

中国南方页岩气勘探评价的几点思考

郭旭升, 郭彤楼, 魏志红, 张汉荣, 刘若冰, 柳智利, 王 炜

(中石化勘探南方分公司, 成都 610041)

[摘要] 中国南方广泛发育下寒武统、下志留统、上二叠统三套海相区域性富有机质泥页岩, 同时在四川盆地、江汉盆地和苏北盆地发育陆相富有机质泥页岩, 具备形成页岩气的地质条件。但是, 与美国页岩气相比, 南方海相页岩气具有多期构造运动叠加改造、热演化程度高、保存条件复杂的特点, 而陆相泥页岩有机碳含量、孔隙度相对较低, 因此南方页岩气勘探面临诸多挑战, 不能盲目乐观。笔者等对比研究认为, 四川盆地海相、陆相是实现页岩气规模勘探开发的现实领域, 江汉盆地、苏北盆地陆相可作为南方页岩气勘探的后备领域。

[关键词] 中国南方; 页岩气; 勘探评价

[中图分类号] TE132 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2012)06-0101-05

1 前言

页岩气作为油气勘探新领域, 越来越受到人们的重视。中国南方是我国页岩气勘探评价的重点地区, 发育海相、陆相多套富有机质泥页岩, 具备形成页岩气的基本地质条件。但与美国已成功开发的页岩气相比, 具有明显的差异性, 面临诸多挑战。

2 区域性海相泥页岩及形成页岩气的原始地质条件

我国南方发育下寒武统、下志留统和上二叠统等多套区域性海相泥页岩^[1], 页岩气形成地质条件较好。

2.1 下寒武统

下寒武统富有机质泥页岩主要发育于早寒武世早期, 扬子克拉通南北两侧被动大陆边缘盆地。厚度一般为 50 ~ 500 m, 现今残留面积约 90 万 km², 其中厚度大于 50 m 的分布面积达 58 万 km²。

下寒武统富有机质泥页岩有机碳含量 (TOC) 在上扬子地区一般为 1% ~ 4%, 其中川南、黔西北、湘西较高, 一般大于 2.0%; 在中扬子地区较低, 一

般为 0.2% ~ 2.4%; 在下扬子地区一般大于 1.0%, 在皖南休宁—宁国—浙西北安吉一带平均有机碳含量高达 4.7% 左右。有机质类型主要为 I 型或 II₁ 型。有机质热演化程度高, 镜质体反射率 R_o 一般大于 2.0%, 四川盆地 R_o 平均 3.4%, 中扬子地区 R_o 最高达 6.28%, 下扬子地区自北西到南东的金湖—巢北冲断体、沿江冲断前缘带和黄桥—如皋冲断体是 R_o 大于 3.0% 的高演化区。

对上扬子地区下寒武统富有机质泥页岩地表样品进行氦气法分析, 所得平均孔隙度为 1.28% ~ 16.05%。

2.2 下志留统

下志留统富有机质泥页岩主要发育于早志留世早期, 扬子克拉通周围古隆起所围限的克拉通内坳陷盆地。在上扬子地区主要分布于川东北、川东南—黔北、川西南地区, 厚度一般为 40 ~ 200 m; 在中扬子地区厚度仅 35 ~ 50 m; 在下扬子地区主要分布在句容—海安—东台地区, 厚度 40 ~ 80 m。

下志留统富有机质泥页岩 TOC 在中、上扬子地区一般为 0.5% ~ 2.34%, 下扬子地区多大于 1%。主要为 I 型或 II₁ 型。有机质热演化程度高,

[收稿日期] 2012-04-09

[作者简介] 郭旭升(1965—), 男, 山东菏泽市人, 教授级高级工程师, 主要研究方向为石油地质综合研究勘探管理;

E-mail: guoxs.ktnf@sinopec.com

在四川盆地南部 R_0 达到 1.83 % ~ 3.26 % ; 中扬子地区 R_0 西高东低, 在 2.0 % ~ 3.0 % ; 下扬子地区沿江冲断带、常州一带、西部巢湖—枞阳冲断体、东南部太湖逆掩构造区的无锡—长兴一带 R_0 大于 3.0 % , 苏皖地区 R_0 大于 4.0 % , 其余地区 R_0 在 1.5 % ~ 2.5 % 。

对上扬子地区下志留统富有机质泥页岩地表样品进行氦气法分析, 所得平均孔隙度为 2.95 % ~ 10.14 % 。

2.3 上二叠统

扬子地块上二叠统富有机质泥页岩主要发育在龙潭组(吴家坪组)和大隆组, 分布面积 80 万 km^2 。在上扬子地区, 龙潭组泥页岩主要分布在四川盆地, 厚度在 30 ~ 100 m, 大隆组泥页岩主要分布于广元—旺苍陆棚和城口—鄂西陆棚、开江—梁平陆棚内, 厚度在 5 ~ 30 m; 中扬子地区上二叠统富有机质泥页岩主要分布于荆门—京山—仙桃—潜江地区, 厚度在 20 ~ 40 m ; 下扬子地区龙潭组泥页岩的厚度在 50 ~ 200 m, 大隆组泥页岩厚度一般在 20 ~ 50 m。除扬子地块外, 在湘桂地块, 上二叠统富有机质泥页岩也较发育, 主要分布于南盘江—桂中—相中地区, 厚度一般为 50 ~ 200 m。

上二叠统富有机质泥页岩 TOC 在上扬子地区大多为 0.5 % ~ 4 % , 中扬子地区一般为 1.0 % ~ 1.5 % , 下扬子地区平均为 1.96 % , 南盘江—桂中—相中地区一般为 1.0 % ~ 3.0 % 。

上二叠统有机质热演化程度较高, 上扬子地区和南盘江—桂中—相中地区一般为 1.3 % ~ 3.0 % , 中扬子地区一般为 0.8 % ~ 3.0 % , 下扬子地区一般为 1.5 % ~ 2.9 % , 南盘江—桂中—相中地区一般为 1.3 % ~ 4.0 % 。

3 三大盆地发育陆相泥页岩

中、晚三叠世发生的印支运动, 使中国南方结束了海相沉积, 从此转入陆内盆地发育演化阶段, 在四川盆地、江汉盆地、苏北盆地发育了陆相富含有机质泥页岩。

3.1 四川盆地

四川盆地陆相富含有机质泥页岩主要发育于中下侏罗统, 包括下侏罗统自流井组东岳庙段、马鞍山段、大安寨段和中侏罗统千佛崖组中下部, 为浅湖—半深湖相沉积, 主要分布于川东北地区。东岳庙段富有机质泥页岩厚度为 40 ~ 100 m, 马鞍山段为

20 ~ 60 m, 大安寨段为 40 ~ 60 m, 千佛崖组为 40 ~ 100 m。

东岳庙段富有机质泥页岩 TOC 为 0.51 % ~ 11.82 % , 平均 2.09 % ; 马鞍山段为 0.57 % ~ 0.67 % , 平均 0.62 % ; 大安寨段为 0.58 % ~ 3.64 % , 平均 1.2 % ; 千佛崖组为 0.74 % ~ 2.05 % , 平均 1.15 % 。有机质类型以 II_2 型、 III 型为主, 少量为 II_1 型、 I 型, 总体以 II_2 型最多。有机质演化程度适中, 均主要处于凝析油—湿气的高成熟阶段, R_0 主要为 1.0 % ~ 1.8 % 。

对东岳庙段富有机质泥页岩岩心样品进行氦气法和 GIR 法分析, 所得平均孔隙度为 2.49 % ~ 3.28 % ; 马鞍山段为 2.01 % ~ 2.07 % ; 大安寨段为 4.23 % ~ 4.68 % ; 千佛崖组为 4.08 % 。

3.2 江汉盆地

江汉盆地陆相富有机质泥页岩主要发育在古近系, 包括新沟咀组下段和潜江组, 主要分布在江陵凹陷、潜江凹陷、小板凹陷、陈沱口凹陷等, 为盐湖沉积。新沟咀组下段富有机质泥页岩厚度为 50 ~ 112 m, 潜江组为 200 ~ 723 m。潜江组和新沟咀组下段 TOC 含量一般在 1.0 % 左右。潜江组有机质类型以 I 型、 II_1 型为主; 新沟咀组下段以 II_1 型和 II_2 型为主。江汉盆地古近系 R_0 变化范围较大, 一般在 0.6 % ~ 2.0 % , 演化程度相对较高的地区主要集中在分布在江陵、潜江、小板三个地区。

3.3 苏北盆地

苏北盆地陆相富有机质泥页岩主要发育在古近系阜宁组二段和四段, 主要分布在金湖凹陷、高邮凹陷、盐城凹陷等, 属浅湖—半深湖相沉积。泰阜宁组二段富有机质泥页岩厚度为 100 ~ 250 m, 阜宁组四段为 80 ~ 200 m。泰州组二段富有机质泥页岩 TOC 平均为 1.28 % , 阜宁组二段为 1.59 % , 阜宁组四段为 1.22 % 。有机质类型以 I 型和 II_1 型为主。 R_0 变化范围较大, 为 0.5 % ~ 1.81 % 。富有机质泥页岩孔隙度较低, 分布在 0.34 % ~ 1.28 % 。

4 区别于美国页岩气勘探的显著特点

中国南方页岩气应以热成因为主, 与美国已成功开发的热成因的 Barnett, Fayetteville, Woodford, Haynesville, Marcellus 页岩气相比, 具有明显的差异性。

4.1 海相泥页岩热演化程度偏高, 多期构造运动叠加改造强烈, 页岩气保存条件复杂

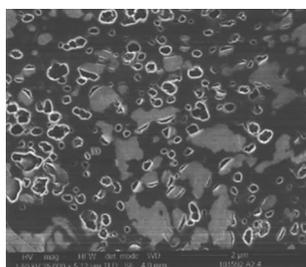
美国已开发的热成因页岩气层 R_0 均小于

4.0 % (见表 1), 一般为 1.1 % ~ 3.0 %^[2]; 南方海相 R_0 一般大于 2.0 %, 局部地区大于 4.0 %, 热演化程度偏高。页岩气赋存的热演化程度上限目前尚无定论, 但川西南研究资料显示, R_0 高达 3.7 % ~ 4.5 % 的下志留统龙马溪组页岩, 其离子束抛光扫描电镜分析表明有机质孔隙丰富(见图 1), 等温吸附试验(见图 2)说明吸附能力较强, 亦即高热演化程度页岩也具有较好的页岩气赋存条件。

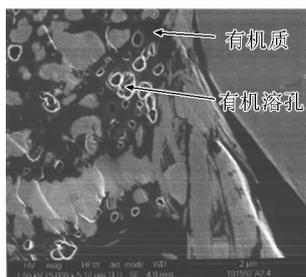
表 1 美国主要热成因页岩气层 R_0 统计表

Table 1 Statistics on R_0 of thermogenic shale gas in U. S.

页岩名称	时代	R_0 /%
Barnett	C_1	1.1 ~ 2.0
Fayetteville	C_1	1.2 ~ 4.0
Woodford	D_3	1.1 ~ 3.0
Haynesville	J_3	2.2 ~ 3.0
Marcellus	D_2	1.5 ~ 3.0



(a)



(b)

图 1 雷波芭蕉滩剖面龙马溪组泥页岩扫描电镜照片

Fig. 1 Sem photographs of shale stones in Longmaxi formation from Bajiaotan cross section in Leibo County

热演化程度不是页岩气赋存的关键因素, 其关键在于高热演化页岩一般生气高峰或热演化定型较早, 页岩气层形成后经历的改造时间长, 这给页岩气的保存带来了风险。

一定厚度(大于 30 m)的页岩对烃类气具有自封存作用, 页岩气对保存条件的要求没有常规气高。

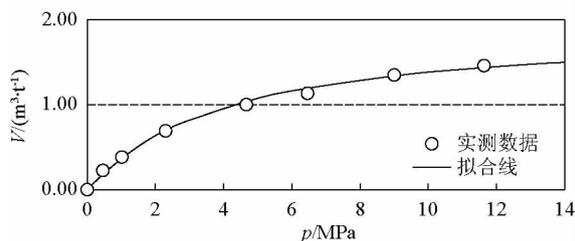


图 2 雷波芭蕉滩剖面龙马溪组泥页岩等温吸附试验
Fig. 2 Isothermal adsorption tests on shale stones in Longmaxi formation from Bajiaotan cross section in Leibo County

但勘探实践证明, 当页岩气层遭受抬升剥蚀从而埋深过浅并与地表大气水连通或由于断裂与地表沟通时, 除游离气散失外, 吸附气一方面由于降压解吸变为游离气散失, 另一方面由于氮气、二氧化碳具有更强的吸附性而置换甲烷, 页岩气保存条件丧失。

与北美陆台在历次构造运动中未受巨大变动不同, 多陆块、地块拼合形成的统一中国南方大陆经历了多期构造运动叠加改造, 隆升剥蚀强烈, 断裂极其发育, 导致保存条件复杂。与北美页岩气评价较少涉及保存条件不同, 生气高峰或热演化定型后的构造—保存条件是南方海相页岩气评价的重点内容。

利用 BasinMOD 1 - D 盆模软件, 对南方海相不同类型构造—沉积区的各套泥页岩埋藏史和热史进行了模拟, 推断南方海相下寒武、下志留、上二叠统泥页岩主要在印支期—燕山期达到生气高峰, 在印支期—喜山早期热演化定型。印支运动以来的多期抬升剥蚀、断层活动, 使南方海相油气保存条件发生分异。

印支期区域隆升剥蚀使扬子地块东南缘、华南褶皱带及华夏地块剥蚀强烈, 中三叠统几乎剥蚀殆尽, 上三叠统普遍以角度不整合覆于下三叠统或古生界及元古界之上; 燕山期及其以后是中国南方剥蚀作用最为强烈的时期, 上扬子区四川盆地陆相地层遭受强烈剥蚀, 中下扬子地区三叠统一侏罗系除陆相地层遭受剥蚀仅局部残留外, 其海相层系遭受肢解, 残留不均匀剥蚀, 除上述地区外, 中国南方其他地区仅局部残留陆相地层, 海相地层剥蚀强烈。

经过多期构造运动叠加改造后, 中国南方断层发育, 有形成时间较早的主干断层(构造边界大断层和一些长期活动的深断裂)以及晚期发育的大量

张性正断层。平面上,主干断层在大巴山、大洪山逆冲褶皱带,中扬子江汉盆地、湘鄂西地区,下扬子苏皖南断块区、江南隆起怀玉山、雪峰构造带,滇黔桂大部分地区十分发育,一般5~10条,多的可达15条,如雪峰构造带南缘、康滇隆起区;而四川盆地、娄山断褶带、苏皖北断块区、湘中桂东北断褶带、桂中坳陷则相对发育较少,一般2~3条(见图3)。晚期正断层则主要发育在以齐岳山断层向南西经遵义

北、六盘水、曲靖抵康滇隆起一线以东的地区,以西为正断层不发育区。

综合断裂、剥蚀和盖层条件,南方海相页岩气保存条件有利的地区是四川盆地及其周缘(见图4)。保存条件较好的地区包括江汉盆地、苏北盆地、黔中隆起及其周缘、南盘江坳陷、桂中坳陷、湘中坳陷和十万大山盆地。

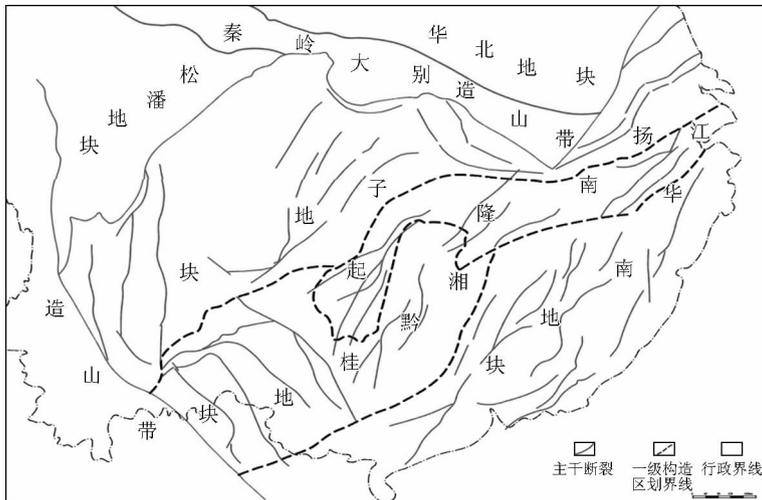


图3 中国南方中、古生界主干断裂平面分布图

Fig. 3 Main faults distribution of Mesozoic and Paleozoic in southern China

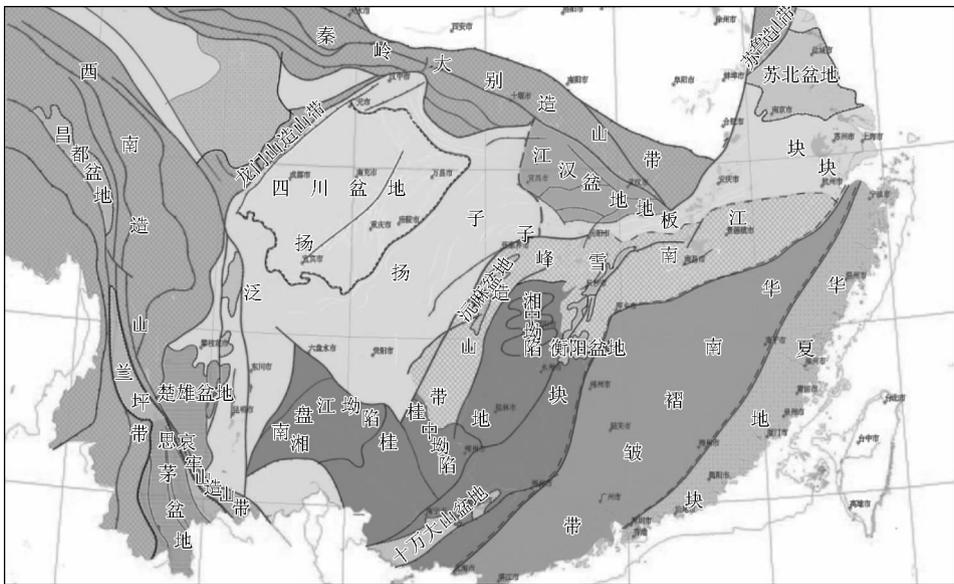


图4 南方海相页岩气保存有利单元综合评价图

Fig. 4 Units favorable for marine shale gas preservation in southern China

南方海相页岩气原始地质条件较好,四川盆地及其周缘保存条件较好,是南方海相页岩气规模勘探开发现实区。

4.2 陆相泥页岩 TOC、孔隙度相对较低

四川盆地中下侏罗统、江汉盆地古近系、苏北盆地白垩系—古近系页岩气保存条件较好,已勘探开发众多致密储层油气田。但与美国已成功开发的热成因页岩气相比,TOC、孔隙度相对较低。

美国已开发的热成因页岩气层 TOC 一般大于 2.0% (见表 2),总孔隙度一般为 3.0% ~ 8.0%^[2];南方三大陆相盆地 TOC 平均在 1.0% ~ 2.0%,总孔隙度除四川盆地川东北地区大安寨段、千佛崖组外,均明显偏低。

表 2 美国主要热成因页岩气 TOC、总孔隙度统计表

Table 2 Statistics on TOC, total porosity for thermal-genic shale gas in U. S.

页岩名称	时代	TOC/%	总孔隙度/%
Barnett	C ₁	2.0 ~ 7.0	4.0 ~ 5.0
Fayetteville	C ₁	2.0 ~ 9.8	2.0 ~ 8.0
Woodford	D ₃	1.0 ~ 14.0	3.0 ~ 9.0
Haynesville	J ₃	0.5 ~ 4.0	8.0 ~ 9.0
Marcellus	D ₂	3.0 ~ 12.0	约 10.0

南方陆相 TOC 明显偏低,可能与南方陆相湖盆范围相对局限、沉积速率较快、有机质被稀释有关,具体原因尚待进一步评价研究。

富有机质泥页岩中孔隙包含有机孔和无机孔两部分,其孔隙度影响因素较多。南方陆相孔隙度明显偏低,一方面与 TOC 明显偏低相对应,在热演化程度相同的情况下,有机孔隙发育与 TOC 呈正相关关系;另一方面,与热演化程度相关,Jarvie 等(2010 年)研究认为,随着有机碳向烃类和碳质残渣转化,孔隙空间将会显著增加(见图 5)^[3]。四川盆地富有机质泥页岩孔隙度较高,可能与其较高的热演化程度相关。泥页岩中无机孔应该与矿物成分和成岩作用相关。

南方三大盆地陆相泥页岩中,四川盆地中下侏罗统具有适中的热演化程度和较高的孔隙度,勘探开发潜力较大。

4.3 地表条件复杂

页岩气的勘探开发需要大规模的压裂,因此对地表条件要求比较苛刻。

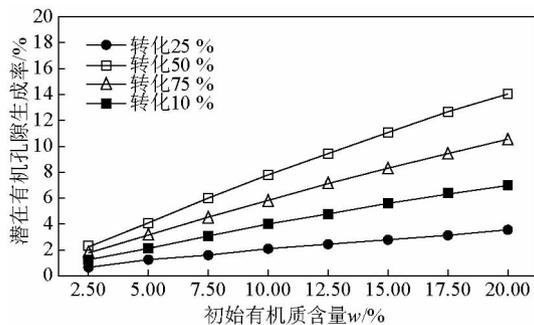


图 5 有机质含量、转化率与孔隙空间的关系

Fig. 5 Relations between TOC, conversion ratio and pore space

美国本土的地形特征是东西两侧高,中间低,没有东西走向的山脉。东部为阿巴拉契亚山脉和大西洋沿岸低地,西部属科迪勒拉山系,中部为大平原,从北到南贯穿整个美国中部,约占美国国土面积的二分之一。而我国南方地区中高山地形多,海拔落差较大,局部的丘陵、平原地区亦湖泊众多、水网发达,总体地表条件复杂,为页岩气勘探与开发带来一定困难。

地形在一定程度上是以地质构造为基础的。中国南方复杂的地质构造决定了中国南方地形复杂。

5 结语

中国南方地区海相、陆相多层系均具备页岩气形成的地质条件,但同样面临诸多挑战,不能盲目乐观。因此:

- 1) 南方海相页岩气勘探评价要把泥页岩生烃史与保存条件作为选区的首要条件;
- 2) 四川盆地海相、陆相页岩气是实现中国南方页岩气规模勘探开发的现实地区;
- 3) 江汉盆地、苏北盆地可作为南方页岩气勘探的后备领域。

参考文献

[1] 马永生, 陈洪德. 中国南方构造——层序岩相古地理图集 [M]. 北京: 科学出版社, 2009.

[2] 董大忠, 邹才能, 李建忠, 等. 页岩气资源潜力与勘探开发前景 [J]. 地质通报, 2011, 30(2/3): 324 - 336.

[3] Daniel M Jarvie. Shale gas: making gas and oil from shale resource system [R]. USA: Dalas Geological Society, 2010.

(下转 112 页)