

# 页岩气成藏条件及我国黔南坳陷页岩气 勘探前景浅析

杨振恒 李志明 沈宝剑 韩志艳

(中国石化石油勘探开发研究院无锡石油地质研究所, 江苏省无锡市 214151)

**摘 要:** 页岩气具有自身的成藏机理, 需要特殊的地质条件, 其成藏主要受控于页泥岩厚度、面积、总有机碳含量、有机质成熟度、矿物岩石成分、压力和温度等因素。将页岩气评价总结为生气能力、储集气能力和易开采性3个方面。黔南坳陷页泥岩自下而上主要集中在震旦系陡山沱组、下寒武统、中寒武统、上泥盆统和二叠系。通过地球化学分析, 认为该地区具有页岩气成藏的基本条件, 其中下寒武统( $\epsilon_1$ )黑色高碳质页岩系和二叠系吴家坪组( $P_2w$ )页泥岩分布面积广泛, 厚度大, 有机质含量和热演化程度高, 并且含有较多的硅质成分, 是最为有利的勘探层位。

**关键词:** 页岩气; 黔南坳陷; 页泥岩; 吸附; 成藏条件

**中图分类号:** TE122.2 **文献标识码:** A

黔南坳陷位于扬子准地台<sup>[1]</sup>, 面积近4000km<sup>2</sup> (图1), 自20世纪50年代以来, 在黔南坳陷及其周边若干

钻井中发现了油气显示<sup>[2]</sup>。近年来, 在海相页泥岩研究不断有新的成果<sup>[3-5]</sup>, 黔南坳陷自震旦系至二叠系均有页泥岩发育。本文以页岩气成藏特点与成藏条件解析为基础, 通过研究该地区优质页泥岩的地球化学和有机岩石学等特征, 对该地区页岩气勘探前景进行浅析, 旨在为该地区进一步开展页岩气成藏研究工作奠定一定的基础。

## 1 页岩气成藏特征

页岩气指主体以游离、吸附或者溶解方式存在于页泥岩及其间所夹砂质、粉砂质泥岩地层中的天然气<sup>[6,7]</sup>, 页岩气具有自生自储的特点。在成因机理上, 页岩气具有多种生气机理, 未成熟的生物气、低熟—未熟气、高一过成熟气以及二次生气等生气方式可以在美国不同的页岩盆地中找到存在实例<sup>[6-9]</sup>; 美国页岩气盆地中页岩的干酪根以I型与II型为主, 也有少量为III型干酪根<sup>[8,10-12]</sup>。共同点是不同类型的干酪根的页岩中都生成了大量的天然气。页岩气成藏的主要动力源自分子间作用力、生气膨胀和毛细管力等, 在吸附平衡和游离平衡机理的

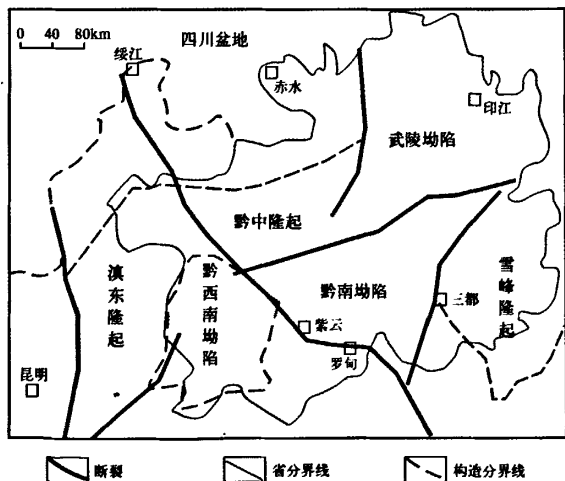


图1 黔南坳陷及其周围构造区划图

Fig.1 Location of Southern Guizhou Depression and its main sections around

第一作者简介: 杨振恒, 男, 硕士, 主要从事石油地质综合研究工作。

收稿日期: 2009-03-25

约束下,产出的天然气经过初次运移成藏吸附在富含有机质的表面和聚集在岩石颗粒孔隙和裂缝中<sup>[5-7]</sup>。

已有的研究成果表明,天然气在页泥岩中的赋存有 两种基本方式:①以物理或化学的形式吸附在有机基质 或者矿物表面;②以游离气的形式存在于有机质分解或 其他成岩、构造作用所形成的孔隙或裂缝中。在页岩中, 页岩气吸附状态主要以物理吸附方式存在,有机质富集 程度、干酪根类型、热成熟度、矿物成分含量和地层压 力都对页岩的吸附能力有影响<sup>[7-9]</sup>,以游离态存在的天 然气主要受岩层的孔隙度、构造裂缝和压力等因素控制。

## 2 页岩气成藏的有利地质因素

控制页岩气成藏的主要因素有总有机碳含量、有 机质成熟度、岩石矿物成分、地层压力、温度、优质泥 页岩厚度和分布面积等,结合有利于页岩气开采的地 质特征,可将页岩气评价总结为生气能力、储集气能力 和易开采性三大方面。

### 2.1 总有机碳含量

有机质含量是生烃强度的主要影响因素,它决定 着生烃的多少。同时,页岩中的有机物质不仅是作为气 体的母源,也可以“范德华力”将气体吸附在其表面。 页岩对气的吸附能力与页岩的总有机碳含量之间存在 正相关关系。在相同压力下,总有机碳含量较高的页岩 吸附的甲烷比总有机碳含量较低的页岩吸附的甲烷明 显要高。在对 Antrim 页岩总有机碳含量与含气量关系 的研究中发现,二者呈密切的正相关关系(图2)<sup>[9]</sup>,说 明总有机碳含量对页岩气含气量有重要的影响作用。

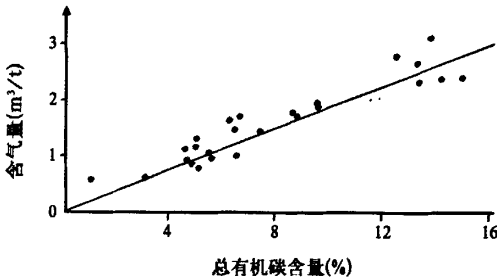


图2 Antrim 页岩总有机碳含量与含气量关系  
Fig.2 Correlation of total organic carbon and gas quantity of Antrim Shale

### 2.2 有机质成熟度

页岩要成为潜在的页岩气勘探目标,其成熟度必

须进入生气窗<sup>[13]</sup>,但有研究者认为,页岩气具有多种生 气机理,并且可以在美国不同的页岩盆地中找到存在 实例<sup>[5-7]</sup>。根据众多研究成果<sup>[8,9,13]</sup>,页岩气要具备经济 开采价值,页岩处于生气窗内是甚佳的条件。

含气页岩的热成熟度越高表明页岩生气量越大, 研究发现,低成熟 Barnett 页岩的地方,产气速率比较 低,这可能是由于生成天然气的量少,供气不足造成 的。在许多 Barnett 页岩高成熟的井当中,产气速率比 较高,这是因为干酪根和石油裂解产生的气量迅速增 加。在 Antrim 页岩中,热成因气含量在向盆地中心方 向即向干酪根热成熟度增加的方向增加(图3)<sup>[7]</sup>。干酪 根的热成熟度大小也影响页岩中能够被吸附在有机物 质表面的天然气量。随着热演化程度的增加,页岩气的 吸附气量会逐渐变大<sup>[7]</sup>。因此,热成熟度是评价可能高 产页岩气的关键地球化学参数。

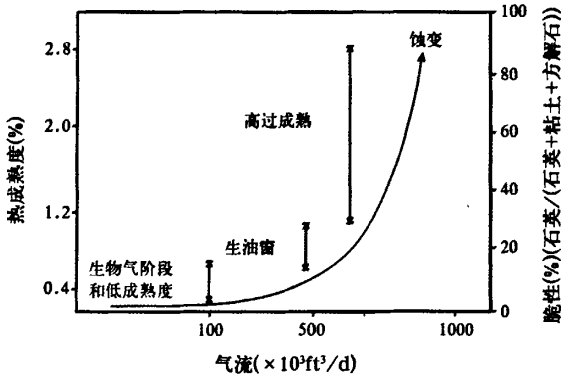


图3 天然气产量随烃源岩热成熟度、脆性的增加而增加  
Fig.3 Gas production increases with the increase of source rock thermal maturity and brittleness

### 2.3 岩石矿物成分

岩石矿物的存在一方面将影响到吸附气含量的大 小,另一方面对页岩气的开采产生影响。页岩气的产出 部分依赖于天然裂缝、人工制造裂缝或是存在互层的 可渗透岩相。页岩的矿物成分较复杂,除高岭石、蒙脱 石、伊利石等黏土矿物以外,还混杂石英、硅质成分、 长石、白云石、云母等许多碎屑矿物和物质。这些物质 的存在影响了地层的脆性,从而影响天然裂缝的生成 以及人工制造裂缝的能力。页岩中各种矿物含量对 页岩气的开采影响很大,根据美国开发页岩气的经验, 含气页岩作为细粒致密砂岩储层,碳酸盐含量的增加会

降低页岩气的地质储量<sup>[8]</sup>,富含硅质的页岩要比富含黏土质页岩在人工压裂中起到更好的作用<sup>[10]</sup>。

## 2.4 地层压力

地层压力与页岩中气体的含量密切相关,随着压力的增加,泥页岩的游离气会增加,同时,泥页岩中以吸附方式存在的天然气也会增加。

## 2.5 地层温度

现今地层的温度越高,对页岩气的储集能力越不利。一方面,温度越高,相同压力下游离气的含量越低。同时,温度越高,吸附气的含量也越低(图4)。

## 2.6 面积和厚度

众所周知,广泛分布的泥页岩是形成页岩气的重要条件。同时,沉积厚度是保证足够的有机质及充足的储集空间的前提条件,页岩的厚度越大,越有利于页岩气成藏,也越能增强页岩的封盖能力,有利于气体的保存。美国五大页岩气勘探开采区的页岩净厚度为30~300ft,其中产气量较高的Barnett页岩和Lewis页岩的平均厚度在100ft以上<sup>[6]</sup>。

另外,岩层中较高的含水饱和度对天然气的储存不利,页岩气藏所处的地理位置将影响到页岩气藏的开采评价,结合近年来页岩气的研究成果<sup>[5~13]</sup>,将页岩气评价总结为生气能力、储集气能力和易开采性三大

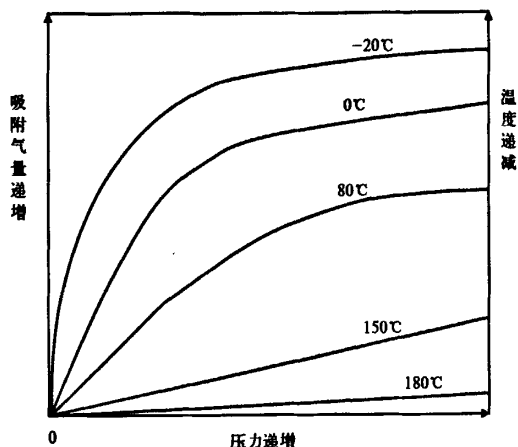


图4 不同温度下甲烷在页岩上的吸附量示意图  
Fig.4 Sketch map showing methane adsorption on shale with different temperatures

方面。生气能力与总有机碳含量、有机质成熟度、页岩的厚度和面积成正相关,储集气能力包括储集游离气和吸附气两个方面,储集游离气主要控制因素为孔隙度、含气饱和度、压力和温度,吸附气主要控制因素为总有机碳含量、成熟度、压力和温度,易开采性主要控制因素为岩石矿物成分、自然裂缝系统和渗透率等。上述各因素在某些方面存在着联系和制约,有利的页岩气成藏带是生气能力、储集气能力和易开采性的有效组合(图5)。

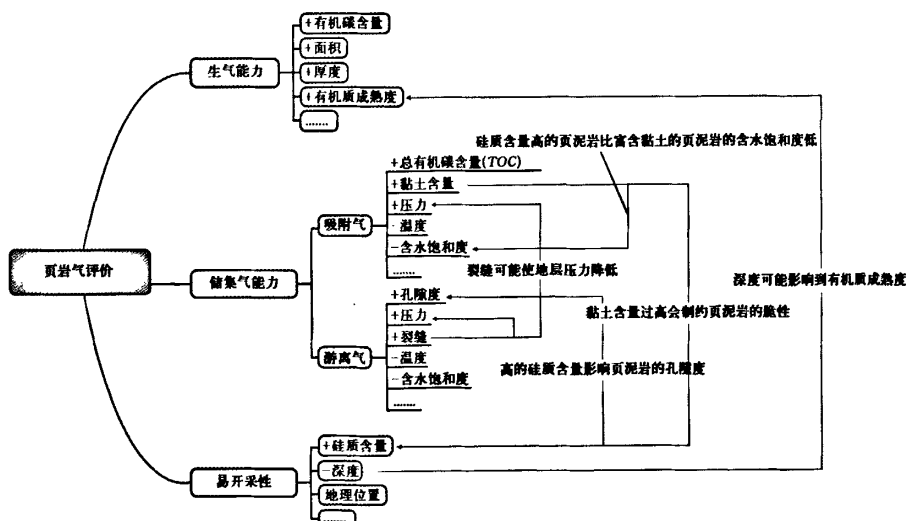


图5 页岩气评价三大方面及各因素可能存在的制约关系  
Fig.5 Three major aspects of shale gas assessment and their correlations  
+表示正相关;-表示负相关

### 3 我国黔南坳陷古生界页岩气勘探前景

#### 3.1 古生界页岩岩特征

黔南坳陷纵向上自震旦系至二叠系均有泥页岩发育,其中早寒武世初期和二叠纪发育有两套泥页岩,最有利于页岩气成藏<sup>[2-5,14]</sup>,现分述如下。

震旦系陡山沱组( $Z_1d$ ):震旦系陡山沱组以黑色页岩为主,夹白云岩,有机质偏腐泥型,厚度十几米至数十米,黑色页岩 TOC 为 1.76%~2.81%,沥青反射率为 3.4%~3.7%,热演化程度较高,但局限在三都地区。

下寒武统( $\epsilon_1$ ):发育一套黑色高碳质页岩系,含黄铁矿,其底部见有数米厚的黑色薄层硅质岩夹层或结核状磷块岩。该套黑色页岩系在三都地区扎拉沟剖面上厚度近百米,TOC 约为 2.0%~6.0%,有机质类型属偏腐泥型,烃源岩沥青反射率为 3.08%~3.42%,指示热演化已进入过成熟阶段。

中寒武统( $\epsilon_2$ ):黑色页岩和深灰色泥灰岩沉积,总厚度达 300 余米,TOC 为 0.15%~2.25%,有机质类型也属偏腐泥型,热演化已经处于过成熟阶段。中寒武统在其他地区均为灰色—深灰色碳酸盐岩沉积。

上寒武统( $\epsilon_3$ ):主要由深灰色粉砂质(泥质)灰岩组成,其他地区主要为浅灰—灰色块状白云岩、石灰岩,厚度巨大,其总有机碳含量在三都地区为 0.05%~0.38%,平均为 0.21%,其他地区更低。

下奥陶统( $O_1$ ):该区内缺失中、上奥陶统,沉积相上,在三都地区主要为浅海相灰色块状灰岩夹深灰色页岩,总有机碳含量低,平均在 0.05%左右。

志留系( $S_{1-2}$ ):该地区中、下志留统的泥质岩 TOC 平均为 0.11%,碳酸盐岩 TOC 约为 0.13%。

泥盆系( $D_{2-3}$ ):黔南独山剖面 and 云南禄劝地区茂山剖面中泥盆统主要以灰色石灰岩为主,顶部见厚约 10m 的深灰色、黑色页岩,总有机碳含量为 2.17%,沥青反射率为 2.83%,有机质类型属偏腐泥型。

二叠系(P):梁山组( $P_{1l}$ )以深灰色、灰黑色砂质页岩为主夹薄煤层,厚度一般在 20m 左右,页岩 TOC 为 1.76%~7.88%,镜质组反射率为 1.58%;栖霞组( $P_{1q}$ )上部为灰、深灰色中厚层至厚层致密灰岩,夹有薄层黑色页岩,中部见有十几米厚的眼球状灰岩,下部为深灰色、灰黑色薄层至中厚层致密灰岩,层间多见有黑色或褐色页岩;茅口组( $P_{1m}$ )总体上为灰色、深灰

色中厚层至块状灰岩,厚度为 60~240m,石灰岩 TOC 为 0.02%~0.66%;吴家坪组( $P_{2w}$ )上部为灰色、深灰色石灰岩,含泥质燧石团块或条带,下部为褐黄、褐灰色薄层含泥质硅质岩,夹砂质页岩及黑色碳质页岩,其中夹有薄煤层,总厚度为 120~860m,底部黑色硅质岩和页岩厚度约 20m,黑色页岩、硅质岩 TOC 为 1.82%~7.09%,石灰岩 TOC 为 0.17%,有机质类型属混合型,以 II 型为主,镜质组反射率为 1.75%~1.8%,处于高成熟阶段。

#### 3.2 勘探前景

根据页岩气成藏机理特点和成藏的有利地质因素,结合黔南坳陷地质特点和现有资料(页岩地层的压力、温度和孔隙度等因素由于缺少相应资料未做考虑),优选出有利于页岩气成藏的地层主要是下寒武统( $\epsilon_1$ )黑色高碳质页岩系和二叠系吴家坪组( $P_{2w}$ ),这些页岩主要处于还原—强还原性的沉积环境,具有:①总有机质含量高,普遍 TOC  $\geq 2\%$ ,最大 TOC 达 10%左右;②有机质成熟度大,一般处于高成熟—过成熟演化阶段,其中的下寒武统( $\epsilon_1$ )黑色高碳质页岩系已经进入过成熟阶段,对生气有利,二叠系吴家坪组( $P_{2w}$ )也处于高成熟阶段;③分布面积广,基本覆盖了黔南坳陷的大部分地区,厚度大(大于 50m),大部分为上百米的优质泥页岩;④页岩岩与硅质岩相伴生,其中下寒武统( $\epsilon_1$ )以碳质页岩和硅质页岩为主,二叠系吴家坪组( $P_{2w}$ )下部为褐黄、褐灰色薄层含泥质硅质岩。硅质相伴的页岩脆性大,对页岩气的开采十分有利,最有可能获得高产页岩气流。

### 4 结 语

(1)页岩气成藏机理特殊,影响页岩气成藏主要为生气能力、储集气能力和易开采性三大因素,控制参数主要有总有机碳含量、有机质成熟度、压力、温度、页岩厚度、面积、矿物成分和孔隙度等。

(2)黔南坳陷最有利于生成页岩气的页岩岩主要层位是下寒武统( $\epsilon_1$ )、二叠系吴家坪组( $P_{2w}$ )。这两个岩层页岩岩分布面积广泛,厚度大,有机质含量高,热演化成都高,并且含有硅质成分,具有页岩气成藏的基本条件,加强这些层位的研究和勘探意义重大。

致谢:无锡石油地质研究所腾格尔高工和付小东工程师无私提供了部分研究资料,在此表示衷心的感谢!

## 参考文献

- [1] 滇黔桂石油地质志编写组. 中国石油地质志[M]. 北京: 石油工业出版社, 1987.
- [2] 周明辉, 梁秋原. 黔中隆起及其周缘地区“下组合”油气地质特征[J]. 海相油气地质, 2006, (2): 17~24.
- [3] 腾格尔, 秦建中, 郑伦举. 黔南坳陷海相优质烃源岩的生烃潜力及时空分布[J]. 地质学报, 2008, 28(3): 365~372.
- [4] 腾格尔, 秦建中. 黔东南地区震旦系—二叠系海相优质烃源层的时空分布[J]. 海相油气地质, 2008, 13(2): 37~44.
- [5] 梁狄刚, 郭彤楼. 中国南方海相生烃成藏研究的若干新进展(一). 南方四套区域性海相烃源岩的分布[J]. 海相油气地质, 2008, (2): 1~16.
- [6] 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.
- [7] 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, 2008, 92(1): 87~125.

- [8] 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.
- [9] 蒲泊伶, 包书景, 王毅, 等. 页岩气成藏条件分析——以美国页岩气盆地为例[J]. 石油地质与工程, 2008, 22(3): 33~39.
- [10] Hank Zhao, Natalie B Givens, Brad Curtis. Thermal maturity of the Barnett Shale determined from well-log analysis. AAPG Bulletin, 2007, 91(4): 535~549.
- [11] Jarvie D M, Hill R J, Ruble T E, et al. Unconventional shale-gas systems: The Mississippian Barnett Shale of northcentral Texas as one model for thermogenic shale gas assessment. AAPG Bulletin, 2007, 91(4): 475~499.
- [12] Hill R J, Zhang E, Katz B J, et al. Modeling of gas generation from the Barnett Shale, Fort Worth Basin, Texas. AAPG Bulletin, 2007, 91(4): 501~521.
- [13] Bowker K A. Barnett Shale gas production, Fort Worth Basin: Issues and discussion, AAPG Bulletin, 2006, 91(4): 523~533.
- [14] Curtis J B. Fractured shale gas system. AAPG Bulletin, 2002, 86(11): 1921~1938.

## (上接第9页)

用计算出的成熟度指数  $MI$  与油气比  $GOR$  交会和拟合, 得出  $MI=0.373\lg GOR+4.45$ 。将  $MI$  值在井位上进行标定, 并以  $MI$  值作等值线图,  $MI<5$  为产油区域,  $MI$  为 5~7 时为主要产湿气和凝析油的区域,  $MI>7$  的区域则只产干气(图3)。

## 4 结 语

传统的常规天然气藏的认识方法约束了我国对页岩气的勘探研究, 常规天然气藏往往和圈闭相联系。而页岩气藏的非常规特性决定了其不同于常规气藏的聚集模式, 导致了页岩气藏在更广阔的空间和时间内聚集成藏。目前对页岩气的研究工作还比较薄弱, 且针对砂岩储层的勘探几乎对页岩层段不进行任何解释工作的情况下, 通过对页岩气藏地球化学机理和气藏评价方法的研究, 确定页岩中总有机碳含量和成熟度指标为页岩气评价的主要参数, 且这两个参数可以通过测井资料确定。这就为后续页岩气的勘探提供了技术的保障。TOC 大于 2%、成熟度大于 0.4% 的区域都是页岩气勘探的有利地区。

测井方法在油气藏评价方面一直扮演着重要的角

色, 本文证明了测井响应识别页岩气目的层的有效性, 初步探究和介绍了页岩气藏参数的求算方法, 以求能够更加准确有效地识别优质页岩气藏。在生产实践中, 通过了解国外的相关研究和国内的发展形势, 利用测井方法对一些老井进行复查, 有望获得页岩气勘探方面的重大突破。

## 参考文献

- [1] 蒲泊伶, 包书景, 王毅, 等. 页岩气成藏条件分析——以美国页岩气盆地为例[J]. 石油地质与工程, 2008, 22(3): 33~39.
- [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, 2004, 24(7): 15~18.
- [3] 张金川, 徐波, 聂海宽, 等. 中国天然气勘探的两个重要领域[J]. 天然气工业, 2007, 27(11): 1~6.
- [4] 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.
- [5] 岳炳顺, 等. 东濮凹陷测井烃源岩评价方法及应用[J]. 石油天然气学报, 2005, 27(3): 351~354.
- [6] 许晓宏, 黄海平, 等. 测井资料与烃源岩有机碳含量的定量关系研究[J]. 江汉石油学院学报, 1998, 20(3): 8~12.