

# 四川盆地海相页岩气地质特征和资源潜力

周 婉

中国石油化工股份有限公司江汉油田分公司采气一厂 湖北 445412

**摘要:** 随着我国页岩油气资源开发水平的不断提高,向更深层次开发已成为一种必然,但目前对海相页岩油气体系的认识还比较薄弱,对其物理性质、含气率等主要控制因素的认识还不够清晰,严重制约了我国页岩气的勘探进展。本文分析了四川盆地海相页岩气地质特征以及资源潜力,提出海相页岩气的发展方向,以期能够为相关工作提供借鉴与帮助。

**关键词:** 四川盆地;海相页岩气;资源潜力

前言:中国页岩气勘探和开发进入高速发展时期,四川盆地五峰组-龙马溪组海相页岩已发现川南和涪陵两大页岩气大气田,取得了较好的规模开发效果,并形成了一套以水平井多级压裂为主的海相页岩气勘探和开发技术和设备系统,取得了较好的成果。然而,尽管四川盆地地区页岩气有着很大的资源潜力,但目前对其资源量的估算仍然比较笼统,导致有利区的探索尚不明确。

## 1 区域地质概况

龙马溪组页岩是盆地中最重要的一套页岩,在盆地中以粉砂岩为主,以粉砂岩为主,灰黑色-黑色页岩,泥-粉砂岩互层为主<sup>[1]</sup>。龙马溪组页岩已进入一次成熟期,等值的反射系数仅在2.0%~3.6%之间,是一次高成熟期。研究区位于四川盆地东南缘的林滩矿区,在川东南断层褶皱带与黔北凹陷的交会部位,在川东南地区的大地构造演化过程中,主要发育NE向、NW向断层,NE向断层以NE向、NW向断层为主。LA井位于林滩常构造区的南端,是一个以黑色岩系为主的龙马溪组第I段,埋藏深度超过4000米。龙一段按其埋藏深度及岩性可分为上、中、下三个亚段,下三个亚段均发育有薄层灰黑色钙质页岩系。

## 2 四川盆地海相页岩气地质特征

### 2.1 岩相划分标准及方法

在五峰-龙马溪时期,由于广西构造运动的影响,华夏和扬子板块的拼贴速度减慢,四川盆地及周边地区呈现出“三隆一洼”的古地质-沉积格局,盆地内及周边地区呈现出一种“古隆起”半封闭、水平静的陆架型,沉积了大量的低能、高沉积速率的海相页岩,并保存了大量的古生物化石。在龙马溪组早期,该区处于低能量、缺氧、欠补偿的深水陆架环境,以泸州为核心,以黑色碳/硅质页岩、(灰)黑色页岩、黑色粉砂质页岩等为主要特征,是页岩气形成的一个有利相带,对页岩气形成

具有重要意义。

不同的岩相中,反映出的沉积环境也不尽相同,因而也就产生了不同的含气性地质特征。前人从多个方面提出了多种类型的岩相划分方法,如HAN等根据矿物组成对五峰-龙马溪组的岩相进行了分类,而ZHANG等则在此基础上将有机碳组分引入到龙马溪组的岩相中,并以此为依据对其进行了新的分类。武瑾等人也应用相似的方法,划分了鄂尔多斯盆地山西组二叠系中的页岩岩相。已有的工作表明,尽管划分标准不同,但是它们都能有效地区分出不同的沉积环境,是对页岩地质特性进行精细研究的重要方法。本项目拟在已有研究成果的基础上,以龙一段为研究对象,通过矿物学三端元分析,选择2%的有机碳含量,将其划分为不同类型的有机碳含量,从而实现岩相的精细划分<sup>[2]</sup>。

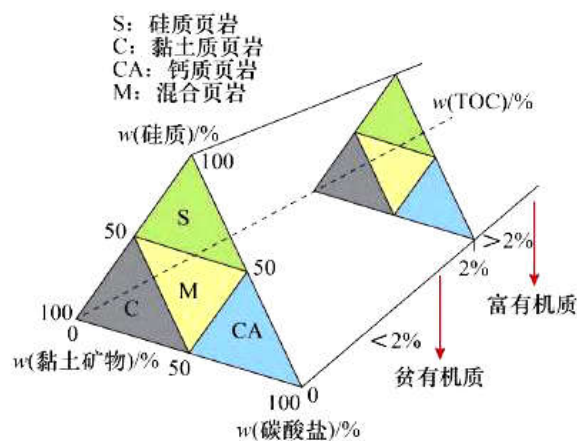


图1 页岩岩相划分标准

### 2.2 有机质丰度

有机质含量是影响油气田开发潜力的重要因素。研究区深层龙一段的有机碳含量在0.65%~6.43%之间变化幅度很大,平均变化幅度约为2.45%。根据矿物质量分数分级结果,发现不同页岩中有机质丰度存在显著差异。

其中,硅质泥页岩有机质含量较高,平均为5.4%,高于黏土页岩有机质含量较高;与硅质泥相比,混合泥中有机碳含量较少,平均为3.0%;而泥页岩中有机质含量较低,平均只有1.3%。在已有研究的基础上,拟将有机质含量确定为2%。

### 2.3 物性特征

页岩储集层主要有有机孔、无机孔和不同类型的微裂隙。本区深部页岩气储集层普遍存在着大量的有机孔,孔径较大,多为50-300nm的中、微观孔隙,孔隙形状为椭圆形或不规则,孔隙连通性良好。与有机孔隙相比,无机孔隙(如碳酸盐岩溶解孔隙)更加发育,且呈松散的嵌套结构,粒间孔隙非常发育,孔隙直径可达到微米量级。深部页岩中的天然裂隙较多,主要表现为微裂隙,裂隙长度在数十微米到数百微米之间,裂隙宽度在数微米到数十微米之间,裂隙主要由有机质填充。深部泥质岩因其高地层压强,不仅保持了有机质和无机质的孔隙,而且孔隙受到成岩作用的影响很小,孔隙度接近于浅层泥质岩,且微裂隙发育,物理性质优于浅层泥质岩<sup>[1]</sup>。研究区深部隆一段的孔隙度在0.53%-10.82%(平均3.76%)之间变化幅度较大。不同岩相组的页岩孔隙度差异较大,以RS组的平均孔隙度最大,达8.62%;LM、CM泥页岩平均孔隙度为2.61%、2.08%,显著低于前两种泥页岩平均孔隙度。

### 2.4 孔隙形貌和类型定性表征

不同岩相组的泥质储集层具有较大的孔隙类型差异。对RS、RM页岩来说,有机孔隙广泛存在于有机质中,孔隙形态多种多样,既有多边形也有不规则形,孔径大小从数十纳米到数百纳米,还存在着一些连片的孔隙。同时,2种类型的岩石中均有FM、CM孔隙的存在。铁素体中的孔道以颗粒间溶解形成的孔道为主,其形状不规则,孔道直径约为数十nm,通常是单独分布的。CM孔隙以黏土矿物间的晶间空隙为主,并以黏土矿物与骨架粒子的边沿或边沿缝隙为主。对长石、长石页岩而言,其铁、钙孔隙与长石页岩的孔隙非常类似,但有机孔隙的发育却显著落后,只有极少数单独的有机孔存在,这说明长石、长石页岩的有机碳丰度远低于长石页岩相,这就造成了长石页岩有机质孔形成的物质基础不清,单位体积有机质孔隙发育不充分。

### 2.5 孔隙结构定量表征

N<sub>2</sub>吸附是当前对多孔材料进行定量表征的重要方法。研究区龙1组页岩按N<sub>2</sub>吸附量等温线划分,为典型的反S形曲线。当压力较小时,吸附量随时间的推移而降低,说明样品中有微孔。随着相对压力的增大,在0.4-

0.5范围内,吸收-解吸曲线出现了一个滞后回路;随着相对压强的增加,含氮气体吸附量显著增加,说明含氮矿物中含有大量的中、大孔隙。研究区页岩中的迟滞环为H<sub>2</sub>、H<sub>3</sub>混合迟滞环,表明有墨水瓶、狭缝、平行板状等孔隙。此外,通过对研究区页岩样品微观孔容、孔径分布的分析,可以看出其孔隙率以2-5nm孔隙为主,10nm以上的孔隙率在整个孔隙体系中所占比例较低。总体上看,比表面与孔隙度具有良好的正相关关系,且不同岩相的孔隙度与孔隙度存在显著差异,其中,RS、RM两种页岩的孔隙度与孔隙度均显著高于LM、LC两种页岩。

### 2.6 含气性特征

随着地层温度的上升,页岩气达到一定压力后,对储层的吸附作用逐渐减弱,而游离气含量则逐渐增加。本区五峰组一龙一亚段深部页岩埋藏深度大,地层温压高,水压系数一般在2以上。高温高压环境不仅有利于深部页岩的保存,而且能够提高深部页岩的含气量和游离气含量。在3200m以后,对泥页岩的含气量、游离气所占比例明显增加,而吸附气所占比例基本维持不变,泥页岩的含气量主要取决于泥页岩中游离气所占比例,因此,深部泥页岩具有“双高”的含气量优势。

## 3 四川盆地海相页岩气资源量

### 3.1 评价单元划分

页岩气储集层具有很强的非均质性,储层物性参数在垂直方向、水平方向上存在着很大的差异。为降低页岩地质特征不均匀性对资源量计算结果的影响,本项目拟在纵向上划分评价单元,横向上划分评价区域。以“含气泥页岩系统”为依据,以含气泥页岩为主要特征,连续厚度>30m,以富有机质泥页岩为主,可夹有砂岩、碳酸盐岩等夹层。该地区本区五峰组一龙一1亚段深层页岩厚度33-82m,平均62m,在五峰组一龙一1亚段与龙马溪组互层间夹杂着一层不到1米厚的观音桥段石灰岩,地层连续,平均有机质含量为3.1%,R<sub>0</sub>在2.0%-3.0%之间。本项目拟针对该区域页岩地质特征复杂的特点,根据储层参数的优劣对评价区进行分区,以降低页岩气储层非均质性对评价结果的影响,实现页岩气资源的准确估算。对影响页岩气储层优劣与富集程度的关键参数标准如表1所示<sup>[4]</sup>。

表1 页岩气分级储层参数标准表

| 评价参数     | I类区   | II类区    | III类区   |
|----------|-------|---------|---------|
| 有效页岩厚度/m | > 50  | 30~50   | < 30    |
| TOC      | > 3%  | 2%~3%   | 1%~2%   |
| 脆性矿物含量   | > 55% | 45%~55% | 30%~45% |
| 有效孔隙度    | > 5%  | 3%~5%   | 2%~3%   |
| 含气量      | > 3.0 | 1.5~3.0 | < 1.5   |

### 3.2 资源量计算

目前,国内外对页岩气资源储量的估算主要有类比法、统计法、生成法等3种方法,其中FORSPAN法、递减曲线法是国际上常见的,而统计法则为容积法/概率容积法、类比法是国内较为常见的。本项目拟在已有的地质、钻井、生产动态数据的基础上,综合考虑页岩含气面积、有效厚度、密度、含气量、单井最终可采储量、资源丰度区、地质参数类比标准、相似系数等因素,采用单井最终可采储量模拟法、资源丰度模拟法、小面元模拟法等方法,确定深部页岩气资源量。

### 3.3 关键参数选取

按照已有的标准,深部有效页岩的分布面积与深部页岩的分布面积相一致,深部有效页岩的分布面积约为38418km<sup>2</sup>。利用露头剖面测量数据和钻井数据,确定了评价区内各参数井的有效页岩层厚度,绘制了有效页岩层厚度等值线。针对页岩非均质性强的特点,本项目拟采用小面元方法对评价单元进行划分,并利用最小曲率面插值方法对评价单元进行有效划分,以保证有效层数的准确性。利用最小曲率方法,确定了本区深部海相页岩的有效岩层厚度为56米。本区五峰组-一龙马溪组海相页岩具有相似的矿物组成与结构特征,其密度变化较小,大致相同,故可通过测井与岩芯数据求取平均密度(2.58t/m<sup>3</sup>)。在已有评价井含气量数据的基础上,利用面积加权平均法,计算出该地区页岩平均含气量为4.55m/t。

### 3.4 资源量计算结果

首先采用EUR类比法、资源丰度类比法、小面元法对本区深层页岩气资源进行估算,然后采用特尔菲法对本区五峰组-一龙1亚段进行综合估算,得出本区深层页岩气资源储量为25.62×10<sup>12</sup>m<sup>3</sup>,根据本区实际生产经验,核定采收率为24%,可开采的页岩气储量为6.14×10<sup>12</sup>m<sup>3</sup>。利用EUR模拟法计算页岩气储量时,需考虑工程等不确定性因素,而加密井网、立体井网可使页岩气储量大幅增加。

## 4 四川盆地海相页岩气发展前景

目前,我国海相页岩气的发展还面临一定挑战,四川盆地五峰组-龙马溪组页岩中浅层段的开发已进入中后期,周边替代区资源质量下降,难以实现规模化高效开采和稳定生产,制约了我国页岩气藏的发展。我国深部页岩气储量丰富,但由于其构造和地应力条件复杂,断层和微结构发育,压裂改造困难,易发生套变和压窜,导致气井产量下降;川南深部页岩气与北美相比,由于其高温、高压、高应力等特点,工程设备的适配性亟待

提高,其钻井和压裂施工的效果和效率与北美相比仍有一定差距,开发费用高,限制了其规模化高效开发<sup>[5]</sup>。

为此,技术人员应积极改进与之相适应的页岩气立体开发配套技术,不断优化页岩气地球物理评价技术。本项目拟以我国典型的深部泥质储层为研究对象,以深部泥质储层地应力场为切入点,通过研究深部泥质储层地应力场的垂直和垂直方向变化大、孔隙和储层压力分布复杂等特点,重点突破基于物探数据的深部泥质储层地应力评估和预测方法,揭示深部泥质储层的各向异性岩体力学特性,构建对地应力敏感的岩体物理模型,优化地应力测井方法和方法,突破各向异性反演方法,提高深部泥质储层地应力场垂向和横向方向的预报精度。本项目拟在已有研究基础上,开展以地球物理为基础的天然裂隙识别技术研究,并在井边和井边开展基于阵列声波的测井技术研究,形成一套较为完善的井边裂隙测井技术体系。在此基础上,突破叠前各向异性断层的地震预报技术,通过对叠后资料进行频率提升,以提高断层的强度,从而形成以地震为基础的精细断层预报技术。

结论:四川盆地占地18×104km<sup>2</sup>,是全国最具开发前景的一片含油气盆地。其中川南地区五峰组-一龙1亚段深层页岩气资源储量为25.62×10<sup>12</sup>m<sup>3</sup>可开采的页岩气储量为6.14×10<sup>12</sup>m<sup>3</sup>。由此可见,四川盆地海相页岩气具有广阔的资源开发前景,同时也要重视技术发展,通过发展新技术提高开采效率,从而使我国页岩气开采得到更好的发展前景。

### 参考文献

- [1]王恩泽,郭彤楼,刘波等.四川盆地深层海相页岩地质特征及其含气量主控因素分析[J].中南大学学报(自然科学版),2022,53(09):3615-3627.
- [2]张素荣,董大忠,廖群山等.四川盆地南部深层海相页岩气地质特征及资源前景[J].天然气工业,2021,41(09):35-45.
- [3]付锁堂,付金华,席胜利等.鄂尔多斯盆地奥陶系海相页岩气地质特征及勘探前景[J].中国石油勘探,2021,26(02):33-44.
- [4]杨跃明,陈玉龙,刘桑阳等.四川盆地及其周缘页岩气勘探开发现状、潜力与展望[J].天然气工业,2021,41(01):42-58.
- [5]王恩泽,郭彤楼,刘波等.海陆过渡相页岩岩相、孔隙特征及有利岩相富气条件——以四川盆地东南缘林滩场地区二叠系龙潭组为例[J].石油勘探与开发,2022,49(06):1132-1142.