doi:10.3969/j.issn.1007-3701.2016.02.010

# 湘中地区涟源凹陷石炭系测水组泥页岩储层特征

苗凤彬1,王 强1,白云山1,谭 慧2

MIAO Feng-Bin<sup>1</sup>, WANG Qiang<sup>1</sup>, BAI Yun-Shan<sup>1</sup>, TAN Hui<sup>2</sup>

(1.中国地质调查局武汉地质调查中心,武汉 430205; 2.湖南华晟能源投资发展有限公司,长沙 410004) (1. Wuhan Center of China Geological Survey, Wuhan 430205, China;

2. Hunan Huasheng Energy Resource and Investment Development Co., Ltd., Changsha 410004, China)

摘要:石炭系测水组是涟源凹陷重要的页岩气勘探层位,针对页岩气藏自生自储、低孔低渗的特征,进行测水组泥页岩储层 特征研究是该区页岩气勘探与开发的关键问题。本文基于野外露头、钻探井及样品实验测试数据等资料,对测水组泥页岩 储层分布、矿物组成、物性、含气性等特征进行了细致分析。测水组泥页岩在凹陷中部褶皱带厚度最大、埋深适合;泥页岩中 脆性矿物含量超过 70%,有利于天然裂缝的发育与后期的压裂改造。泥页岩内微孔隙与裂缝较为发育,孔径分布范围 3.71 ~ 19.07 nm,以介孔为主,具有较大的孔比表面积,孔径与总孔隙体积随埋深增加呈减小趋势。储层孔隙度为 1.0% ~ 6.2%, 平均为 3.5%,渗透率变化较大,受裂缝发育程度的影响,为典型的低孔低渗非均质储层。受埋深较浅的影响,样品整体含气 量较低,分布在 0.16-0.49 m<sup>3</sup>t,但等温吸附测试的吸附气量远大于解析气量,表明在合适的埋深下测水组仍具有较好的储 气能力。综合评价认为,涟源凹陷测水组泥页岩具有形成优质页岩气储层的潜力。 关键词:泥页岩储层;孔隙类型;孔隙度;含气性;测水组;涟源凹陷 中图分类法:P534.45,P618.13 文载标识码;A 文章编号:1007-3701(2016)02-172-08

# Miao F B, Wang Q, Bai Y S and Tan H. Shale Reservoir Characteristics of Ceshui Formation in Lianyuan Depression in the Middle of Hunan Province. *Geology and Mineral Resources of south China*,2016,32(2):172–179.

**Abstract:** The Carboniferous Ceshui Formation in Lianyuan Depression is regarded as an important shale gas exploration layer. Based on the characteristics of "self-generation and self-accumulation" and "low porosity and low permeability", the study on shale reservoir is a key issue in the exploration and development of shale gas. Based on a vast amount of data from outcrops, well cores and experimental analysis, the reservoir characteristics of Ceshui Formation are analyzed in detail, such as the regional distribution, mineral composition, physical properties and gas content. The shale reservoir of Ceshui Formation in the central fold belt have a greatest thickness and an appropriate buried depth. And it has high contents of brittle minerals more than 70%, which is favorable for the generation of natural fractures and the late fracturing treatment. Pores and natural fractures in shale reservoir are common. The micro-pore size is ranged in  $3.71 \sim 19.07$ nm and the mesoporous with high specific surface area are predominant. The micro-pore size and pore volume have a general trend of decreasing with increasing burial depth. Reservoir porosity is ranged from  $1.0\% \sim 6.2\%$  with an average of 3.5%. The permeability which is affected by the natural fractures in reservoir varies greatly and the shale reservoir have a severe inhomogeneous proper-

收稿日期:2016-04-23;修回日期:2016-06-08.

基金项目:中国地质调查局项目"湘中坳陷页岩气资源远景调查(12120114049701)"资助.

第一作者:苗凤彬(1986—),男,硕士,主要从事非常规油气勘探与低渗透储层研究工作,E-mail:mfb.52163@163.com.

ty. The gas content of shale samples with 0.16–0.49 m<sup>3</sup>/t is low because of the shallow burial depth. But the adsorbed gas content of the samples is more than the gas content, and the shales still have a large storage capacity with an appropriate burial depth. The comprehensive evaluation indicate that the Ceshui Formation in Lianyuan Depression can be an excellent reservoir for shale gas.

Key words: shale reservoir; pore type; porosity; gas content; Ceshui Formation; Lianyuan depression

页岩气是指赋存于暗色泥页岩及其它岩性夹层 中,以吸附和游离态为主要存在方式的非常规天然 气<sup>1-21</sup>,因其清洁、低碳、高效等特性,在国际上受到高 度重视。北美地区页岩气藏的成功开发改变了其原 有的能源结构,也引起了我国对页岩气资源的密切 的关注,近年来,我国在全国范围内加大了页岩气藏 的勘探开发力度。

湘中涟源凹陷地区油气勘探工作始于上个世纪 六十年代,先后完成了20多口常规天然气钻探井, 且多口井有良好的气体显示或低产气流。直至2012 年,凹陷内的第一口页岩气探井——湘页1井顺利 完钻,标志着该区页岩气勘探工作的全面开始,湘页 1井位于涟源凹陷桥头河向斜中心区,在目的层二 叠系大隆组泥页岩中获得一定产气量,预示了湘中 地区良好的页岩气勘探前景。湘中涟源凹陷晚古生 代地层中存在多个暗色泥页岩层系,其中,石炭系测 水组泥页岩系是该区重要的页岩气勘探层位,其暗 色泥页岩累计厚度较大、分布广泛、有机碳含量高, 具有形成优质页岩气藏的潜力。页岩气藏具有典型 的自生自储、低孔低渗特征,因此进行测水组泥页岩 储层特征的精细研究是该区页岩气勘探的关键问 题。

1 区域地质特征

涟源凹陷位于湘中地区北部,娄底—新化—带, 整体呈北西西向展布,沉积基底为前泥盆系,盖层从 泥盆系到第四系均有发育,区内构造线主要呈北 东—北北东向,面积约6770 km<sup>2</sup>。

该凹陷西邻雪峰山隆起,东部接衡阳盆地西部 隆起,北部为沩山凸起,南部为龙山一白马山凸起 (图1)。区域构造以多期次、多层次的层滑构造为 主,构造样式较为复杂,凹陷内可进一步划分为西北 断褶带,中部褶皱带和东部断褶带。西北断褶带西与 雪峰山隆起相接,东以集云断裂为界,叠瓦状逆冲断 层及其间的紧闭褶皱为其主体构造样式。中部褶皱



图1 涟源凹陷构造位置 Fig.1 Tectonic location of Lianyuan depression

带东西分别以集云断裂带和凤冠山断裂带为界,主 要发育了青峰向斜、车田江向斜、桥头河向斜、恩口 - 斗笠山向斜, 向斜内部构造简单, 各层系保存较完 整,地层厚度稳定,向斜间以紧闭的背斜相隔,构成 了该区典型的隔档式褶皱构造样式。东部断褶带位 于凤冠山逆冲断裂带以东,与衡阳盆地西部隆起相 接,发育一系列逆冲断层和张扭性断层。凹陷内从前 泥盆系浅变质基底形成后至早三叠世, 地层基本连 续沉积, 泥盆系至三叠系沉积的各个层位原始沉积 厚度相对稳定,区内缺乏中三叠统及以上层位,下石 炭统几乎在全区均有展布。中部构造带的向斜形态 相对完整,核部地层年代较新,为上二叠系或三叠系 下部层位;背斜的核部出露的地层较老,目抬升剥蚀 严重,一般为早、中石炭统,部分地区出露泥盆系<sup>13-4</sup>, 该带是凹陷内石炭系测水组页岩气勘探的主要区 域,分布着多口常规天然气与页岩气的钻探井。

涟源凹陷区下石炭统测水组为一套滨海 - 滨 海沼泽沉积的含煤碎屑岩,厚度几十米至上百米不 等,在整个湘中地区均有分布,其岩性主要为石英砂 岩、炭质泥页岩、砂质泥页岩夹煤层及少量泥灰岩<sup>[5]</sup>。 泥页岩在该组上下段均有分布,在下段较为集中,且 多含炭质,煤层也主要分布于中下段的泥页岩与粉 砂岩中,累计厚度 1~15 m 不等,上段泥页岩有所减 少,以石英砂岩、砂质泥页岩为主。从整个湘中地区 来看,涟源凹陷测水组泥页岩最为发育,最大累积厚 度可达100余米,往南经邵阳凹陷至零陵凹陷厚度 逐渐减薄。

## 2 泥页岩储层分布特征

涟源凹陷测水组沉积中心位于冷水江一温塘— 安平一带,该带泥页岩累计厚度也最大,钻井资料显 示位于该带上冷水江附近的涟8井与温塘附近的邵 5井泥页岩厚度均超过70m。中心区域泥页岩厚度 多大于20m,向边缘呈减薄趋势,西北边缘地区厚 度接近10m,厚度较大的泥页岩均分布在中部褶皱 带上(图2)。测水组在中部褶皱带车田江、桥头河、恩 口-斗笠山三个向斜中心区域埋深均大于1000m, 而在向斜之间的背斜区埋深很浅甚至被剥蚀。

# 3 储层矿物学特征

泥页岩矿物组分是影响其岩石力学性质的根本 因素。泥页岩基质孔隙度和渗透率一般较低,当石 英、长石、碳酸盐等矿物含量较高时,岩石的脆性增 强,其内天然裂缝与孔隙易于发育,极大的改善了泥 页岩的储集性能<sup>6-7</sup>。北美优质页岩储层矿物成分中,



图2 涟源凹陷测水组泥页岩厚度分布 Fig. 2 Shale thickness of Ceshui Formation in Lianyuan depression

脆性矿物含量多大于 30%,如 Fort Worth 盆地 Barnett 页岩中石英的质量分数为 35% ~ 50%,San 盆地 Lewis 页岩中石英的质量分数为 50% ~ 75%<sup>[38]</sup>,而黏 土矿物质量分数一般小于 30%。对涟源凹陷测水组 野外露头与岩芯样品的 X 射线衍射分析发现:测水 组泥页岩矿物成分以石英为主,其平均质量分数为 60.8%,其次是黏土矿物,平均质量分数为 23.3%,长 石和碳酸盐矿物含量较低,黏土矿物中,占主要比例 的是伊利石与伊蒙间层。测水组泥页岩中,石英、长 石、黄铁矿和碳酸盐矿物等脆性矿物所占比例在 35.5% ~ 93.5%之间,均值为 73.7%,与北美优质页岩 储层相比,其脆性矿物含量略高,黏土矿物含量略 低,在外力作用下更容易形成诱导缝,对后期储层的 压裂改造较为有利。

涟源凹陷针对测水组的钻井 LC1 井与 LY2 井 不同深度泥页岩样品中,石英、长石、黄铁矿和碳酸 盐等脆性矿物的质量分数分布在 50.1% ~ 93.5%, 均值高达 75%,其岩芯上天然裂缝较为发育,多个 深度处裂缝密度大于 3.0 条 /m,以构造裂缝为主, 层理缝次之,对比岩芯纵向上脆性矿物含量与天然 裂缝的发育程度发现,二者之间具有较好的正相关 性(图 3)。

# 4 储层物性特征

对于页岩气藏,泥页岩既是烃源岩又是储集层, 孔隙和裂缝是其主要的储存空间与重要的渗流通 道,二者发育程度决定着储集层物性的优劣,并直接 关系到页岩气藏的储量与开发的难易。

#### 4.1 储集空间类型

通过对凹陷内岩芯样品的氩离子抛光 – 扫描 电镜观察发现,测水组泥页岩存在大量微孔隙与微 裂缝。微孔隙主要包括矿物粒内孔、粒间微孔、晶间 微孔、矿物溶蚀孔、有机质微孔 5 类,微裂缝主要为 构造缝。

测水组泥页岩矿物粒间孔普遍发育,平面上形 状多样,主要分布于矿物颗粒边界处,孔径范围多为 1~5μm之间(图 4a)。粒内孔多形成于成岩演化阶 段,在测水组泥页岩中也较为常见,其孔径明显小于 粒间孔隙。该区泥页岩中局部发育一些晶间微孔,由 晶粒间矿物溶蚀或有机质热演化消耗而形成,如黄 铁矿晶粒间多存在这类孔隙,其孔径多小于1μm (图 4b)。矿物溶蚀孔在矿物颗粒内部与颗粒间皆有 发育,因长石、碳酸盐矿物等溶蚀所形成,其孔径一般较大,以微米级为主,常与微裂缝相伴生(图4c)。 测水组有机质微孔隙多存在于有机碳含量较高的泥 页岩中,其孔隙直径一般小于1µm,呈密集分布状 态,平面上呈不规则形状,空间上形成洞穴状、蜂窝 状等复杂结构(图4d)。且对照泥页岩样品有机质成 熟度发现,成熟度较高的样品,其有机质微孔隙也相 对较为发育。

测水组泥页岩中发育较多的微裂缝,与其脆性 矿物含量较高及该地区经受的多期构造应力作用相 关。微裂缝宽度主要为纳米级,其延伸长度从纳米一 微米不等,最大可达几十微米,以构造裂缝为主,在 矿物内与矿物间均有分布(图 4e)。此外,在不同矿 物颗粒分界处或有机质与矿物分界处微裂缝也比较 发育,为应力作用下矿物颗粒相互挤压与溶蚀作用 所形成(图 4f)。

测水组泥页岩除微孔隙与微裂缝较发育外,纵 向上多个深度段宏观裂缝也发育强烈,主要为构造 缝和层理缝(图 5)。对于低孔、低渗的泥页岩储层, 孔隙与裂缝系统不仅为气体提供了有效的储集空 间,也是重要的渗流通道,对改善泥页岩的储集性能 及开发过程中压裂缝的形成与扩展具有重要作用。 裂缝对渗流的贡献大于孔隙,尤其是多角度裂缝构 成的网状裂缝系统,对于连接纵横向气体的运移有 重要贡献。

#### 4.2 孔隙结构

泥页岩储层的孔隙结构相对复杂,孔径较小, 纳米级孔隙普遍发育。LY2 并测水组泥页岩样品的 高压压汞测试结果显示,最大进汞压力为227 MPa,探测孔隙半径下限为 2.7 nm,反映出该区泥 页岩微孔隙主要为纳米级,纳米级孔隙决定了其具 有较大的比表面积。LY2 井与 LC1 井泥页岩样品比 表面积与孔径分布测试结果显示,其平均孔径分布 范围在 3.71~19.07 nm 之间, 主要集中在 5.0~ 10.0 nm,属于介孔级别,而前人研究证明,对渗透 率起贡献的主要为介孔与大孔,且介孔提供了主要 的孔比表面积19-10。测水组泥页岩比表面积主要分布 在 3.01~15.64 m²/g 之间,平均为 11.89 m²/g, 总孔体 积分布在 0.013~0.047 mL/g 之间, 其中, LY2 井总 孔体积平均值为 0.030 mL/g, LC1 井平均值为 0.018 mL/g。对比两口井测试数据发现,LY2 井泥页岩孔径 与总孔隙体积整体大于 LC1 井,其样品所在深度小



图3 测水组泥页岩矿物组成与裂缝密度关系 (上图为LC1井,下图为LY2井)

Fig. 3 Relationship between the mineral composition and the fracture density in cores of Ceshui Formation

于 LC1 井,表明该区泥页岩孔径与总孔隙体积随深 度增加呈较小趋势(表 1)。

#### 4.3 孔隙度与渗透率

涟源凹陷测水组泥页岩储层整体表现为低孔、 低渗特性。从覆压孔渗测定结果来看,LC1 井、LY2 井泥页岩样品孔隙度介于 1.0% ~ 6.2%,平均为 3.5%,测试样品多取自岩芯上裂缝不发育处,渗透率 主要集中在 0.0002 ~ 0.0053 mD,但变化较大,部分 样品渗透率达 0.75 mD,可能与其内部存在较多微裂缝有关。测水组泥页岩储层孔隙度和渗透率总体较低,但样品间存在较强的差异,二者整体呈正相关关系,但相关性不好,表明储层物性受裂缝发育程度影响,具非均质性,裂缝发育带或溶蚀作用强烈带泥页岩渗透率呈现较高值。依据目前国际上页岩气勘探开发实践与页岩储层参数评价标准,优质页岩气储层孔隙度一般不低于 4.00%,美国主要产气页岩



图4 测水组泥页岩孔隙类型(a、b、c、d、f来自LY2井,e来自LC1井) Fig. 4 Pore types for shale of Ceshui Formation



图5 测水组泥页岩岩芯裂缝 Fig. 5 The natural fractures in shale cores of Ceshui Formation

#### 表1 涟源凹陷测水组泥页岩孔隙分布

Table 1 P	ore distribution f	for shale of	<b>Ceshui Formation</b>	in Lian	yuan depression
-----------	--------------------	--------------	-------------------------	---------	-----------------

所在井号	样品深度/m	总孔体积/ (mL/g)	比表面积/(m²/g)	平均孔径/nm
LY2 井	156.3	0.039	15.64	10.63
LY2 井	159.4	0.047	10.81	19.07
LY2 井	160.0	0.027	12.59	7.62
LY2 井	171.2	0.009	3.01	7.66
LY2 井	209.3	0.026	9.44	10.61
LC1井	429	0.018	12.79	5.87
LC1井	451	0.020	12.88	5.37
LC1井	464	0.013	13.97	3.71
LC1 井	494	0.016	12.87	4.84
LC1井	500	0.016	11. <b>94</b>	5.41
LC1井	520	0.022	13.64	6.31
LC1井	524	0.026	14.48	7.08
LC1 井	536	0.013	10.57	4.95

储层孔隙度集中在 4.22% ~ 6.51%, 渗透率普遍低于 0.1 mD<sup>[11-12]</sup>。与美国主要页岩气储层孔隙度和渗透 率相比, 涟源凹陷测水组泥页岩孔隙度略低、渗透率 相当, 但测水组储层存在较强烈的差异性, 两口井测 水组纵向上存在多个裂缝发育带, 有利于气体的储 集与渗流, 能够达到优质页岩气储层的标准。

# 5 储层含气性特征

页岩气主要以吸附态和游离状态赋存于泥页岩 储层之中。从LY2 井测水组泥页岩含气量现场解析 测试结果来看,泥页岩层段所含气以解吸气为主,气 量分布在 0.13~0.37 m<sup>3</sup>/t,其损失气量次之,残余气 含量较少,样品总含气量分布在 0.16~0.49 m<sup>3</sup>/t,平 均为 0.31 m<sup>3</sup>/t,且含气量随深度呈明显分段性规律, 不同层段含气量差异较大(图 6)。LY2 井测水组泥 页岩解析气含量整体较低,考虑到样品所处深度均 小于 200 m,埋藏较浅影响到气体的保存效果从而 导致解析气含量较低。对 6 块测水组样品的等温吸 附实验结果显示,泥页岩对甲烷的吸附量随着压力 增加而增大,饱和吸附量分布在 0.78~1.56 m<sup>3</sup>/t,平 均为 1.26 m<sup>3</sup>/t,样品等温吸附测试得到的吸附气量 远大于解析气总量(图 6),表明测水组泥页岩仍具 有较好的储气能力,在适合的埋藏深度与保存条件下,能够形成好的页岩气藏。

通过对岩芯裂缝的统计,测水组泥页岩岩芯宏 观裂缝发育程度较高,纵向上多个深度段密度大于 2.0条/m,有些层段甚至超过4.0条/m,其对应的岩 芯严重破碎,且宏观裂缝发育段所取样品的微观薄 片与扫描电镜观察结果显示,微裂缝和微孔隙也较 为发育,极大的改善了储层物性。对比所取样品的解 析气量与其所处深度段宏观裂缝与微裂缝发育程度 发现,含气量较高的样品对应深度处岩芯裂缝密度 一般较大,二者具有较好的正相关性,钻探现场的样 品清水试气实验也发现,存在裂缝的样品,裂缝中有 较多的气泡溢出,且持续时间较长。以上分析均表 明,在较好的封存条件下测水组泥页岩较高的裂缝 发育程度对提高产气量有重要作用。

# 6 结论

(1)测水组泥页岩在凹陷中部构造带沉积厚度 较大,尤其冷水江一温塘一安平一带,泥页岩厚度达 到最大值;其在中部构造带的向斜区埋藏较深,而在 背斜区埋深较浅甚至被剥蚀。

(2)测水组泥页岩矿物组成中石英等脆性矿物





含量较高,均值超过70%,黏土矿物所占比例为 23.3%,主要为伊利石与伊蒙间层,泥页岩中较高的 脆性矿物含量有利于天然裂缝的发育与后期的压裂 改造。

(3)测水组泥页岩内微孔隙与裂缝较为发育,孔 隙主要包括矿物粒内孔、粒间孔、晶间孔、矿物溶蚀 孔和有机质孔,孔径分布范围 3.71~19.07 nm,属介 孔级别,且孔径与总孔隙体积随埋深增加呈减小趋 势,裂缝主要为构造缝和层理缝。该区测水组泥页岩 具有典型的低孔低渗与强烈的非均质性,其孔隙度 介于 1.0%~6.2%,渗透率集中在 0.0002~0.0053 mD,均相对较低,但裂缝发育的层段,其渗透率则呈 现较高的值。



体含气量较低,但其等温吸附测试得到的吸附气量 远大于解析气量,表明凹陷内测水组埋深适合、保存 条件较好,具有形成优质气藏的潜力,应作为重要的 勘探靶区,且泥页岩中孔隙与裂缝的发育程度对产 气量有重要作用。

### 参考文献:

- [1] 邹才能.非常规油气地质学[M].北京:地质出版社,2013.
- [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] 王明艳,郭建华,旷理雄,朱锐,周小康.涟源坳陷中部构造 带勘探潜力分析[J].天然气地球科学,2005,16(5):581-586.
- [[4] 朱 锐,郭建华,旷理雄.湘中涟源凹陷镜质体反射率与地 层剥蚀厚度恢复[J].地质调查与研究,2009,32(1):22-26.
- [5] 张琳婷,郭建华,焦 鹏,张 振.湘中地区涟源凹陷下石炭统 页岩气藏形成条件 [J]. 中南大学学报 (自然科学版), 2014,45(7):268-2277.
- [6] Curtis J B. Fractured shale gas systems[J]. American Association of Petroleum Geologist Bulletin, 2002, 86(11): 1921-1938.
- [7] 陈尚斌,朱炎铭,王红岩,刘洪林,魏伟,方俊华.四川盆地南缘下志留统龙马溪组页岩气储层矿物成分特征及意义[J].石油学报,2011,32(5):775-782.
- [8] Daniel M. J, Ronald J. H, Tim R, Richard M P.Unconventional shale-gas systems: The Mississippian Barnett Shale of north-central Texas as one model for thermogenic shale-gas assessment [J].American Association of Petroleum Geologists Bulletin,2007,91(4):475-499.
- [9] Gareth R. Chalmers, R. Marc Bustin, Ian M. Power. Characterization of gas shale pore systems by porosimetry, pycnometry, surface area, and field emission scanning electron microscopy/transmission electron microscopy image analyses: examples from the Barnett, Woodford, Haynesville, Marcellus, and Dio units [J]. American Association of Petroleum Geologists Bulletin, 2012,96(6):1099-1119.
- [10] 张晓明,石万忠,徐清海,王任,徐壮,王健,王超,袁琪.四 川盆地焦石坝地区页岩气储层特征及控制因素[J].石油 学报,2015,36(8):926-939.
- [11] 蒋裕强,董大忠,漆 麟,沈妍斐,蒋婵,何溥为.页岩气储层 的基本特征及其评价[J].地质勘探,2010,30(10):7-12.
- [12]关小旭,伊向艺,杨火海.中美页岩气储层条件对比[J].西 南石油大学学报(自然科学版),2014,36(5):33-39.