

# 四川盆地页岩气成藏地质条件\*

张金川 聂海宽 徐波 姜生玲 张培先

(中国地质大学·北京)

张金川等. 四川盆地页岩气成藏地质条件. 天然气工业, 2008, 28(2): 151-156.

**摘 要** 与传统上的“泥页岩裂缝气”并不完全相同,页岩气是主体上以吸附相和游离相同时赋存于泥岩及页岩地层中的天然气。四川盆地经历了克拉通和前陆盆地演化过程中复杂的构造变动,形成了与美国典型页岩气盆地相似的构造演化特点和地质条件,其中的古生界页岩不仅是盆地内常规气藏的烃源岩,而且还是页岩气成藏及勘探的主要对象,目前已发现了页岩气存在的大量证据。根据演化及勘探地质特点,四川盆地非常规天然气具有两分格局,东南部以页岩气为主而西北部以根缘气为主,古生界主体发育页岩气而中生界主体发育根缘气。川东和川南地区(包括川西南)古生界生气页岩发育厚度大、有机质含量高、埋藏深度小,下寒武统和下志留统具有良好的页岩气成藏及勘探地质条件;川中地区同时发育中、古生界烃源岩,上三叠统、下志留统和下寒武统可作为页岩气勘探的有利层位;川西中生界泥/页岩常与致密砂岩形成频繁互层并产生具有砂岩底部含气特点的根缘气,整体上存在着页岩气发育和勘探的远景条件,局部埋藏相对较浅的高碳泥/页岩是页岩气勘探的基本对象。

**主题词** 四川盆地 页岩气 成藏条件 勘探前景

四川是目前我国天然气探明储量、气田发现数量和天然气累计产出数量最多的盆地(戴金星等, 2001; 李德生, 2005)。但由于四川盆地经历了古生代以来长期的构造演化(金之钧等, 2006、2007), 具有从克拉通盆地到前陆盆地复杂的地质条件, 天然气勘探工作难度大, 目前的探明率仍然不足 20%。四川盆地古生界泥/页岩(美国研究者所指的页岩包括了我国研究者所指的泥岩和页岩)烃源岩发育, 天然气资源丰富, 是一个高复杂、高难度、高风险的勘探领域(马力等, 2004)。美国天然气勘探程度高、开发技术成熟, 目前已主要在古生界地层中勘探并开发了数量不菲的页岩气(Curtis, 2002), 与美国东部页岩气发育盆地具有许多地质相似性的四川盆地无疑也是一个页岩气勘探开发值得高度重视的领域。

## 一、页岩气地质

许多国外研究者(如 Curtis, 2002; Matt Mavor, 2003 等)都对页岩气进行了研究, 其基本特征可以归纳为: 页岩气是在页岩孔隙和天然裂缝中以游离方式存在、在干酪根和黏土颗粒表面上以吸附状态存

在、甚至在干酪根和沥青质中以溶解状态存在的天然气, 是连续生成的生物化学作用气、热裂解作用气或两者的混合, 在成藏及分布上具有运移距离短、多种封闭机理、聚集成藏隐蔽、地层饱含气等地质特殊性(张金川等, 2003)。基于页岩气成藏及赋存上的地质特殊性, 页岩气又被描述为主体上以吸附和游离状态同时赋存于暗色泥/页岩、高碳泥/页岩及其间夹层状发育的粉砂质泥岩、泥质粉砂岩、粉砂岩、甚至砂岩中, 以自生自储为成藏特点的天然气聚集(张金川等, 2003、2004)。因此, 自生自储、吸附作用机理及由此所产生的大规模聚集是页岩气的重要地质特点。

(1) 在成因来源方面, 页岩中的天然气生成具有有机成因的几乎所有可能, 包括了生物气、低熟—未熟气、热解气、裂解气、高一过成熟气、二次生气、过渡带作用气(生物再作用气)以及沥青生气等多种, 覆盖了生物化学、热解及裂解等几乎所有可能的有机生气作用模式, 它们分别可以在美国不同的页岩盆地中找到存在实例。

(2) 在赋存相态特征上, 页岩中的天然气具有几

\* 本文受到国家自然科学基金项目(编号: 40672087、40472073)的资助。本文作者还有中国地质大学的汪宗余。

作者简介: 张金川, 1964 年生, 教授, 本刊第六届编委会委员; 现从事非常规油气、成藏机理、资源评价及盆地流体方面的教学与研究工作。地址: (100083) 北京市海淀区学院路 29 号中国地质大学能源学院。电话: (010) 82320848。E-mail: zhangjc@cugb.edu.cn

乎所有可能的存在方式,主体上包括了游离态(大量存在于页岩孔隙和裂缝中)、吸附态(大量存在于黏土矿物、有机质、干酪根颗粒及孔隙表面上)、溶解态(微量存在于干酪根、沥青质、残留水以及液态原油中)以及其他可能相态,其中吸附相存在的天然气(Curtis, 2002)可占天然气赋存总量的 20%(Barnett Shale)~85%(Lewis Shale)。

(3)在成藏特征方面,页岩所生成的天然气就近聚集,其成藏机理复杂,吸附、溶解、活塞式推进、置换式运移均有不同程度发生,页岩内聚集的天然气仅发生了初次运移及有限的二次运移(砂岩岩类夹层内),因此页岩既是源岩又是储层和盖层,具有典型的“自生自储”成藏模式和原地性特点。结合天然气成藏机理序列(张金川等, 2003),页岩气具有从根缘气(初次运移和聚集成藏的煤层气和页岩气)到根缘气(与气源岩紧邻的致密砂岩底部含气,短距离的二次运移)的连续过渡,即当地层主体为具有生气能力的泥/页岩(泥岩多、砂岩少)时,天然气主要为多种方式存在的页岩气;而当地层以致密砂岩为主(砂岩多、泥岩少)时,天然气主要以活塞式整体推进为主要运移及聚集方式。

(4)在成藏分析及勘探地质研究方面,尽管页岩气具有吸附作用机理和自生自储特点,二次运移不再成为页岩气成藏的主要影响因素和分布预测的主要研究内容,但页岩气分布的隐蔽性特点不可忽视,泥/页岩发育厚度、有机碳含量、有机质丰度、孔隙度、渗透率、裂缝发育程度、古构造配合以及后期保存条件等,均是影响页岩含气量、天然气赋存状态并决定是否具有工业勘探开发价值的主要因素。

作为天然气聚集的特殊类型,吸附作用的存在导致页岩气的成藏条件和要求比其他类型气藏低,即成藏门槛(庞雄奇等, 2004)降低,导致页岩气能够大面积存在和分布。参考前人研究成果(Curtis, 2002),页岩气成藏需要具备如下主要地质条件:沉积地层以泥/页岩为主,单层厚度大于(大于等于 10 m),泥质含量高(泥/页岩地层中的纯泥岩厚度大于 10%),有机质丰度( $TOC \geq 0.3\%$ )及成熟度底限条件要求相对较低( $R_o \geq 0.4\%$ ),孔隙度低( $\Phi < 12\%$ )等。对于具有工业勘探价值的页岩气,则更要求埋藏深度小(小于 3 km)、裂缝发育、吸附气含量高(大于等于 20%)等,现今仍然处于生气作用阶段的泥/页岩具有更好的成藏有利性。

## 二、四川盆地页岩气发育地质背景

四川盆地位于扬子地台西北缘,四周被龙门山、米仓山、大巴山等造山带所围,盆地内中、古生界页岩厚度大而分布广泛,在剖面上构成了北西方向地层时代新、埋藏深度大、构造保存条件好而南东方向地层时代老、埋藏深度小、构造破坏强的盆地结构特点。

四川盆地是一个特提斯构造域内长期发育、不断演进的古生代—中生代海陆相复杂叠合盆地(刘树根等, 2004),大致可以分为从震旦纪到中三叠世的克拉通和晚三叠世以来的前陆盆地两大演化阶段,克拉通盆地阶段又可进一步划分为早古生代及其以早的克拉通内拗陷和晚古生代以后的克拉通裂陷盆地阶段(汪泽成等, 2002; 魏国齐等, 2005)。在克拉通盆地演化阶段,大型隆坳格局控制形成了分布面积广、沉积厚度大且以海相碳酸盐岩和页岩等为主的下构造层,一般厚 4~7 km,最大累计厚度 10 km,构成了盆地内天然气广泛分布的基础;前陆盆地演化阶段,盆地沉降—沉积中心由川东转移至川西并发生了跷跷板式的区域构造运动,打破了长期以来的构造发展格局及演化轨迹,除盆地西部山前带(如川西拗陷)地层保存完好并继续接受上构造层的陆相沉积(最大厚度 6 km)以外,盆地东部地区构造逆冲及回返强烈、沉积盖层抬升及剥蚀严重,大面积区域内发生构造隆升作用并导致古生界地层浅埋,沉积环境发生重要改变并形成了现今的盆地构造格局和剖面结构特点。

基于基底及沉积盖层差异,可将盆地划分为北东—南西走向的三大基本单元(图1)。盆地西部地

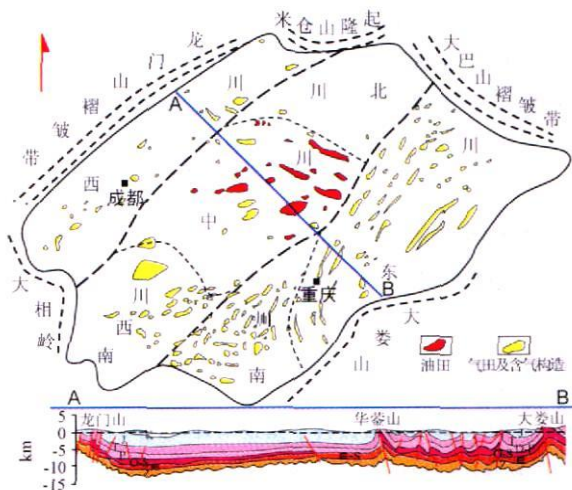


图1 四川盆地地质单元划分图

(据马力等, 2004; 张水昌等, 2006; 李德生, 2007; 有修改)

区(川西)古生界地层埋深较大并以中、新生代前陆盆地发育为特点,晚三叠世以来陆相碎屑岩发育,区域构造表现平缓,泥/页岩与致密砂岩广泛互层,具有典型陆相根缘气发育地质特点;盆地中部地区(包括川北—川中—川西南)以区域构造隆升为特点,下构造层埋深较浅而上构造层厚度较薄,区域构造相对低缓平坦。由于该区长期处于相对抬升部位,有机质热演化程度相对较轻,是油气同时产出的有利区,也是页岩气和根缘气(张金川等,2006)研究值得关注的地区;盆地东部地区(包括川东—川南)以区域构造高幅抬升及强烈挤压为特点,古生界地层埋藏浅、变形严重、改造强烈,现今构造形态表现为高陡状褶皱,中生界地层部分残留,因此大套存在的海相页岩有利于页岩气的发育和勘探研究。

### 三、四川盆地页岩气成藏条件

#### 1. 泥/页岩的有效性分布

根据前人研究(黄籍中等,1995;朱光有等,2006),四川盆地主要发育了六套有效烃源岩层系,自下而上分别是古生界的下寒武统、上奥陶统、下志留统、二叠系及中生界的上三叠统和中下侏罗统。

在古生界,黑色页岩分布广泛(图2)。下寒武统(筇竹寺和九老洞组等)黑色页岩全盆发育,尤其在川北、川东、川南和川西南等地区多见,川西地区虽然也有较大厚度,但埋藏深度较大。下寒武统烃源岩有机碳含量为 0.5%~9.0%,平均 0.7%,成熟度( $R_o$ )为 2.0%~5.0%,普遍大于 2.5%,有效厚度 50~600 m(黄籍中,2000;戴金星等,2001;徐世琦等,2002;马力等,2004;魏国齐等,2005;李德生,2005;朱光有等,2006);上奥陶统五峰组黑色页岩有机碳含量为 0.6%~2.0%,虽然一般厚度不足 20 m,但作为盆地的区域性烃源岩,其生气潜力大,多为好或较好级别的烃源岩(胡书毅等,2001;马力等,2004;

刘若冰等,2006);下志留统(龙马溪组)黑色页岩有机碳含量为 0.5%~4%,平均 1.0%,目前的  $R_o$  值为 2.0%~4.5%,一般大于 2.5%(尹亚辉等,2000),平均厚度 300 m,主要分布在川东及川南等地区,其中在川东厚度达 500~1250 m,是川东石炭系天然气的主要来源(黄籍中,2000;戴金星等,2001;马力等,2004;王兰生等,2004;魏国齐等,2005;李德生,2005);二叠系泥/页岩烃源岩热演化程度高, $R_o$  达 1.3%~3%,其中下二叠统主要分布在川中、川东、川南及川西南等地区,有机质类型主要为 III 型,有机碳丰度为 0.24%~1.76%,平均 0.4%,厚度 100~350 m(戴金星等,2001;马力等,2004;魏国齐等,2005;朱光有等,2006;马永生等,2007)。上二叠统主要分布在川东、川南及川西南地区,有机碳含量为 0.2%~12.5%,平均 2.6%,成熟度 1.0%~3.4%,厚度 20~60 m,局部可达 120 m(黄籍中,2000;戴金星等,2001;马力等,2004;魏国齐等,2005)。古生界地层有机质以 I 型为主,但成熟度普遍较高,主体处于高过成熟生气阶段,有利于页岩气藏的形成。其中,由于上奥陶统厚度较小,上、下二叠统分别以煤系和碳酸盐岩烃源岩为主,泥/页岩发育厚度较薄,故形成页岩气藏的古生界有利层段主要是下志留和下寒武统,其次为上奥陶统和上、下二叠统。

上三叠统烃源岩主要分布于川中和川西地区。川西坳陷上三叠统为海陆交互相暗色泥岩和碳质泥岩,富含 II 型干酪根的暗色泥岩一般厚 300~1000 m,平均 250 m,最厚可达 1400 m,有机碳含量 1.6%~14.2%,平均 1.95%,成熟度为 1.2%~2.0%(宋岩等,2001),有利于页岩气藏的形成。中、下侏罗统以 II 干酪根为主,有机碳含量变化幅度较大,生气能力相对较差,所生成的烃类只够满足饱和储层岩石的吸附量需要(曹烈等,2005)。

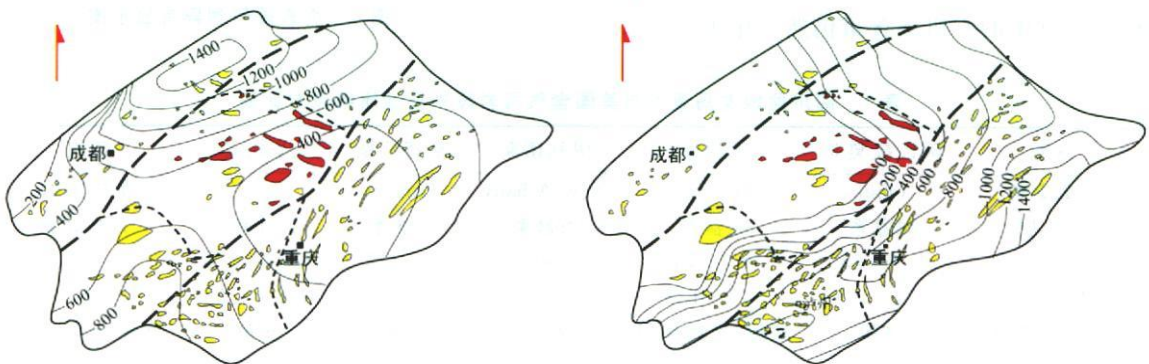


图 2 四川盆地下寒武统(左)和志留系(右)残余厚度(m)分布趋势图  
(据马力等,2004;张水昌等,2006;有修改)



2. 页岩气存在的证据

四川盆地页岩生气能力及页岩气成藏条件优越,埋藏深度小(小于 3 km 左右)、有机碳含量高,含气量大的页岩分布区域是有利的勘探目标区带。与美国五套含气页岩( Curtis 等, 2002) 相比, 尽管四川盆地页岩烃源岩的有机质成熟度普遍较高, 但仍有页岩气成藏及分布的良好前景( 图 3)。页岩气的勘探生产价值取决于其中游离和吸附相天然气的含

9.8% 之间, 平均 4.35%。虽然地层时代久远, 但镜质体反射率并不高, 实验所测的绝大部分  $R_o$  都介于 0.50% ~ 2.0% 之间, 平均大约 1.0%。成熟度总体呈现较低水平, 但也有个别测点高达 4.0%, 需要从页岩气成藏角度进行重新认识。

在四川盆地, 目前已经找到了许多页岩气存在的证据, 包括与美国页岩气发育盆地的地质条件对比( 表 1)、天然气显示异常、直接测试结果等。通过对川南、川西南下寒武统( 威 5、威 18 等井的筇竹寺组) 及下志留统( 阳 63、太 15、阳深 1、阳深 2 等井的龙马溪组) 老井的资料复查( 李新景等, 2006), 发现页岩段普遍存在钻井时曲线异常( 岩性差异)、地层密度下降( 含气页岩)、钻井液漏失( 裂缝发育)、黏度上升( 流体异常)、槽面升高、气侵及后效气侵( 游离及吸附含气)、气测高异常、井涌甚至井喷等含气现象, 表明页岩及其中的裂缝发育, 游离及吸附含气普遍, 在阳 63 井 3505~ 3518 m 页岩段, 射孔并经土酸酸化处理后获得了 3500 m<sup>3</sup>/d 的天然气产量。对四川盆地统计后发现, 三大地质单元中均有大量页岩段含气异常特点, 甚至在新钻的探井中( 如马 1 井须家河组、丁山 1 井龙马溪组、建深 1 井龙马溪组等), 气显( 井涌等) 及气测等异常在钻井过程中频繁出现, 页岩段地层气测异常可高达 80%( 图 4)。

量, 游离气的含量高低与其构造保存条件密切相关, 而吸附气含量大小受温度、压力等环境因素影响, 在相同情况下, 吸附气量高低与有机质含量多寡呈正相关关系。在美国, 不论是在盆地内、盆地边缘, 还是盆地外围( 残留盆地), 均有页岩气的勘探生产, 尤其是构造破坏强烈但页岩埋藏较浅、有机质含量较高的地区也是页岩气勘探生产区, 主要原因是其中的页岩具有很好的天然气吸附能力并因此具有一定的抗构造破坏能力。四川盆地古生界主力烃源岩有机质含量高, 故可在构造保存条件差异较大的地区分别形成不同含气量及含气特点的页岩气聚集。对川中南部寒武系浅表( 深度小于 5 m) 页岩样品的有机地球化学分析表明, 虽然页岩经受了较长时期的风化淋滤, 但其中的有机碳含量仍然变化于 0.38%~

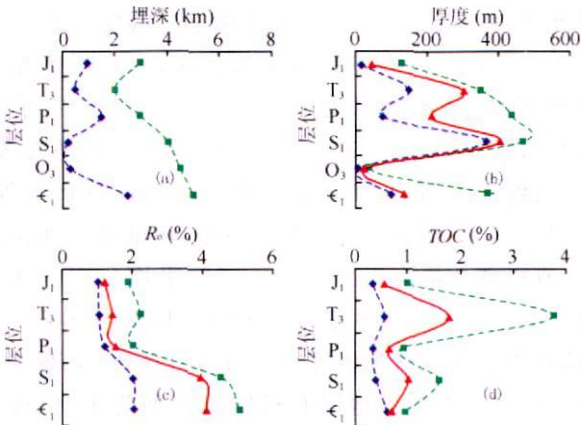


图 3 四川盆地页岩基本地质条件图

(a 图中, 左、右曲线分别表示最小、最大值; b-d 图中, 从左至右分别表示最小、平均和最大值)

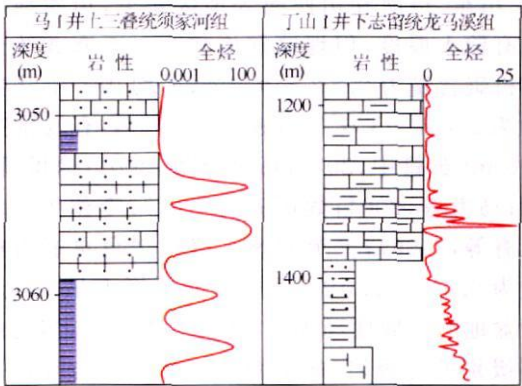


图 4 页岩段气测异常显示图

表 1 四川盆地龙马溪组与美国含气页岩段主要地质特点对比表

盆地	阿巴拉契亚	密执安	伊利诺斯	富特沃斯	圣胡安	四川
页岩名称	Ohio	Antrim	New Albany	Barnett	Lewis	龙马溪组
地 层	泥盆系	泥盆系	泥盆系	石炭系	上白垩统	下志留统
TOC(%)	0.5~ 23	0.3~ 24	1~ 25	1~ 4.5	0.45~ 2.5	0.5~ 4
R <sub>o</sub> (%)	0.4~ 1.3	0.4~ 1.6	0.4~ 1.3	1.0~ 1.4	1.6~ 1.88	> 2.5
天然气成因	热解	热解、生物作用	生物作用	热解	热解	热解、生物作用
页岩毛厚度(m)	91~ 610	49	31~ 122	61~ 91	152~ 579	500~ 1250

注: 国外数据据 Curtis, 2002 修编, 数据由英制单位换算。

## 四、页岩气勘探地质讨论

### 1. 页岩气发育有利区

四川盆地与美国东部地区页岩气发育盆地具有相似的地质条件,均是古生代海相沉积背景下形成的富含有机碳页岩,后期大幅度的构造抬升和强烈的地质改造程度也大致相当,富含腐殖型干酪根的泥/页岩直接产气及高演化程度下的原油裂解气导致盆地具有页岩气勘探的良好前景。整体分析,四川盆地东部和南部以下寒武统和下志留统页岩为主,层位老但埋深浅,是现今工业技术和经济背景条件下开展页岩气勘探研究的重点目标。

(1) 川东地区古生代长期处于沉降—沉积中心,烃源岩发育层数多且质量好,厚度大且埋藏浅,构成了四川盆地页岩气勘探的主体方向。古生界主要发育了寒武、奥陶、志留及二叠系深灰—黑色页岩,其中的下志留统页岩烃源岩厚度 100~700 m,平均 400 m,最大 823 m,有机碳含量 0.2%~3.13%, $R_o$  为 2.2%~4.0% (刘若冰等, 2006),可作为页岩气勘探的主要目标。其次,下寒武统黑色泥/页岩有机碳含量 1%~3%,平均厚度大于 200 m,成熟度一般在 3.5 以上;上二叠统页岩厚度 20~120 m,平均 60 m,有机碳含量高达 3%~7.54%,成熟度 1.6%~3.1% (王兰生等, 2004),也是潜力良好的页岩气目的层。

(2) 川中地区下侏罗统泥岩有机碳含量 0.07%~4.51%,平均 1.19%,成熟度  $R_o$  为 0.70%~1.12% (陈盛吉等, 2005),Ⅱ型为主的干酪根影响了天然气的大量生成;上三叠统富含Ⅱ型干酪根的泥岩有机碳含量 0.5%~1.5%,平均 1.14% (陈义才等, 2005),平均厚度 20~350 m,分布稳定,Ⅱ型干酪根构建了页岩气的良好基础;古生界主体发育了下寒武统的筇竹寺组和下志留统的龙马溪组页岩烃源岩,龙马溪组厚度可达 1000 m,有机碳含量为 1.0%~4.9%。筇竹寺组厚度数百米,尤其在川中南部可达 200~400 m,有机碳含量 0.20%~9.98%,平均 0.97%。由于埋藏深度原因,该区下志留统(龙马溪组)页岩气成藏条件优于下寒武统。此外,川中南部地区(川南)的上、下二叠统页岩也值得关注。

(3) 川西地区整体属于前陆拗陷,三叠及二叠系泥质气源岩与大套致密砂岩频繁互层,更显示了根缘气发育的优越性。该区古生界地层埋深普遍偏大,局部浅埋地区也显示了优良的生气能力,如上二

叠统泥质烃源岩厚度 25~100 m,有机碳含量 0.5%~1.5%;下二叠统页岩厚度 10 m,有机碳含量为 1%~2% (张永刚等, 2007),具有良好的生气能力。因此,局部埋藏相对较浅的高碳泥/页岩是页岩气勘探的潜在领域。

(4) 除上述主要层位以外,上奥陶统、二叠系及其他具有较高有机碳含量、一定的连续厚度及较浅埋藏深度的泥/页岩段均应视为页岩气勘探的考虑目标。此外,四川盆地围缘抬升较高,古生界泥/页岩气源岩广泛出露或近地表发育,也可作为页岩气勘探的潜在领域。

### 2. 页岩气勘探思考

四川盆地页岩气的勘探将是中国南方油气勘探的一个重要步骤和方向,对丰富和发展中国的天然气地质理论极具重要意义。四川盆地具有与美国盆地相似的地质条件和构造演化特点,泥/页岩不仅是盆地内常规气藏的烃源岩,而且还具备了页岩气成藏的地质条件(刘丽芳等, 2005)。四川盆地具有发育页岩气的良好地质条件,按照构造演化及地层发育特点,大致可分为三个基本层次,即川东、川南及川西南工业性页岩气成藏条件最好,川中及部分盆地围缘相对较差,川西主体宜进行根缘气勘探。

按照常规勘探思路,四川盆地已经发现了一大批天然气田,但结合盆地页岩发育地质特点及美国页岩气勘探经验,四川盆地具有以下寒武和下志留统为主形成区域性页岩气发育的良好地质条件,平面上侧重于盆地的东半部,包括川东、川中、川南、川西南等。勘探过程中宜与常规天然气勘探研究相结合,重视经济深度范围内的吸附及游离含气量变化,重点通过页岩有机碳含量、综合含气量、裂缝发育、埋藏深度及勘探有利性等方面研究,将游离与吸附、裂缝与圈闭、含气量与埋藏深度等因素结合分析,指导页岩气勘探快速起步和高速发展。

### 参 考 文 献

- [1] 戴金星,夏新宇,卫延召,等. 四川盆地天然气的碳同位素特征[J]. 石油实验地质, 2001, 23(2): 115-121.
- [2] 李德生. 中国石油地质学的创新之路[J]. 石油与天然气地质, 2007, 28(1): 1-11.
- [3] 金之钧,蔡立国. 中国海相油气勘探前景、主要问题与对策[J]. 石油与天然气地质, 2006, 27(6): 722-730.
- [4] 金之钧,蔡立国. 中国海相层系油气地质理论的继承与创新[J]. 地质学报, 2007, 81(8): 1017-1024.
- [5] 金顺爱. 中国海相油气地质勘探与研究——访李德生院士[J]. 海相油气地质, 2005, 10(2): 1-8.

- [ 6 ] 马力, 陈焕疆, 甘克文, 等. 中国南方大地构造和海相油气地质(上、下)[M]. 北京: 地质出版社, 2004.
- [ 7 ] CURTIS J B. Fractured shale gas systems [J]. AAPG Bull, 2002, 86(11): 1921-1938.
- [ 8 ] MATT MAJOR. Barnett shale gas in place volume including sorbed and free gas volume [C]. AAPG South-west Section Meeting, Fort Worth, Texas, 2003.
- [ 9 ] 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.
- [ 10 ] 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.
- [ 11 ] 庞雄奇, 李素梅, 金之钧, 等. 排烃门限存在的地质地球化学证据及其应用[J]. 地球科学——中国地质大学学报, 2004, 29(4): 384-390.
- [ 12 ] 张金川, 金之钧, 袁明生, 等. 油气成藏与分布的递变序列[J]. 现代地质, 2003, 17(3): 323-330.
- [ 13 ] 刘树根, 徐国盛, 徐国强, 等. 四川盆地天然气成藏动力学初探[J]. 天然气地球科学, 2004, 15(4): 323-330.
- [ 14 ] 汪泽成, 赵文智, 彭红雨. 四川盆地复合含油气系统特征[J]. 石油勘探与开发, 2002, 29(2): 26-28.
- [ 15 ] 魏国齐, 刘德来, 张林. 四川盆地天然气分布规律与有利勘探领域[J]. 天然气地球科学, 2005, 16(4): 437-442.
- [ 16 ] 张金川, 薛会, 卞昌蓉, 等. 中国非常规天然气勘探建议[J]. 天然气工业, 2006, 26(12): 53-56.
- [ 17 ] 张水昌, 朱光有. 四川盆地海相天然气富集成藏特征与勘探潜力[J]. 石油学报, 2006, 27(5): 1-8.
- [ 18 ] 黄籍中. 中上扬子区海相沉积烃源研究(之一)[J]. 天然气勘探与开发, 1999, 22(4): 1-5.
- [ 19 ] 黄籍中. 中上扬子区海相沉积烃源研究(之二)[J]. 天然气勘探与开发, 2000, 23(1): 9-27.
- [ 20 ] 朱光有, 张水昌, 梁英波, 等. 四川盆地天然气特征及气源[J]. 地学前缘, 2006, 13(2): 234-248.
- [ 21 ] 马永生, 蔡勋育. 四川盆地川东北区二叠系—三叠系天然气勘探成果与前景展望[J]. 石油与天然气地质, 2006, 27(6): 741-750.
- [ 22 ] 徐世琦, 洪海涛, 李翔. 四川盆地震旦系油气成藏特征与规律[J]. 天然气勘探与开发, 2002, 25(4): 1-5.
- [ 23 ] 胡书毅, 文玲, 田海芹, 等. 扬子地区奥陶纪古地理与石油地质条件[J]. 中国海上油气(地质), 2001, 15(5): 317-321.
- [ 24 ] 刘若冰, 田景春, 魏志宏, 等. 川东南地区震旦系—志留系下组合有效烃源岩综合研究[J]. 天然气地球科学, 2006, 17(6): 824-828.
- [ 25 ] 尹亚辉, 蒋有录, LEONARD J E. 川东地区五百梯构造天然气运聚成藏史模拟研究[J]. 石油大学学报: 自然科学版, 2000, 24(4): 119-122.
- [ 26 ] 王兰生, 李宗银, 沈平, 等. 四川盆地东部大中型气藏成烃条件分析[J]. 天然气地球科学, 2004, 15(6): 567-571.
- [ 27 ] 宋岩, 洪峰. 四川盆地川西坳陷深盆地地质条件分析[J]. 石油勘探与开发, 2001, 28(2): 14-15.
- [ 28 ] 曹烈, 徐殿桂, 黄川. 川西坳陷上三叠统一侏罗系烃源岩生烃史研究[J]. 天然气工业, 2005, 25(12): 22-24.
- [ 29 ] 李新景, 胡素云, 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.
- [ 30 ] 陈盛吉, 万茂霞, 杜敏. 川中地区侏罗系油气源对比及烃源条件研究[J]. 天然气勘探与开发, 2005, 28(2): 12-15.
- [ 31 ] 陈义才, 蒋裕强, 郭贵安, 等. 川中地区上三叠统天然气成藏机理[J]. 天然气工业, 2007, 27(6): 27-30.
- [ 32 ] 张永刚, 马宗晋, 杨克明. 川西坳陷中段海相层系油气勘探潜力分析[J]. 地质学报, 2007, 81(8): 1041-1047.
- [ 33 ] 刘丽芳, 徐波, 张金川, 等. 中国海相页岩及其成藏意义[M] // 科技导报社. 中国科协 2005 学术年会论文集——以科学发展观促进科技创新(上). 北京: 中国科学技术出版社, 2005: 457-463.

(修改回稿日期 2008-01-29 编辑 罗冬梅)

pete with traditional firepower plants as far as energy cost is concerned although its energy efficiency is increased.

**SUBJECT HEADINGS:** LNG, energy, cost, analysis, distributed energy station

**WANG Xiao-wu** (adjunct professor), born in 1972, holds a Ph. D degree, being engaged in studies on how to harmonize the development of energy and economy and the demand for environment protection.

**Add:** Physical Sciences and Technical Institute of South China University of Technology, Tianhe District, Guangzhou, Guangdong Province 510640, P. R. China

**Tel:** + 86-28-3721 2284      **E-mail:** journey5@163.com

## ECONOMIC ANALYSIS COMPARED BETWEEN MIXED-REFRIGERANT CYCLE AND NITROGEN EXPANDER CYCLE

YIN Quanshen, LI Hong-yan, FAN Qing-hu, JIA Lin-xiang (Research Institute of Cryogenics and Superconductivity Technology, Harbin Institute of Technology). *NATURAL GAS IND.* v. 28, no. 2, pp. 148-150, 2/25/2008. (ISSN 1000-0976; **In Chinese**)

**ABSTRACT:** Natural gas liquification involves both mixed-refrigerant cycle and nitrogen expander cycle. In order to discuss on the cost-effectiveness of these two cycles, this study set up two models on which their flow process could be simulated. Through simulation, this study applied the optimized parameters to calculate their investment costs and operation costs respectively. The result showed that although being complex in flow process and more difficult to calculate in its design the mixed-refrigerant cycle should be the first choice for small-scale natural gas liquification plants because of its low cost either in the former investment or in its latter operation, only two thirds of that in nitrogen expander cycle.

**SUBJECT HEADINGS:** gas liquefying, flow process, optimization, economic evaluation

**YIN Quanshen**, born in 1979, is studying for a Ph. D degree, being engaged in natural gas liquification technology and physical characteristics studies.

**Add:** Mail Box 3021, Science Garden, Research Institute of Cryogenics and Superconductivity Technology, Harbin Institute of Technology, No. 2, Yikuang Street, Harbin, Heilongjiang Province 150001, P. R. China

**Tel:** + 86-451-8640 2335      **Mobile:** + 86-13796604903      **E-mail:** yinquansen@126.com

## GEOLOGICAL CONDITION OF SHALE GAS ACCUMULATION IN SICHUAN BASIN

ZHANG Jin-chuan, NIE Hai-kuan, XU Bo, JIANG Sheng-ling, ZHANG Pei-xian, WANG Zong-yu (China University of Geosciences • Beijing). *NATURAL GAS IND.* v. 28, no. 2, pp. 151-156, 2/25/2008. (ISSN 1000-0976; **In Chinese**)

**ABSTRACT:** Distinguished by what from traditional conception of fissured shale gas, shale gas is concerned to the gas accumulated within the shales and/or mudstones by free and adsorbed gas. The Sichuan Basin experienced complex tectonic movements in process of the evolution from Craton basin to foreland basin. As a result, The Sichuan Basin is of the similar tectonic characteristics and geological conditions for shale gas with the typical shale gas basins in America, where the Paleozoic shale is not only the source rocks for conventional gas reservoirs but also the main objects for shale gas accumulation and exploration. At present, a large number of evidences of shale gas have been found in the Sichuan Basin. According to the structural and evolutionary characteristics of the Sichuan Basin, the unconventional gas is distributed by two distinguished patterns: in place, shale gas is mainly in the southeastern basin while the source-contacting gas in the northwestern basin; in time, shale gas accumulated in the Paleozoic Era while source-contacting gas in the Mesozoic Era. In North and South Sichuan Basin, including Southwestern Sichuan Basin, there developed Paleozoic Era shale gas bearing shales with huge thickness, high contents of organic matters and shallow buried depths. Lower Cambrian and Lower Silurian Series are of good geological conditions for shale gas accumulation and exploration. In Central Sichuan Basin there developed both Mesozoic and Paleozoic Eras of source rocks, in which Upper Triassic Series is the favorable horizon for shale gas exploration. In West Sichuan Basin the gas bearing shales is mainly Mesozoic Era, in which shales and tight sands interbed frequently to form the source-contacting gas with the characteristics of gas accumulated on the bottom of tight sands. There exist perspective conditions for exploration and exploitation of shale gas in West Sichuan Basin, especially the high carbon shales and/or mudstones with relatively shallower

depths.

**SUBJECT HEADINGS:** Sichuan Basin, shale gas, conditions of accumulation, exploration prospects

**ZHANG Jin-chuan** (professor), born in 1964, is now engaged in teaching and research works on unconventional oil and gas, reservoiring mechanism, resource assessment, and basin fluids, etc. He is also one member of the 6th NGI Editorial Committee.

**Add:** China University of Geosciences • Beijing, No. 29, Xueyuan Rd., Haidian District, Beijing 100083, P.R. China

**Tel:** + 86-451-8232 0848      **Mobile:** + 86-13796604903      **E-mail:** zhangjc@cugb.edu.cn

## AN EXPLANATION ABOUT *THE NATIONAL POLICY ON NATURAL GAS UTILIZATION*

HU Ao-lin (Natural Gas Economical Research Institute of PetroChina Southwest Oil & Gasfield Company). *NATUR. GAS IND.* v. 28, no. 2, pp. 157-159, 2/25/2008. (ISSN 1000-0976; **In Chinese**)

**ABSTRACT:** The demand for natural gas surges on the rapid development of Chinese economy. In order to resolve the conflict between supply and demand for natural gas, to take good advantage of natural gas in more reasonable way, and to save more energy and reduce pollution, *the National Policy on Natural Gas Utilization*, authorized by the State Department, was first officially issued and executed in China on 30 August of 2007. It is useful for us to understand well the Policy so as to perform strictly under the regulation of this Policy, which will contribute a lot for natural gas market developing properly and stably. Therefore, starting with the situations and background under which how this Policy was coming on, this paper analyzed in detail the purpose, significance, and essential points of this Policy, and predicted what effects this Policy should have on natural gas market. This paper also suggested that this Policy should be modified by the change of environment and market, and pointed out that if taking into account the potential of gas supply, to adjust some points of regulations or to abolish some restrictions on gas utilization is simply a case of time.

**SUBJECT HEADINGS:** natural gas utilization, policy, analysis, market, structure, order, influence

**HU Ao-lin**, born in 1955, is now engaged in studies on natural gas economy.

**Add:** Natural Gas Economical Research Institute of PetroChina Southwest Oil & Gasfield Company, No. 60, Sec. 1, North Jianshe Rd., Chengdu, Sichuan Province 610051, P.R. China

**Tel:** + 86-28-8601 2431      **Mobile:** + 86-13796604903      **E-mail:** hual\_jys@petrochina.com.cn

---

JIANG Jing-ping  
**English Editor:** T AN Rong-rong  
**Tel:** + 86-28-8601 2446  
**E-mail:** jjp@trqgy.cn