生成的,热成因气在深部生成并随周缘的裂缝运移到较浅的部位(图 5)。其成藏模式可作为一种克拉通页岩气成藏的典型模式,伊利诺斯盆地页岩气成藏模式与密执安盆地具有类似性。

密执安克拉通盆地的构造形态为四周高、中间低;富含有机质的页岩在盆地逐渐埋深,但在盆地周缘处于相对较浅的层位,甚至在盆地周缘都有出露;同时,盆地边缘处于构造活动相对比较强烈,容易形成不同级别的裂缝,这些裂缝可以成为早期大气淡水的淋滤渗透的通道,淡水由盆地边缘注入,雨水补给从而有利于生物成因气的生成。在向盆地中心的区域,由于埋深的增加和火山等热物质的作用,成熟度相对较高,形成热成因的天然气。而且这种热成因的天然气会顺着沟通上、下地层的断裂运移到上面的地层,与盆地周缘生物成因气混合,因此周缘赋存的天然气具有生物成因和热成因的“二元”成因特征。可以推测的是,如果有沟通深部的大的断裂的存在,地幔内部的气体顺着

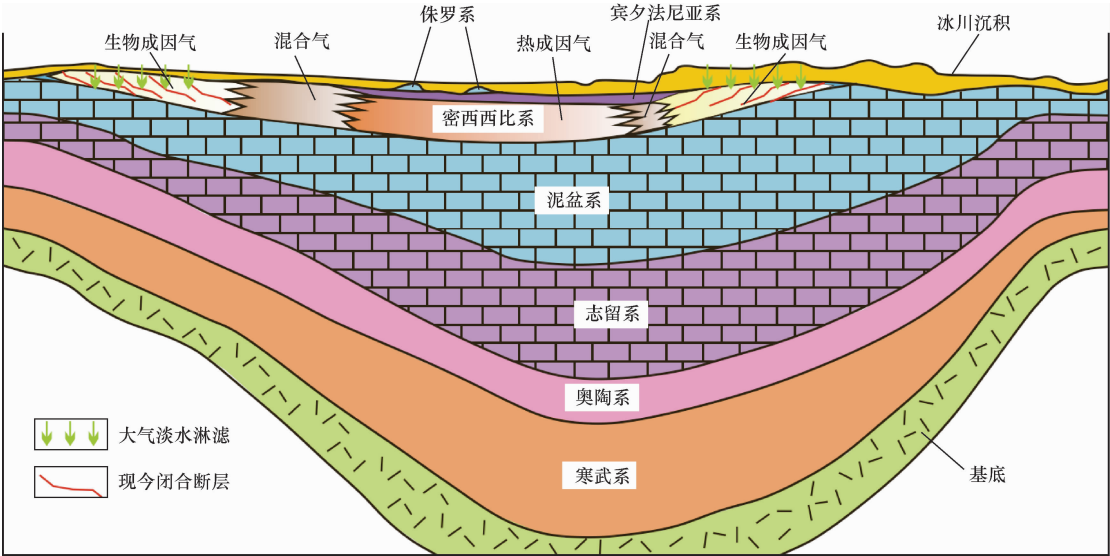


图 5 密执安盆地 Antrim 页岩气成藏模式

Fig. 5 Gas accumulation pattern of Antrim shale in Michigan Basin

大断裂向上运移,在浅层的地层会有“幔源气”存在。Comer 等通过对伊利诺斯盆地 New Albany 页岩气藏甲烷气体的碳同位素分析,发现来自盆地南部深层的天然气都是热成因,而来自盆地北部相对浅层的天然气为热成因和生物成因的混合,为高、低成熟度混合的页岩气藏^[13]。值得一提的是密歇根盆地北缘泥盆系的裂缝型页岩气为晚期生物气生成系统,是在源岩和储层沉积以后隔很长一段时间才生成的,成藏的关键时期应为近代,现在天然气还在继续生成^[18]。

3.2 德拉华盆地 Barnett 页岩气成藏模式 (B 型模式)

相对于密执安盆地 Antrim 页岩气成藏模式和伊利诺斯盆地页岩气成藏模式而言,德拉华盆地 Barnett 页岩气成藏模式比较单一和简单。Barnett 页岩由于埋藏较深,从 2 000 m 到 5 500 m,成熟度较高,大部分区域镜质体反射率在 1.0% 以上,盆地中心较深部的镜质体反射率值为 1.60% ~ 2.27%,由于受火山等热物质的影响,部分区域的镜质体反射率达到了 3.0% 以上。德拉华盆地页岩气系统保存条件相对优良,在缺少生物气生气条件的基础上,德拉华盆地的页岩气生气方式为热成因天然气“原地”生成聚集的结果。在成熟度较高的区域($R_o > 1.2\%$),产出热成因的天然气,主要为生油过程中的伴生气、进入生气窗的干酪根裂解生气甚至为原油裂解生气。在成熟度较低的区域($R_o < 1.2\%$)的一些地区,产出凝析油,并且伴随较少的天然气,这些地区并且缺少热物质(例如火山)的活动,大量湿气的出现和碳同位素值表明天然气源于油的伴生气(图 6)。

4 启示

北美克拉通盆地两种典型的页岩气藏特征及成藏模式对我页岩气勘探具有参照和指导意义。特别是德拉华盆地 Barnett 页岩气成藏模式(B 型模式)。在这一模式中,大部分泥页岩层埋藏较深,相对热成熟度较大,整体上 R_o 大于 1.0%,局部区域受火山等热物质作用,页岩出现热成熟度异常。天然气成因主要为生油过程中的伴生气、进入生气窗的干酪根生气甚至为裂解气。我国四川盆地和鄂尔多斯盆地等克拉通盆地与德拉华盆地具有类似的特征,四川盆地龙马溪组页岩的热成熟度为 1.0% ~ 2.5%,五峰组热成熟度为 0.8% ~ 1.9%,同样鄂尔多斯盆地太原组页岩的热成熟度为 0.30% ~ 1.50%,延长组页岩热成熟度为 1.0% ~ 5.28%,这些优质泥页岩可以生成成油伴生气和干酪根热解气。同时四川盆地和鄂尔多斯盆地都不同程度的受火山等热物质的影响和作用^[18-21],形成局部区域页岩热成熟度较高的特点,这些区域可能生成原油裂解气。B 型模式的本质是页岩层埋藏较深,成熟度较大,局部地区受火山等热物质作用,在不同区域可以生成干酪根热裂解和原油热裂解生成的天然气,对于我国其他类型的盆地页岩气勘探也具有指导意义。

同时,密执安盆地 Antrim 页岩气成藏模式(A 型模式)对我国页岩气勘探的意义仍然不能够忽视,页岩遭受大气淡水淋滤后经合适的条件容易生成生物气,这可能是对我国热成因页岩气的有利补充。同时,必

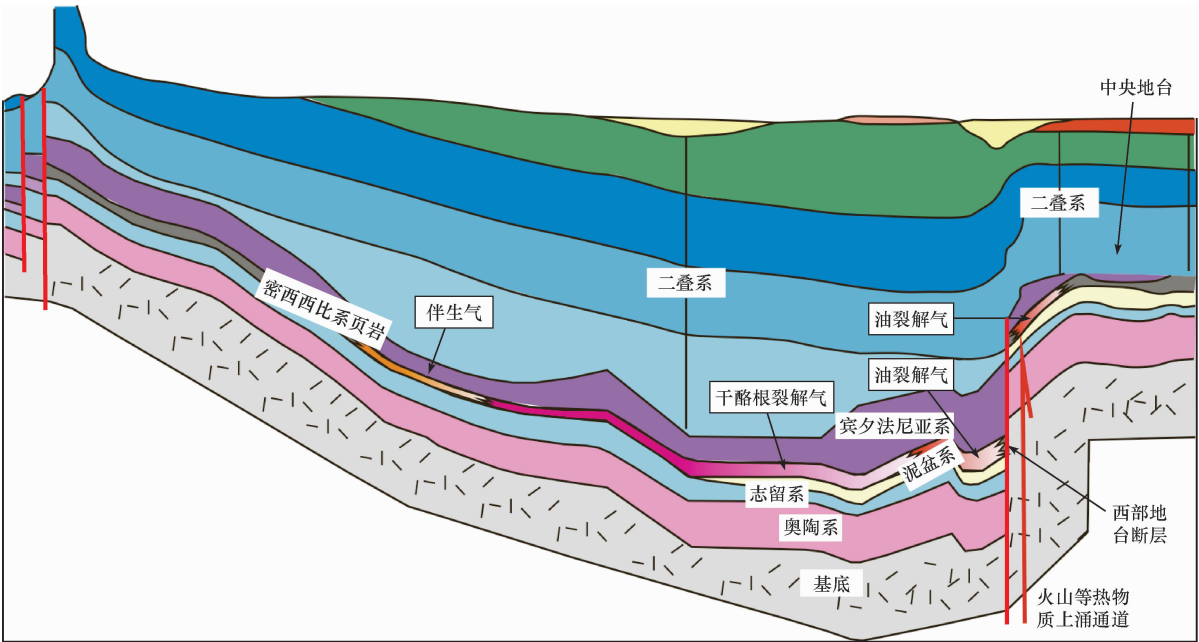


图 6 德拉华盆地 Barnett 页岩气成藏模式

Fig. 6 Gas accumulation pattern of Barnett shale in the Delaware Basin

表2 北美典型克拉通盆地与中国主要克拉通盆地页岩特征对比^[6-10,13,22-28]

Table 2 Comparison of gas shale characteristics between the typical North America and Chinese cratonic basins ^[6-10,13,22-28]								
地区	盆地	页岩名称	页岩层位	TOC/%	有机质类型	R _o /%	页岩厚度/m	成藏模式
北美	密执安盆地	Antrim	泥盆系	0.30~24.00	I型	0.40~0.60	50	A型
	伊利诺斯盆地	New Albany	泥盆系	1.00~25.00	II型	0.40~0.80	30~140	
	德拉华盆地	Barnett	下石炭统	0.90~6.90	II型	0.54~3.06	25~110	B型
中国	四川盆地	龙马溪组	下志留统	0.50~4.92	I型	0.80~2.40	30~120	B型,尝试性探索A型
		五峰组	上奥陶统	0.60~2.00	I	1.00~2.50	5~30	
		筇竹寺组	下寒武统	0.60~2.00	I	2.00~4.50	20~200	
	鄂尔多斯盆地	太原组	石炭系	0.30~1.50	II型	1.00~2.00	10~35	B型,尝试性探索A型
		延长组	三叠系	1.00~5.28	I型,II型	>1.00	300~500	

须认识到我国页岩成熟度较高,但是在盆地周缘地区,埋藏较深的页岩经后期地质构造运动抬升,页岩内部可以形成具有渗透性的网络,遭受大气淡水淋滤后具备形成次生生物气的可能^[22]。其可以在我国四川盆地和鄂尔多斯盆地进行页岩气勘探中进行尝试性的探索,特别是在盆地周缘,在发育适度裂缝优质页岩层系的地区,如果具备大气淡水淋滤的条件,是勘探生物成因页岩气的有利区域(表2)。

5 结语

- 1) 北美典型克拉通盆地页岩气成藏页岩主要以优质的海相成因的富含硅质的页岩组成,埋深从较浅至中等埋深,有机质成熟度从未成熟到过成熟阶段,具有生物成因气和热成因气两种生气方式,吸附气含量相对较高,在含有生物成因气的盆地中,裂缝早期具有沟通大气淡水和页岩的作用,致使生物气生成,在后期,裂缝为天然气储存的主要空间,为天然气开采提供良好输导体系。
- 2) 密执安盆地 Antrim 页岩气成藏模式主要特征为盆地周缘比较浅至较深的部位赋存着具有生物成因和热成因的“二元”成因结构的天然气,依次从生物气过渡到混合气,最后为热成因气。德拉华盆地 Barnett 页岩气成藏模式主要特征为页岩气生气方式为热成因天然气“原地”生成聚集,在不同成熟度的区域,产出不同热成因类型的天然气。对比密执安盆地 Antrim 页岩气成藏模式和德拉华盆地 Barnett 页岩气成藏模式,主要由于页岩埋深经历的热成熟度不同、不同热物质(例如火山作用)以及是否具有合适的大气淡水淋滤条件所致。
- 3) 对比四川盆地和鄂尔多斯盆地优质页岩发育及热成熟度特征表明,德拉华盆地 Barnett 页岩气成藏模式(B型模式)对我国克拉通盆地页岩气勘探具有较强的指导意义,同时,密执安盆地 Antrim 页岩气成藏模式(A型模式)对我国克拉通盆地页岩气勘探具有探索性指导意义。

致谢:中石化石油勘探开发研究院无锡石油地质研究所刘文汇首席专家对本文提出宝贵意见,特此表示感谢!

参 考 文 献

[1] 张金川.我国页岩气富集类型及资源特点[J].天然气工业,2009,29(12):109-114.
Zhang Jinchuan. Accumulation types and resources characteristics of shale gas in China[J]. Nature Gas Industry, 2009, 29(12): 109-114.

[2] Kinley T J, Cook L W, Breyer J A, et al. Hydrocarbon potential of the Barnett Shale (Mississippian), Delaware Basin, west Texas and southeastern New Mexico[J]. AAPG Bulletin, 2009, 93(7): 857-889.

[3] Loucks R G, Ruppel S C. Mississippian Barnett shale: lithofacies and depositional setting of a deep-water shale-gas succession in the Fort Worth Basin, Texas[J]. AAPG Bulletin, 2007, 91(4): 579-601.

[4] Curtis J B. Fractured shale-gas systems[J]. AAPG Bulletin, 2002, 86(11): 1921-1938.

[5] 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.

[6] Pollastro R M. 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] Dariusz S, Maria M, Arndt S, et al. Geochemical constraints on the origin and volume of gas in the New Albany Shale (Devonian-Mississippian), eastern Illinois Basin[J]. AAPG Bulletin, 2010, 94(11): 1713-1740.

[8] Scott L, Montgomery, Daniel M, 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.

[9] Norelis D, Rodriguez, Paul Philp R. Geochemical characterization of gases from the Mississippian Barnett shale, Fort Worth Basin, Texas[J]. AAPG Bulletin, 2010, 94(11): 1641-1656.

[10] Anna M, Martini, Lynn M, et al. Identification of microbial and thermogenic gas components from Upper Devonian black shale cores, Illinois and Michigan Basins[J]. AAPG Bulletin, 2008, 92(3): 327-339.

[11] Zhu Yaping, Liu Enru, Alex M, et al. Understanding geophysical responses of shale-gas plays[J]. The Leading Edge, 2011, 30(3): 332-

- 338.
- [12] Roger M, Slatt, Younane A. Merging sequence stratigraphy and geo-mechanics for unconventional gas shales [J]. The Leading Edge, 2011, 30(3): 274–282.
- [13] 聂海宽, 张金川. 页岩气藏分布地质规律与特征[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2010, 42(2): 1–9.
Nie Haikuan, Zhang Jinchuan. Shale gas reservoir distribution geological law, characteristics and suggestions [J]. Journal of Central South University (Science and Technology Edition), 2010, 42(2): 1–9.
- [14] 谢方克, 蔡忠贤. 克拉通盆地基底结构特征及油气差异聚集浅析[J]. 地球科学进展, 2003, 18(4): 561–568.
Xie Fangke, Cai Zhongxian. The primary study of basement structure and difference of hydrocarbon reservoir in Cratonic Basin [J]. Advance in Earth Sciences, 2003, 18(4): 561–568.
- [15] 杨振恒, 李志明. 页岩气成藏条件及我国黔南坳陷页岩气勘探前景浅析[J]. 中国石油勘探, 2009, 14(3): 24–28.
Yang Zhenheng, Li Zhiming. Shale gas accumulation conditions and exploration prospect in Southern Guizhou Depression [J]. China Petroleum Exploration, 2009, 14(3): 24–28.
- [16] 林春明, 李艳丽, 漆滨汶. 生物气研究现状与勘探前景[J]. 古地理学报, 2006, 8(3): 317–330.
Lin Chunming, Li Yanli, Qi Binwen. Research status and exploration potential of biogenic gas [J]. Journal of Palaeogeography, 2006, 8(3): 317–330.
- [17] Gale J F, Holder J. Natural fractures in shales: origins, characteristics and relevance for hydraulic fracture treatments [Z]. AAPG 2008 Annual Convention and Exhibition Abstracts, 2008.
- [18] 杨恒书, 赖旭龙. 四川隆康, 塔藏含火山岩地层时代新证据[J]. 中国区域地质, 1995, 14(1): 71–75.
Yang Hengshu, Lai Xulong. New evidence for the age of the volcanics-bearing strata in Longkang and Tazang, Sichuan [J]. Regional Geology of China, 1995, 14(1): 71–75.
- [19] 曾宜君, 黄思静, 熊昌利, 等. 川西色达早侏罗世郎木寺组火山岩特征及构造意义[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2009, 36(1): 78–86.
Zeng Yijun, Huang Sijing, Xiong Changli, et al. Characteristics and tectonic significance of the Lower Jurassic Langmusi Formation volcanic rocks in Seda, West Sichuan, China [J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 2009, 36(1): 78–86.
- [20] 郑翻身, 康屹青, 康红在, 等. 鄂尔多斯古陆核内部中生代晚期火山岩的发现及其地质意义[J]. 地质力学学报, 2009, 15(1): 69–76.
Zheng Fanshen, Kang Yiqing, Kang Hongzai, et al. Discovery of late mesozoic magmatic rocks in ordos ancient continent nucleus and its geological implication [J]. Journal of Geomechanics, 2009, 15(1): 69–76.
- [21] 左智峰, 戚颖, 葛小瑞, 等. 鄂尔多斯盆地晚三叠世火山物质对油气成藏条件的影响[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2008, 44(3): 12–15.
- Zuo Zhifeng, Qi Ying, Ge Xiaorui, et al. Effect of late triassic volcanic sediment event on hydrocarbon accumulation conditions in Ordos Basin [J]. Journal of Lanzhou University (Natural Sciences Edition), 2008, 44(3): 12–15.
- [22] 李先奇, 张水昌, 朱光有, 等. 中国生物成因气的类型划分与研究方向[J]. 天然气地球科学, 2005, 16(4): 477–486.
Li Xianqi, Zhang Shuichang, Zhu Guangyou, et al. Types and research direction of biogenic gas in China [J]. Natural Gas Geoscience, 2005, 16(4): 477–486.
- [23] 付小东, 秦建中, 腾格尔. 四川盆地东南部海相层系优质烃源层评价——以丁山1井为例[J]. 石油实验地质, 2008, 30(6): 621–628.
Fu Xiaodong, Qing Jianzhong, Tenger. Evaluation on excellent marine hydrocarbon source layers in southeast area of the Sichuan Basin—an example from well Dingshan-1 [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2008, 30(6): 621–628.
- [24] 何自新. 鄂尔多斯盆地演化与油气[M]. 北京: 石油工业出版社, 2003: 23–124.
He Zixin. Evolution and oil-gas of Ordos Basin [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2003: 23–124.
- [25] 陈全红, 李文厚, 姜培海, 等. 鄂尔多斯盆地西南部上古生界油气成藏条件分析[J]. 石油实验地质, 2007, 29(6): 554–559.
Chen Quanhong, Li Wenhui, Jiang Peihai et al. The analysis of hydrocarbon accumulation condition of upper Palaeozoic of the south-west Ordos basin [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2007, 29(6): 554–559.
- [26] 赵林, 夏新宇, 戴金星, 等. 鄂尔多斯盆地上古生界天然气富集的主要控制因素[J]. 石油实验地质, 2000, 22(2): 136–139.
Zhao Lin, Xia Xinyu, Dai Jinxing, et al. Major factors controlling the enrichment of the Upper Paleozoic natural gas in the Ordos Basin [J]. Experimental Petroleum Geology, 2000, 22(2): 136–139.
- [27] 聂海宽, 张金川, 包书景, 等. 四川盆地及其周缘上奥陶统—下志留统页岩气聚集条件[J]. 石油与天然气地质, 2012, 33(3): 335–345.
Nie Haikuan, Zhang Jinchuan, Bao Shujing, et al. Shale gas accumulation conditions of the Upper Ordovician-Lower Silurian in Sichuan Basin and its periphery [J]. Oil & Gas Geology, 2012, 33(3): 335–345.
- [28] 刘伟, 余谦, 闫剑飞, 等. 上扬子地区志留系龙马溪组富有机质泥岩储层特征[J]. 石油与天然气地质, 2012, 33(3): 346–352.
Liu Wei, Yu Qian, Yan Jianfei, et al. Characteristics of organic-rich mudstone reservoirs in the Silurian Longmaxi Formation in Upper Yangtze region [J]. Oil & Gas Geology, 2012, 33(3): 346–352.
- [29] 曹婷婷, 徐思煌, 王约, 等. 四川盆地南江杨坝地区下寒武统烃源岩形成的地球生物学条件[J]. 石油与天然气地质, 2011, 32(1): 11–16.
Cao Tingting, Xu Sihuang, Wang Yue, et al. Geobiological conditions for the formation of the Lower Cambrian source rocks in Yangba area of Nanjiang County in the Sichuan Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2011, 32(1): 11–16.

(编辑 张亚雄)