

浅析页岩气成藏模式

邢恩袁 庞雄奇 欧阳学成 郭继刚

(中国石油大学(北京) 北京 102249)

摘要:目前我国对页岩气藏的勘探开发技术理论尚未成熟。本文通过对页岩气国内外研究进展调研,结合我国非常规油气勘探思路,总结了页岩气的生气条件、运移机制、储集机制、构造条件,分析了页岩气的成藏机制。明确了页岩气的顶、底“挡板”是大规模页岩气藏形成的重要条件。进一步论证了我国陆相盆地地质条件下形成大型页岩气藏存在的可能性,提出了以“T-B, F, S”的成藏预测模式,可作为指导页岩气富集区勘探的新思路。

关键词:页岩气 成藏条件 成藏模式

页岩气,是指主体位于暗色泥页岩或高碳泥页岩中,以吸附或游离状态为主要存在方式的天然气聚^[1]。页岩气作为一种非常规天然气资源,具有资源量大、含气面积广泛、生产寿命长、产量稳定等特点,已经越来越被人们所重视,国内外对页岩气的研究力度也日趋加强。在我国西部,如四川盆地等均有页岩气成藏的地质条件,南方海相页岩地层可能存在丰富的页岩气^[2]。随着我国和世界能源需求量快速增长,页岩气勘探在未来的油气勘探工作中将越来越重要。

1 页岩气成藏条件

页岩气的成藏条件主要包括以下几点:生气条件;运移机制;储集体;圈闭机制;天然气存在状态,等等。本文拟从以上几个方面为研究基础,分别从内因、外因角度来讨论二者的相似性和本质区别,意在能够通过内外因分析,从根本上指出页岩气的本质特征。

1.1 生气条件

页岩气具有如下基本特征^[1]:(1)烃源岩岩性多为沥青质或富含有机质的暗色、黑色泥页岩(高碳泥页岩类),岩石组成一般为30%~50%的粘土矿物、15%~25%的粉砂质(石英颗粒)和1%~20%的有机质,干酪根类型从I型~III型均有发育,但以I型和II型为主,多为暗色泥岩与浅色粉砂岩的薄互层;(2)页岩气形成的成熟度范围较宽,既有生物气、未熟—低熟气、热解气,又有原油、沥青裂解气,TOC介于0.4%~25%之间,且与页岩产气率之间有良好的线性关系^[3],镜质体反射率介于0.4%~2%之间。这说明泥页岩至少要进入成熟阶段才能进入成藏阶段,并间接地说明了页岩气必须是自生自储的。

1.2 运移机制

页岩气的运移机制是膨胀力作用下的运移^[2],天然气运移的目的地有可能是页岩内部,也有可能是页岩外部的储集层,这取决于页岩与上覆岩层的连通性和上覆岩层的孔渗条件。

如果具有生排烃能力的泥页岩上下岩层封闭性差，那么它就成为了传统意义上的烃源岩，不能称之为页岩气藏。

1.3 储集体

含气的页岩本身既是气源岩又是储集层，页岩的总孔隙度一般小于 10%，而含气的有效孔隙度一般只有 1%~5%，渗透率则随裂缝发育程度的不同而有较大的变化^[4]。页岩气在储层中以吸附或游离状态为主要存在方式^[1]。

(1) 矿物学特征。

在页岩的矿物组分中，TOC 的大小可以从一定程度上表征着页岩对天然气的吸附能力^[5]。由于 TOC 的大小直接影响页岩的吸附能力，且它的大小变化会使页岩的吸附气量产生数量级的变化，如 Big Sandy 气田泥盆系页岩 TOC 与甲烷吸附气含量关系（图 1）^[6,7]。此外，页岩中硅质矿物含量还对页岩气裂缝的形成有重要的影响，这直接影响到页岩的产气能力。李新景等对北美页岩气研究中发现，有机质、石英含量都很高的页岩脆性较强，容易在外力作用下形成天然裂缝和诱导裂缝，有利于天然气渗流^[7]。

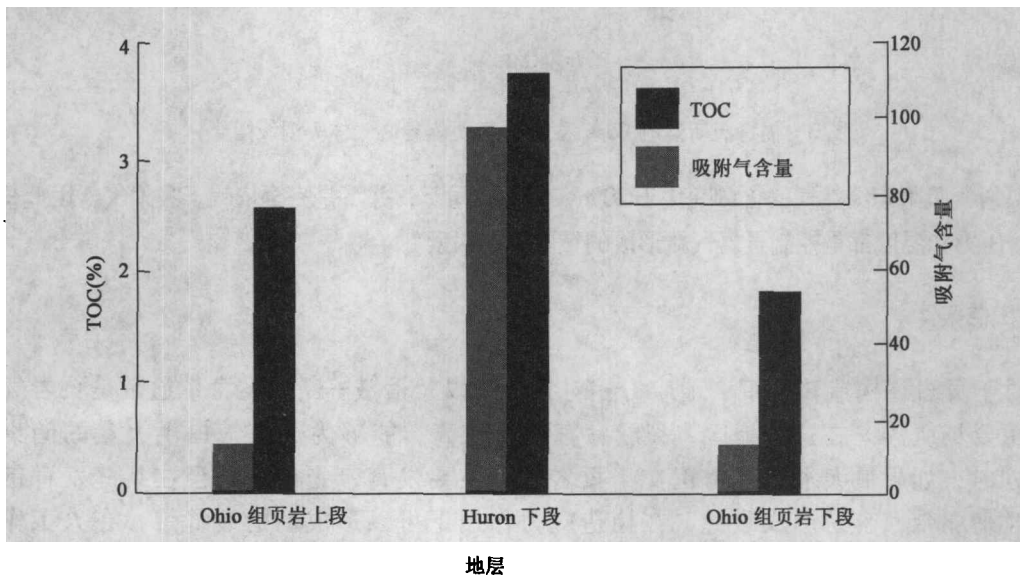


图 1 Big Sandy 气田泥盆系页岩 TOC 与甲烷吸附气含量关系图^[6,7]

(2) 温度、压力。

温度、压力主要影响页岩气在储层中的赋存状态。对于单一组分的天然气，80℃以下，随温度升高，天然气在水中的溶解度随温度下降而下降，80℃以上，天然气在水中的溶解度随温度上升而上升，压力越大越有利于气体的吸附，并提高其在水中的溶解度。温度还对页岩吸附力有重要影响，一定温度界限下，页岩的吸附能力随温度升高而增大，而超过此界限，页岩的吸附力就会下降，Daniel 等人对西加拿大盆地页岩气的研究中指出，130℃是该临界温度^[5]。除此之外，地温梯度的改变对储层有改造作用。高地温梯度或者岩浆活动可以加速页岩的热演化程度和变质程度。其热成熟度的增加有利于天然气的快速形成和高压的形成，使页岩气藏含气量增加。压力越大，页岩的吸附能量越大，如福特沃斯盆地 Wise 县 Barnett 页岩就是如此^[8]（图 2），且吸附气量的增加与总含气量的增加正向相关。

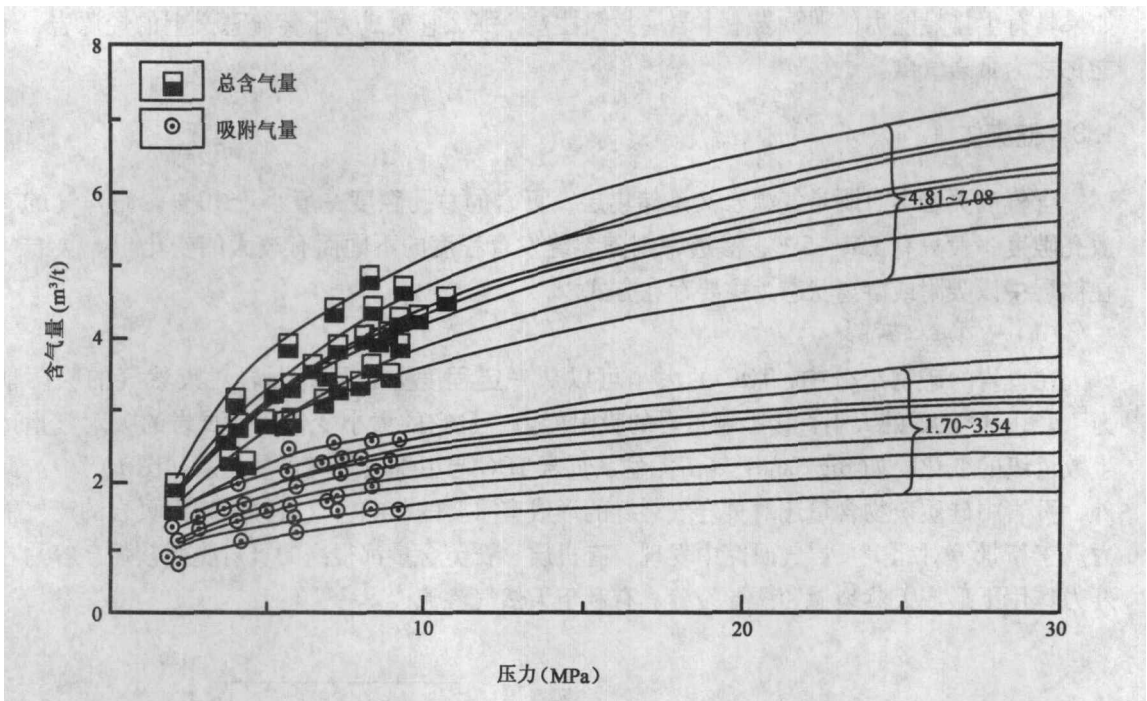


图2 福特沃斯盆地 Wise 县 Barnett 页岩岩心气体等温线图^[8]

页岩气吸附态天然气的含量变化于 20% ~85% 之间^[9]，并不是完全依赖于吸附气，因此构造条件、压力和温度都是控制页岩气藏形成的重要控制因素。

1.4 构造条件

对于页岩，构造转折带、地应力相对集中带以及褶皱—断裂发育带通常是页岩气富集的重要场所^[2]。在这些地区，裂缝发育程度较高，能够为天然气提供大量的储集空间。同时，如果最大水平应力正交于页岩裂缝主要发育带走向，则会在裂缝发育带形成力学薄弱带，容易形成裂缝，在构造应力作用下可以形成新的裂缝带，在人工作用下能形成诱导裂缝带^[10]。成藏之后发生的构造运动也能诱发页岩裂缝的发育，这可能会破坏页岩本身作为盖层的部分，降低储层压力，形成伴生气藏，如根缘气藏、常规天然气藏^[2]。在盆地凹陷部位的地层压力较高，也有利于页岩内部产生压裂缝，增大储集空间，同时形成的高压可以增大吸附气含量，进而促进总含气量。

1.5 成藏机制

页岩气的生成、运移、储集、封盖都完全发生在页岩内部。正如福特沃斯盆地 Newark East 油田的页岩气成藏模式（图 3）所表明的，页岩表面附近充填的裂缝发育带和“挡板”层的存在对于形成大型页岩气藏是重要的，“挡板”有效地抑制了未被充填的裂缝中页岩的逸散，有助于储层内天然气的富集和自然产能的提高，且在水力压裂的时候，可以使应力更加集中于页岩层中^[10-13]。当没有“挡板”的情况下，页岩气也可以成藏，但单井产量和气藏资源量会有所下降^[13]，据 Richard 等人对福特沃斯盆地页岩气评价计算，在缺少一套“挡板”的西南部勘探新区的单井平均累计产量只有 0.34bcfg，而东部老井区单井平均累计产量

为 $1.01bcfg^{[13]}$ ，比西部高近 2 倍。我国四川盆地至留统龙马溪组与上三叠统须家河组都具有类似的成藏条件^[14]（图 4），其中须家河组页岩上部“挡板”为砂质灰岩和灰质砂岩，并已发现工业性气流。

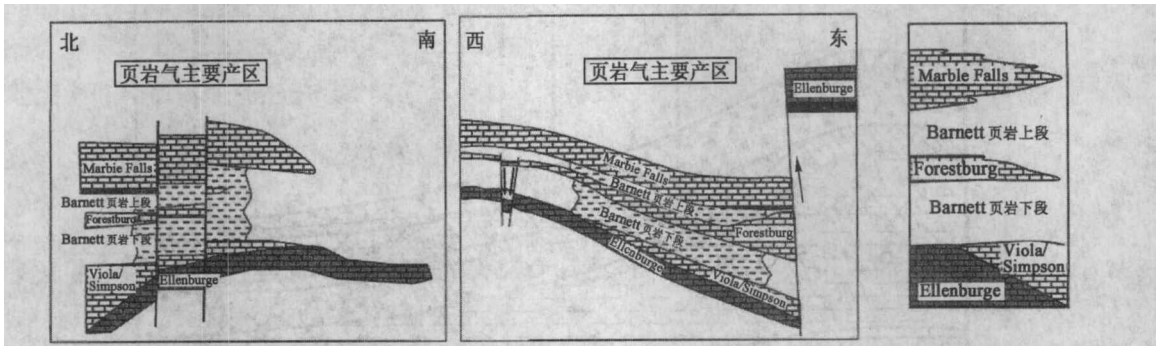


图 3 福特沃斯盆地 Mississippian Barnett 页岩气田剖面图^[4]

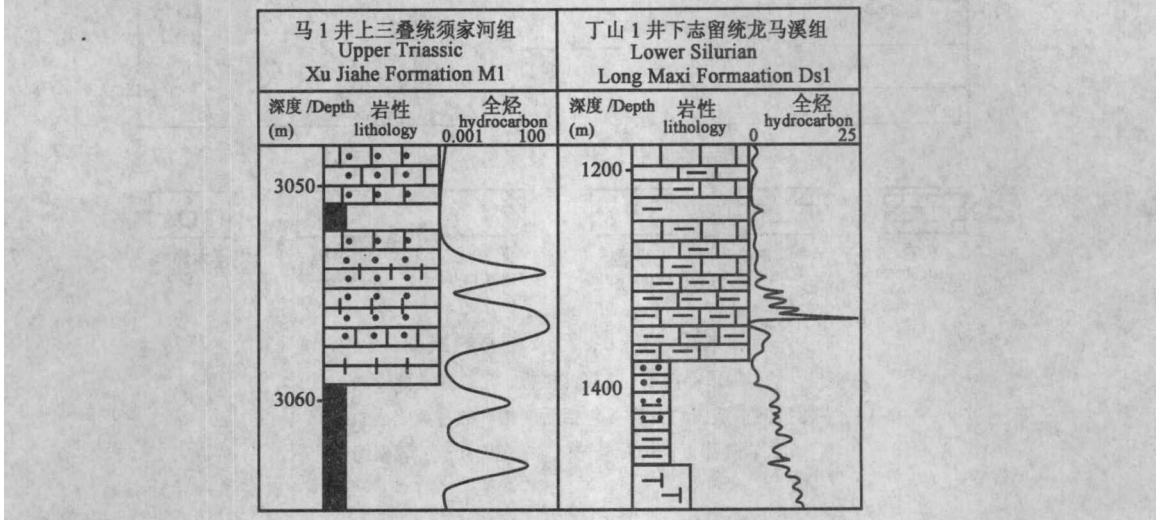


图 4 页岩段异常显示图^[2]

1.6 T-B, F, S 成藏模式

在对前文研究的基础之上，依据庞雄奇等（2008）提出的多元复合过程叠加成藏模式的思想，本文提出页岩气勘探新思路 and 模式图。页岩气（不考虑伴生气）成藏的必要条件是：在负向构造带内的页岩（ $0.4\% < TOC < 25\%$ ， $0.4\% < R_o < 2\%$ ，厚度大于 30m），裂缝发育带和页岩上下的“挡板”层，即 T（time）- B（barrier），F（fracture），S（shale）要素叠加成藏模式（图 5）。时间上裂缝带要在“挡板”形成之前形成。其中“挡板”层包括顶板和底板，可以是海相的灰岩或白云岩，可以是致密胶结的钙质砂岩等；裂缝带一般发育在构造应力集中地区；负向构造可以是古湖泊或古海洋，也包括构造抬升的古拗陷。高产页岩气发育在顶底挡板发育良好的地区，而低产或者不产气的页岩气区往往缺少或不存在良好的挡板。

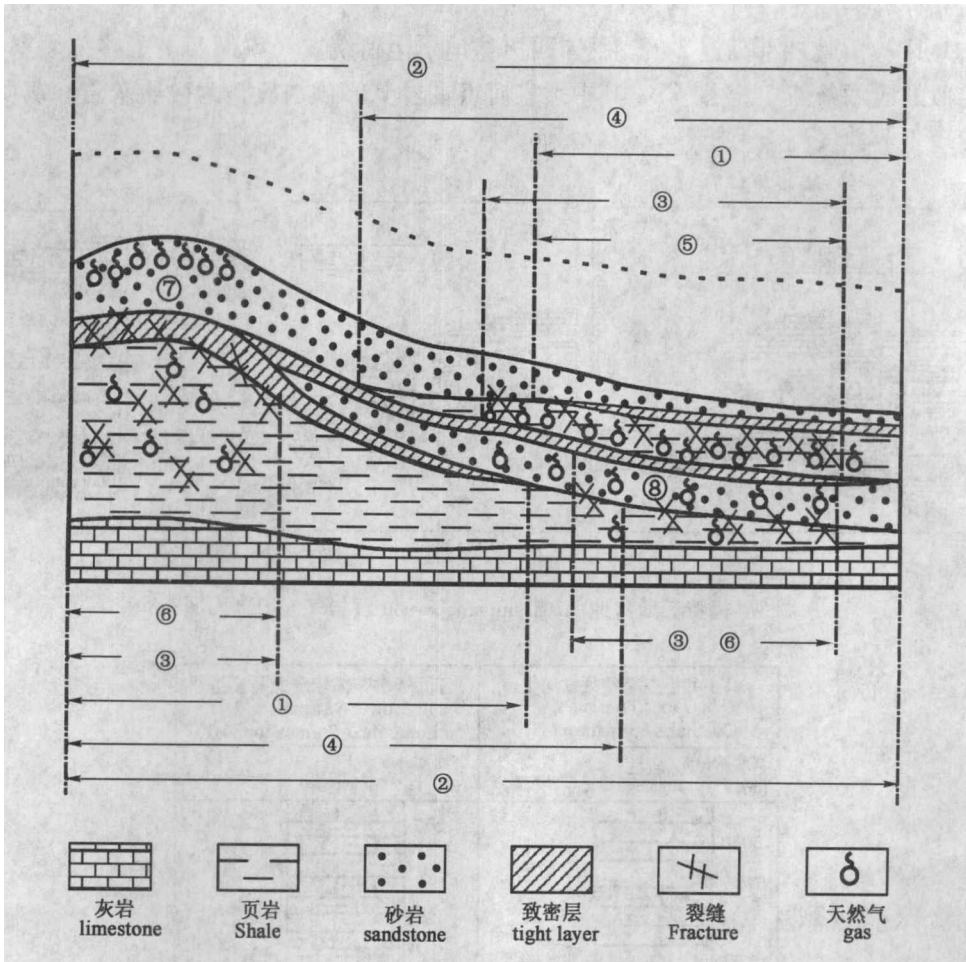


图5 T-B, F, S成藏模式图

- (①顶部挡板; ②底部挡板; ③裂缝发育带;
 ④负向构造内的页岩(包括后期抬升的古拗陷内页岩);
 ⑤页岩气甜点; ⑥页岩气; ⑦常规圈闭气; ⑧根缘气)

2 问题讨论

本文利用近年来国内外研究成果,从内外因角度展开了页岩气藏的分析,说明页岩气生成、运移、储集、圈闭机制和气体存在状态。本文提出了符合我国陆相沉积盆地页岩气勘探的方法思路,其中顶底板发育较差情况下页岩气资源量评价是今后研究的重点。

3 结论

(1) 页岩气成藏的主要内因是 TOC 热演化以及硅质矿物含量,主要外因是构造条件、压力、温度的影响。对页岩气储层内因主要控制页岩气天然气的吸附量,对外因主要控制页岩储层裂缝发育程度,对内外因同时控制储层压力和总含气量。

(2) 顶底挡板是页岩气藏保存的关键,缺少或者没有挡板情况下,页岩气受到破坏。

(3) 负向构造带内的页岩 ($0.4\% < \text{TOC} < 25\%$, $0.4\% < R_o < 2\%$, 厚度大于 30m) 与顶、底“挡板”发育带以及裂缝发育带在时间上的适当叠合带为页岩气勘探的甜点区,页

岩气甜点成藏模式为 T-B, F, S。关键技术是页岩裂缝和上覆“挡板”（致密带）封堵性的定量表征技术。

参 考 文 献

- [1] Curtis J B. Fractured shale - gas system. AAPG Bull , 2002, 86 (11): 1921 ~ 1938
- [2] 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, 2007, 24 (7): 15 - 18.
- [3] JARVIE D. Evaluation of hydrocarbon generation and storage in the Barnett shale , Fort worth basin , Texas [R] . Texas: 2004, Humble geochemical services Division.
- [4] Bowker K A Recent developments of the Barnett play, Fort Worth Basin [C] . in Law, B. E. and Wilson, M. , eds. . Innovative Gas Exploration Concepts Symposium; Rocky Mountain Association of Geologists and Petroleum Technology Transfer Council, 2002, Denver, 16.
- [5] Daniel J K, Ross , R Marc Bustin. Characterizing the shale gas resource potential of Devonian—Mississippian strata in the Western Canada sedimentary basin; Application of an integrated formation evaluation. AAPG Bulletin, 2008v. 92, no. 1 pp. 87 - 125.
- [6] Nuttall B C, Drahovzal J A, Eble C F, et al . , U. S. DOE/ NETL DE - FC26 - 02N T41442; Analysis of the Devonian shale in Kentucky for potential CO₂ sequestration and enhanced natural gas production [R] . Lexington: 2005, Kentucky Geological Survey .
- [7] 李新景, 胡素云, 程克明. 北美裂缝性页岩气勘探开发的启示. 石油勘探与开发, 2007, 34 (4): 392 - 400.
- [8] 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.
- [9] Scott L Montgomery, Daniel M Jarvie, Kent A Bowker, 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.
- [10] Julia F W Gale, Robert M Reed, Jon Holder. Natural fractures in the Barnett Shale and their importance for hydraulic fracture treatments. AAPG Bulletin, 2007, v. 91, no. 4 pp. 603 - 622.
- [11] Bowker K A. Barnett Shale gas production , Fort Worth Basin: Issues and discussion [J] . AAPG Bulletin, 2007 , 91 (4): 523 - 533.
- [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] Richard M Pollastro, Denver, Colorado. Geologic and Production Characteristics Utilized in Assessing the Barnett Shale Continuous (Unconventional) Gas Accumulation, Barnett - Paleozoic Total Petroleum System, Fort Worth Basin. Texas, 2003, Barnett Shale Symposium.
- [14] 张金川, 聂海宽, 徐波, 姜生玲, 张培先. 四川盆地页岩气成藏地质条件. 天然气工业, 2008, 28 (2): 151 - 156.