

非常规天然气

中扬子地区五峰组—龙马溪组页岩气储层及含气性特征

邱小松¹, 杨波², 胡明毅¹

(1. 长江大学油气资源与勘探技术教育部重点实验室, 湖北 武汉 430100;

2. 长江大学研究生院, 湖北 武汉 430100)

摘要:中扬子地区是中国南方重要含油气区域之一,五峰组—龙马溪组泥页岩在中扬子地区广泛发育,且湘鄂西地区钻遇五峰组—龙马溪组泥页岩的钻井中具有良好的天然气显示。在北美页岩气成功商业开采和我国积极寻找页岩气有利区并争取取得页岩气勘探突破的背景下,现阶段开展页岩气储层和含气性特征等基础研究对指导我国页岩气勘探开发具有重要的现实意义。以中扬子地区深水海相沉积的五峰组—龙马溪组泥页岩为研究对象,在野外剖面和岩心观察的基础上,通过岩石薄片鉴定、矿物含量分析、扫描电镜、物性分析、有机地球化学分析和现场解析等手段,剖析了五峰组—龙马溪组泥页岩的岩相、矿物学特征、储集空间类型和含气性特征。结果表明研究区五峰组—龙马溪组页岩层系主要由泥页岩、硅质泥页岩、笔石泥页岩、炭质泥页岩和粉砂质泥页岩等岩相组成;矿物成分以石英矿物和黏土矿物为主;识别出基质孔、有机质孔、溶蚀孔和微裂缝4种储集空间类型;游离气量和吸附气量范围分别为0.09~0.17m³/t和0.20~0.84m³/t,控制其大小的分别为总孔隙度和有机碳含量,总含气量范围为0.29~1.01m³/t。根据页岩气界定标准认为五峰组—龙马溪组页岩气有利区位于恩施—彭水一带,估算其地质资源量为(0.23~0.81)×10¹²m³,表明中扬子地区五峰组—龙马溪组泥页岩具有较好的页岩气勘探前景。

关键词:中扬子地区;五峰组—龙马溪组;页岩气储层;游离气;吸附气

中图分类号:TE122.2⁺3

文献标志码:A

文章编号:1672-1926(2013)06-1274-10

引用格式:Qiu Xiaosong, Yang Bo, Hu Mingyi. Characteristics of shale reservoirs and gas content of Wufeng-Longmaxi Formation in the middle Yangtze region[J]. Natural Gas Geoscience, 2013, 24(6): 1274-1283. [邱小松, 杨波, 胡明毅. 中扬子地区五峰组—龙马溪组页岩气储层及含气性特征[J]. 天然气地球科学, 2013, 24(6): 1274-1283.]

0 引言

近些年来,随着水平钻井技术、水力压裂技术的进步及天然气价格的不断攀升,一些渗透率差、开发难度大的非常规油气资源逐渐被人们重视起来。页岩气作为非常规油气资源,其资源潜力巨大,是现代油气勘探的重要领域之一。页岩气是天然气生成之后在源岩层内就近聚集的结果,表现为典型的“原

地”成藏模式,具有自生、自储、自保及储层致密等特点,为一种连续性、大规模、低丰度、非常规的天然气聚集^[1-9]。在北美地区已经实现了页岩气商业开发,中国也在积极寻找页岩气开发的有利区,中扬子地区五峰组—龙马溪组黑色页岩具有连续沉积厚度大,有机质含量高及成熟度高等特点^[10-11],具有良好的页岩气勘探前景。因此,开展中扬子地区五峰组—龙马溪组页岩气储层及含气性特征研究对该区

收稿日期:2013-05-18; **修回日期:**2013-07-16.

基金项目:国土资源部“全国页岩气资源调查评价及有利区优选”项目下设课题(编号:2009GYXQ15-06-04-01);湖北省自然科学基金项目(编号:2011CDB005)联合资助.

作者简介:邱小松(1986-),男,湖北黄冈人,博士研究生,主要从事非常规天然气地质研究. **E-mail:** 379482517@qq.com.

通讯作者:杨波(1964-),男,四川大竹人,副教授,主要从事油气勘探开发方面的教学和研究. **E-mail:** ybby2008@126.com.

页岩气勘探开发具有重要意义。

1 区域地质概况

中扬子地区指北以襄广断裂为界、西以湘鄂西地区的花果坪复向斜为界、南以江南隆起为界的区域,面积约为 $15 \times 10^4 \text{ km}^2$,构造上属中扬子准台地(图 1),可划分为湘鄂西区、江汉平原区和鄂东区。研究区经晋宁运动形成稳定地台后,先后经历了加里东期、海西期、印支期、燕山期及喜马拉雅期等重大构造运动改造,经历了克拉通盆地、前陆盆地和断陷盆地等多个构造演化阶段。早志留世龙马溪期是继晚奥陶世以来中上扬子地区盆山格局发生重大转变的时期,该时期受加里东构造运动影响陆块边缘处于挤压、褶皱造山过程,为形成古隆起的高峰阶

段。除边缘的川西—滇中古陆、汉南古陆扩大以外,川中隆起的范围不断扩大,扬子南缘的黔中隆起、武陵隆起、雪峰隆起和江南隆起基本相连形成了滇黔桂隆起带^[1-13]。中扬子地区上奥陶统一中下志留统暗色细粒碎屑岩沉积普遍发育,其中包括五峰组(O_3w)、龙马溪组(S_1l)、罗惹坪组(S_1lr)和纱帽组(S_2s)。上奥陶统五峰组与下伏临湘组碳酸盐岩地层呈整合接触,中志留统纱帽组与上覆泥盆系、石炭系呈不整合接触。五峰组—龙马溪组主要为黑色泥页岩、硅质泥页岩、炭质泥页岩夹泥质粉砂岩,厚度一般为 400~500m,为页岩气储层主要发育层位;罗惹坪组主要为灰绿、黄绿色砂页岩夹灰岩,厚度一般为 650~800m;纱帽组主要为灰绿、黄绿色泥质粉砂岩、粉砂岩,一般厚度为 300~500m。

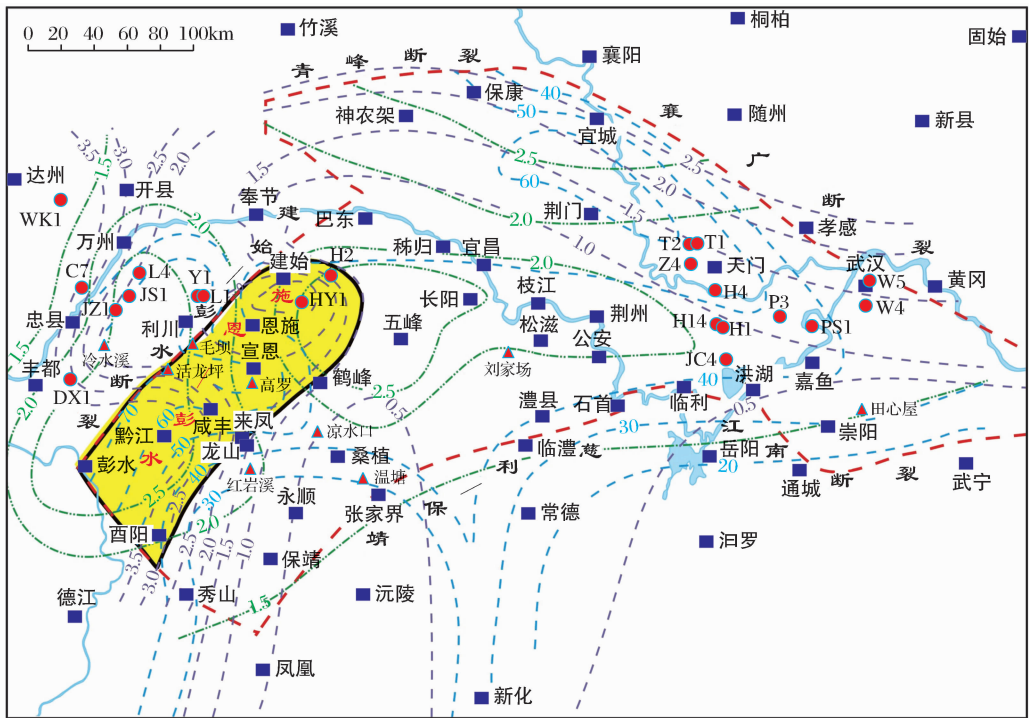


图 1 研究区位置及页岩气有利区分布

Figure 1 Location of study area and advantageous to distinguish layout of shale gas

2 页岩气储层特征

页岩气是指赋存于泥页岩层系中的天然气,所谓泥页岩层系即以暗色泥页岩为主,夹少量薄层状的泥质粉砂岩、粉砂岩、砂岩的岩性组合。在常规油气勘探中,暗色泥页岩颗粒较小,岩石致密,孔渗条件差,一般都作为常规油气藏的烃源岩或盖层,因此对泥页岩储层的研究较薄弱。近年来美国页岩气的

成功勘探开发极大地推动了页岩气储层内部结构和构造特征的研究,笔者通过对页岩气生成、运聚及赋存机理等的分析,分别从岩相、岩石矿物学及储集空间类型 3 个方面对研究区页岩气储层进行论述。

2.1 岩相特征

五峰组—龙马溪组由多种岩性组成,主要为黏土级碎屑岩沉积,根据矿物成分、结构和沉积构造特征等方面将研究区五峰组—龙马溪组页岩气储层分

为 8 种岩相。

(1) 泥(页)岩相。泥页岩主要发育于龙马溪组中下部。在露头剖面上呈灰色—灰黑色,多以薄—中层状产出,发育水平层理、块状层理,可见保存完好的笔石化石[图 2(a)]。镜下观察发现,岩石内陆源碎屑颗粒较少[图 3(a)],矿物组分有黏土、石英、长石、方解石和黄铁矿等,其中石英、长石等呈零星状漂浮于黏土矿物中,其反映沉积环境为相对安静的深水陆棚环境。该岩相脆性矿物含量为 53.2%

~68.2%,有机碳含量为 0.46%~2.38%。

(2) 硅质泥(页)岩相。硅质泥(页)岩主要发育于五峰组—龙马溪组底部,露头剖面上呈灰黑色—黑灰色,以中—薄层状产出,性脆且硬,不易风化,风化后常呈棱角状[图 2(b)]。常含硅藻、放射虫和笔石等化石,这为硅质来源与生物有关提供了证据^[14],其代表着深水陆棚—半深海沉积环境。该岩相脆性矿物含量为 68.5%~73.1%,有机碳含量范围为 1.35%~4.21%。



图 2 中扬子地区五峰组—龙马溪组泥页岩特征及典型沉积构造

Figure 2 Sedimentary characteristics of the shale in Wufeng-Longmaxi Formation, in the middle Yangtze region

(a) 龙山红岩溪剖面,龙马溪组第 4 层,灰黑色中—厚层状泥岩;(b) 利川毛坝剖面,五峰组第 1 层,黑色薄板状硅质页岩;(c) 利川毛坝剖面,龙马溪组第 2 层,黑灰色薄层状笔石页岩;(d) 龙山红岩溪剖面,龙马溪组第 3 层,黑色炭质泥岩;(e) 龙山红岩溪剖面,龙马溪组第 5 层,黑灰色中—厚层状粉砂质泥岩;(f) 利川毛坝剖面,龙马溪组第 8 层,砂岩底界面槽模;(g) 利川毛坝剖面,龙马溪组第 8 层,底部为粒序层理,上部可见丘状交错层;(h) 利川毛坝剖面,龙马溪组第 8 层,风暴具有周期性产生风暴岩与泥页岩具有韵律性

(3) 笔石泥(页)岩相。笔石泥(页)岩主要发育于龙马溪组底部,露头剖面上呈黑色,以薄层状产出,仅见浮游类笔石,保存完好,含量约为 30%。龙马溪组底部泥页岩笔石含量较高,且笔石类型主要为耙笔石,与五峰组叉笔石相区别[图 2(c)]。镜下观察可知,石英、长石颗粒很少,主要为黏土矿物,混有少量分散状黄铁矿[图 3(b)],其代表着安静滞留还原环境,水体较深。该岩相脆性矿物含量在 50.6%~61.2%之间,有机碳含量范围在 1.53%~4.15%之间。

环境。该岩相脆性矿物含量为 52.7%~62.4%,有机碳含量为 1.76%~5.01%。

(4) 炭质泥(页)岩相。炭质泥(页)岩主要发育于龙马溪组下部,在露头剖面上呈灰黑色—黑灰色,中—厚层状,性软,易风化,含有大量炭化有机质,染手[图 2(d)]。其镜下特征与普通泥页岩相似,但有机质含量相对更高,它代表着相对安静的深水陆棚

(5) 粉砂质泥(页)岩相。粉砂质泥(页)岩主要发育于龙马溪组中下部,露头剖面上呈黑灰—深灰色,以中—薄层状为主,发育水平层理,块状层理。粉砂质常以夹层状产出,其中亮纹层为粉砂质层,暗纹层为泥炭质层[图 2(e)]。镜下见石英、长石颗粒,含量约为 20%~40%,分选较差,磨圆中等,呈棱角—次棱角状[图 3(c)];黏土矿物多呈鳞片状,成分主要为伊利石矿物;其反映沉积环境为总体安静但有少量陆源碎屑的浅水陆棚环境。该岩相脆性矿物含量在 48.7%~82.5%之间,有机碳含量范围在 0.17%~1.26%之间。

(6) 泥质粉砂岩相。泥质粉砂岩主要发育于龙马溪组中部,露头剖面上呈深灰色,以中—薄层状为

主,泥质含量为 15%~40%,可见少量的笔石化石,含量一般小于 5%,部分保存完好。镜下观察可知,矿物颗粒以石英为主,长石和岩屑很少,炭质较少,

斑状分布[图 3(d)],其反映沉积环境为水体较深的浅水陆棚环境。该岩相有机碳含量范围为 0.14%~0.62%。

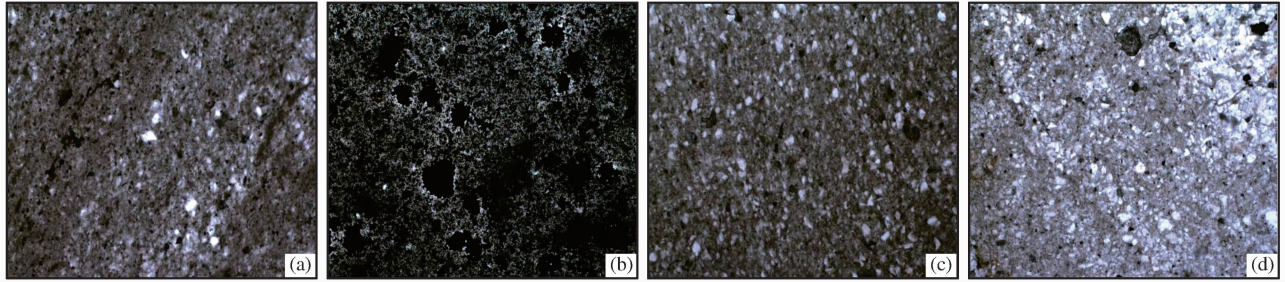


图 3 中扬子地区五峰组—龙马溪组泥页岩镜下特征

Figure 3 Microscopic characteristics of the shale in Wufeng-Longmaxi Formation, in the middle Yangtze region

(a) H2 井, 580m, 灰黑色泥岩, 单偏光, 10×10, 黏土矿物为主, 碎屑颗粒较少; (b) HY1 井, 2 162.9m, 黑色笔石化石, 单偏光, 5×10, 黄铁矿含量较高; (c) H2 井, 700m, 黑灰色粉砂质泥岩, 单偏光, 5×10, 颗粒以石英为主, 分选较差, 磨圆中等; (d) H2 井, 780m, 深灰色泥质粉砂岩, 单偏光, 5×10, 颗粒以石英为主, 炭质含量小, 呈斑状分布

(7)粉砂岩相。粉砂岩主要发育于龙马溪组中上部,露头剖面上呈灰色—深灰色,多呈中层状,泥质含量小于 5%,粗粉砂含量为 20%~40%,细粉砂含量为 50%~80%。矿物颗粒以石英为主,长石和岩屑较少,另含少量黄铁矿,局部颗粒边缘被铁白云石交代,其代表着水体较浅的浅水陆棚沉积环境。

(8)砂岩相。砂岩主要发育于龙马溪组上部,露头剖面上呈灰色—深灰色,呈中层状。覆盖于泥页岩沉积之上,底部可见槽模、粒序层理、丘状交错层理等沉积构造[图 2(f)—图 2(h)]。其代表着风暴浪基面之上浅水陆棚环境。此种岩相与粉砂岩相一般呈夹层状产出。

以上 8 种岩相总体发育于浅水陆棚—深水陆棚的环境中,其中硅质泥(页)岩为深水陆棚—半深海盆地的产物,其脆性矿物和有机碳含量均很高;泥(页)岩、笔石化石泥(页)岩、炭质泥(页)岩为深水陆棚环境的产物,其有机碳含量普遍较高但脆性矿物含量不高;粉砂质泥(页)岩、泥质粉砂岩、粉砂岩、砂岩为浅水陆棚环境的产物,其沉积水动力条件较强,脆性矿物含量高但有机碳含量相对很低。

2.2 矿物学特征

泥页岩矿物成分以石英和黏土矿物为主,含钾长石、斜长石、方解石、铁白云石、白云石、菱铁矿和黄铁矿等。通过对研究区 8 口井 226 块五峰组—龙马溪组泥页岩样品进行全岩 X-射线衍射分析表明:石英矿物含量平均值为 57.6%(50.8%~64.7%),黏土矿物含量平均值为 23.8%(18.7%~29.5%),长石矿物含量平均值为 11.2%(7.5%~15.8%),碳酸盐

矿物含量平均值为 4.8%(1.0%~11.2%),黄铁矿等矿物含量平均值为 1.6%(1.0%~3.4%)(图 4)。

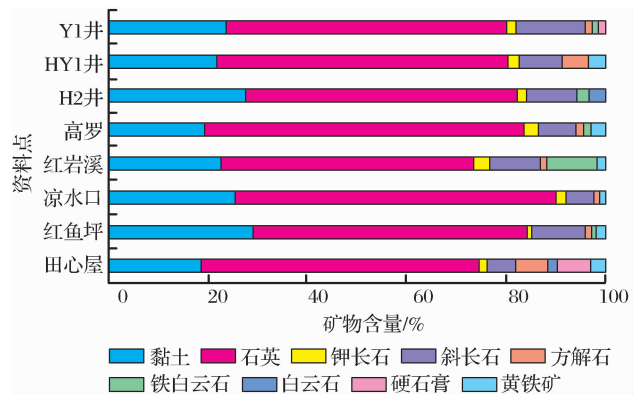


图 4 中扬子地区各剖面五峰组—龙马溪组页岩矿物组分含量

Figure 4 Mineral component content of shale in Wufeng-Longmaxi Formation, in the middle Yangtze region

石英矿物主要为外源碎屑颗粒,呈层状漂浮于页岩中,碳酸盐矿物主要以胶结物形式存在于页岩中,黄铁矿是深水还原环境下自生矿物。矿物组分纵向上随岩性变化而变化,底部泥页岩段黏土矿物含量相对较高,石英含量相对较低;上部主要为粉砂岩段,石英矿物含量较高,黏土矿物含量较低(图 5);其平面上的分布特征表现为石英矿物南东高北西低,黏土矿物则略具北西高南东低的特点,分析表明其分布特征与该时期古地理环境密切相关。

黏土矿物由伊/蒙混层、伊利石、高岭石和绿泥石等构成。其中以伊利石含量最高,绝对含量为 9.4%~15.4%(相对含量为 42.4%~64.4%);伊/

蒙混层次之,其绝对含量为 2.1%~8.7%(相对含量为 11.2%~38.3%);高岭石含量和绿泥石含量相对最小,其绝对含量分别为 0.8%~2.2%(相对

含量为2.0%~23.0%)和 2.6%~6.4%(相对含量为14.0%~23.0%)(图 6)。伊利石含量高与研究区泥页岩高热演化程度及地下流体性质密切相关。

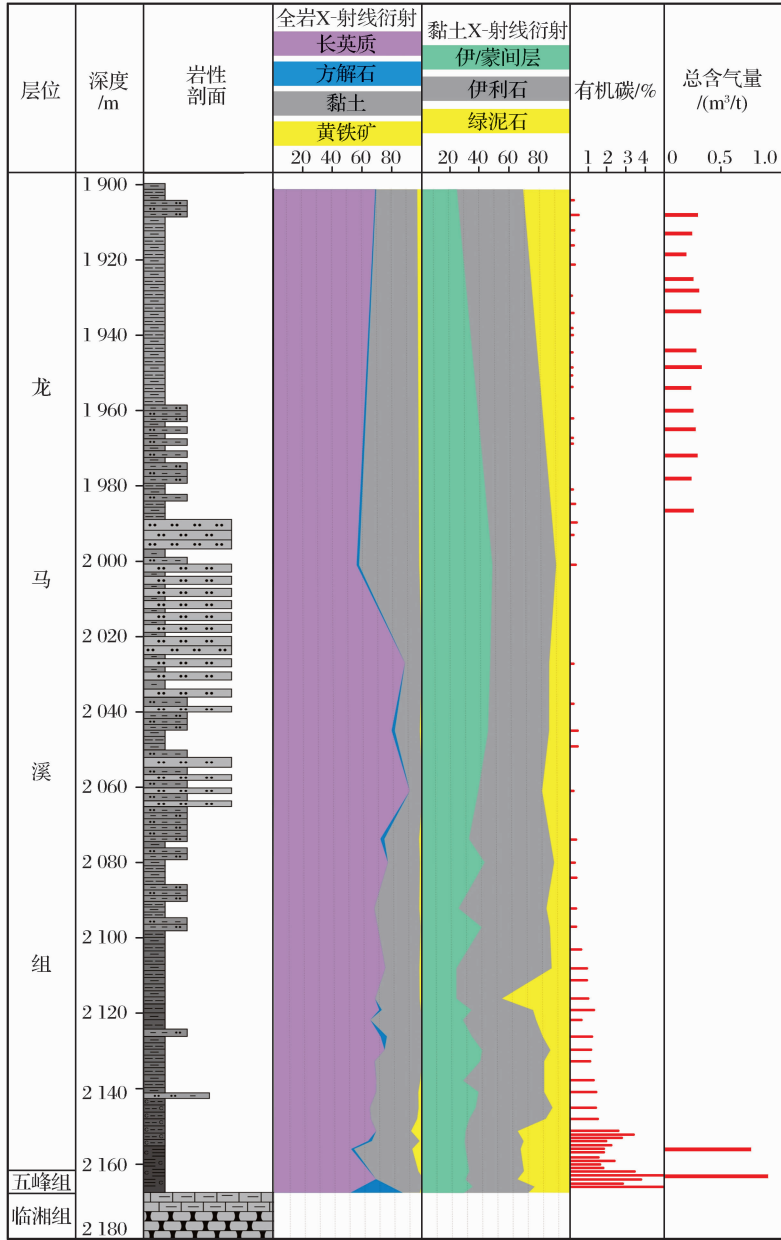


图 5 HY1 井五峰组—龙马溪组岩矿—有机地球化学综合柱状图

Figure 5 Mineral composition and organic geochemical integrated histogram of Wufeng-Longmaxi Formation in well HY1

2.3 储集空间特征

Milner 等^[15]曾针对北美 Haynesville 页岩、Horn River 页岩、Barnett 页岩及 Marcellus 页岩中的微观孔隙进行系统观察,发现上述 4 套泥页岩中主要发育 3 种类型孔隙,即基质晶间孔、有机质孔和粒间孔。笔者通过对中扬子地区五峰组—龙马溪组页岩孔隙类型进行大量、系统观察发现,该套页岩中存在基质孔、有机质孔和溶蚀孔,此外还发育大量

的微裂缝。

(1)基质孔。基质孔指沉积物自沉积后经过压实作用依然保存的原生孔隙,其主要存在于片状黏土矿物、集合体及岩屑颗粒之间^[15]。基质孔在五峰组—龙马溪组泥页岩中普遍发育,但由于受压实作用影响其所占总孔隙度比例较小。扫描电镜下观察到片状伊利石间的孔隙[图 7(a)],孔径大小在 0.2~1.0 μm 之间;绢云母片间孔隙[图 7(b)],孔径大

小在 0.8~2.5 μm 之间;矿物颗粒与周围黏土矿物间孔隙[图 7(c)],孔径大小在 0.6~2.2 μm 之间。

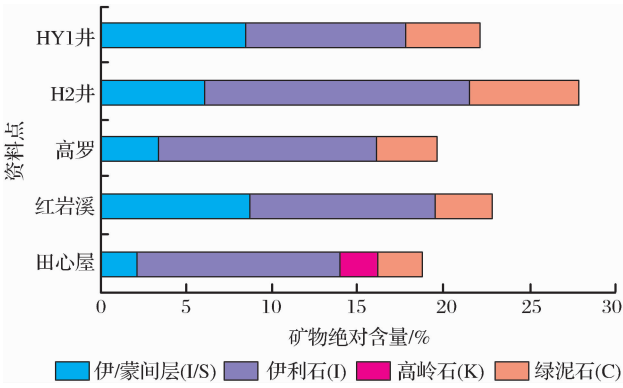


图 6 中扬子地区各剖面五峰组—龙马溪组黏土矿物组分含量

Figure 6 Clay mineral component content of shale in Wufeng-Longmaxi Formation, in the middle Yangtze region

(2)有机质孔。有机质孔指有机质团块内部或者有机质生烃后内部残余的次生孔隙。Loucks等^[16]通过对 Barnett 页岩样品扫描电镜分析发现大量有机质孔,黄振凯等^[17]在松辽盆地白垩系青山口组泥页岩样品中发现孔径为 10~1 500nm 有机质孔,并且总结出有机质孔的形成、分布及大小与泥页岩中有机质含量、类型及热演化程度有着直接关系。中扬子地区五峰组—龙马溪组页岩有机质含量高,有机质类型以 II 型为主,热演化程度较高,总体上处于高一过成熟阶段,因此泥页岩经过漫长的生烃后

残留了大量的有机质孔,为研究区内泥页岩储层内主要储集空间,受分析测试手段局限,其孔径大小有待进一步量化。

(3)溶蚀孔。溶蚀孔指泥页岩中由于溶蚀作用形成的次生孔隙,其形成机理为生烃过程中产生的有机酸或 CO₂ 溶于地层水形成的碳酸将岩石内部碳酸盐、磷酸盐、硅铝酸盐等矿物溶解,产生孔隙^[17]。扫描电镜下观察到矿物溶蚀孔隙,孔径大小在 15.0~20.7 μm 之间[图 7(d)];溶蚀孔中被长石填充后再次被溶蚀,孔径大小约为 8.0~45.0 μm [图 7(e)]。溶蚀微孔隙受地层中流体性质影响明显,各地区发育程度不一。

(4)微裂缝。泥页岩样品中发现大量微裂缝,主要包括黏土矿物层间缝、溶蚀缝、构造缝等。黏土矿物层间缝是由于伊利石的定向排列形成的,缝宽为 1.0~2.5 μm [图 7(f)];溶蚀缝是由于酸性地层水流经裂缝后溶解矿物产生的,缝宽约为 2.0~4.0 μm [图 7(g)];构造缝是由于岩层受应力作用产生破碎形成的微裂缝,缝宽约为 10.0~100.0 μm [图 7(h)]。微裂缝受地层中流体及地应力作用影响较大,各地区差异较大。

通过对以上孔缝特征分析可知,有机质孔最小,一般在 10~1 500nm 之间,属纳米级孔隙^[17],为研究区最重要的储集空间;其次为基质孔,孔径范围一般在 0.1~2.5 μm 之间,仅占总孔隙的一小部分;再次为溶蚀孔,孔径一般在 8.0~45.0 μm 之间,是一种

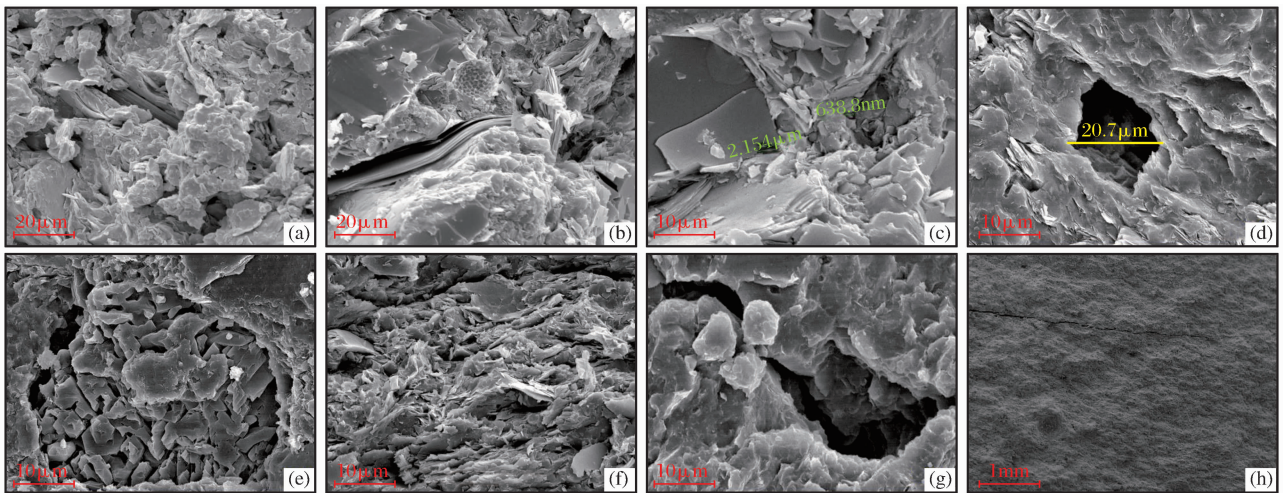


图 7 中扬子地区五峰组—龙马溪组泥页岩储集空间特征

Figure 7 Reservoir space characteristics of shale in Wufeng-Longmaxi Formation, in the middle Yangtze region

(a) H2 井, 690m, 含粉砂泥岩, 片状伊利石间孔隙; (b) HY1 井, 2 159m, 泥质粉砂岩, 绢云母片受挤压发生轻微褶皱变形形成孔隙; (c) HY1 井, 2 159m, 泥质粉砂岩, 石英颗粒与黏土矿物间孔隙; (d) Y1 井, 1 381m, 粉砂质泥岩, 溶蚀微孔隙; (e) Y1 井, 1 416m, 泥岩粉砂质, 溶蚀孔隙填充后再次被溶蚀形成次生孔隙; (f) 崇阳田心屋剖面, 龙马溪组第 4 层, 泥质粉砂岩, 顺层微裂缝; (g) Y1 井, 1 100m, 泥岩粉砂质, 溶蚀微裂缝; (h) 龙山红岩溪剖面, 龙马溪组第 9 层, 泥岩, 构造微裂缝

重要的储集空间,特别是黏土含量相对较高地区,溶蚀孔较发育;最大的为微裂缝,缝宽一般在1.0~100.0 μm 之间,局部地区极为发育,不同地区差异较大。

3 含气性特征

页岩气主要以吸附态和游离态赋存于低孔、低渗的泥页岩中,其中吸附气主要吸附于有机质和黏土矿物表面,游离气主要充填于孔隙与微裂缝中。研究区钻遇五峰组—龙马溪组页岩的钻井较多,利川复向斜带上的Y1井、L1井在钻井过程中多次发现气测异常和气浸;花果坪复向斜带上的H2井龙马溪组气测产气量为3.0 m^3/d ,完井40余年井口仍可见天然气;HY1井五峰组—龙马溪组取心段的炭质泥页岩出筒后岩心表面可见较多针孔状气泡,气泡最大直径可达3mm,对岩心做浸水实验无气泡溢出,泥浆洗净后放置一段时间可见气泡溢出。以上钻井气显示表明研究区五峰组—龙马溪组暗色页岩段存在天然气,本文通过对游离气和吸附气定量计算进一步表征其含气性特征。

3.1 游离气量

游离气是指以游离态充填于泥页岩微孔隙和微裂缝中的天然气。国内外学者普遍认为游离气量取决于孔隙度的大小和含气饱和度。目前国内对泥页

岩孔隙度测试方法主要采用常规孔隙度测试方法和仪器,其测试结果为相互连通的那部分孔隙体积分数,还有部分死孔隙未统计;含气饱和度还没有可靠的测试方法,主要是通过计算得出的结果。

采用SY/T 5336-2006《岩心分析方法》对HY1井下志留统龙马溪组18块泥页岩样品进行孔渗测试表明:孔隙度范围为0.82%~1.84%,平均为1.17%;渗透率范围为(0.002 1~0.023 8) $\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$ 。HY1井五峰组—龙马溪组泥页岩现场解析所得游离气量范围在0.09~0.17 m^3/t 之间,如表1所示^①。根据体积法计算游离气量公式 $q_{\text{游}} = \varphi \times S_{\text{g}} / \rho$ (φ 为孔隙度,%; S_{g} 为含气饱和度,%; ρ 为岩石密度, g/cm^3)^[18-19]可计算出泥页岩中含气饱和度范围为14%~45%(表1)。泥页岩孔隙为游离气储集空间,其对游离气量大小起到决定性作用;含气饱和度与泥页岩层中保存条件密切相关,其对游离气量具有一定的影响作用。

3.2 吸附气量

吸附气是指以吸附态吸附于有机质,部分吸附于黏土矿物、矿物颗粒等表面的天然气。国外学者^[20-22]普遍认为吸附气主要吸附于有机质表面;国内部分学者^[23-25]认为吸附气不仅吸附于有机质表面,而且吸附于黏土矿物及矿物颗粒表面。根据页岩气

表1 HY1井物性参数及现场解析参数

Table 1 Data of porosity permeability and gas content in well HY1

井深/m	孔隙度/%	渗透率/($\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$)	密度/(g/cm^3)	游离气量/(m^3/t)	含气饱和度/%
1 903.28	1.30	0.003 4	2.72		
1 908.34	1.30	0.002 3	2.71	0.13	27
1 913.55	1.25	0.002 7	2.73	0.09	20
1 919.10	1.18	0.003 5	2.73	0.06	14
1 924.88	0.83	0.002 5	2.73		
1 928.85	1.17	0.004 1	2.73	0.16	37
1 933.85	1.41	0.002 4	2.72		
1 943.75	1.03	0.002 1	2.73	0.15	40
1 948.75	1.35	0.003 8	2.71		
1 954.40	1.31	0.002 3	2.72	0.09	19
1 960.40	1.10	0.005 6	2.73	0.1	25
1 965.90	1.03	0.003 1	2.73	0.17	45
1 972.10	0.94	0.003 4	2.73	0.15	44
1 978.80	0.82	0.004 0	2.73		
1 986.85	0.92	0.002 5	2.72	0.09	27
2 155.60	1.23	0.007 0	2.65	0.16	36
2 163.55	1.84	0.005 1	2.54	0.15	21

① 江汉油田勘探开发研究院. 中扬子地区页岩气资源调查评价与选区成果报告. 内部报告, 2011.

吸附理论可知,天然气吸附于物质表面,其表面积越大吸附量越大。表面积可分为外表面积和内表面积2类,理想的非孔性物质仅具有外表面积,多孔物质既具有外表面积还具有内表面积,且其内表面积远大于外表面积。因此,有机质为多孔物质时由于具有大量内表面积较黏土矿物更有利于页岩气的吸附。HY1井有机碳含量测试和现场解析残余气量对比结果表明,有机碳含量与吸附气量关系式为 $y=0.1292x+0.1915$,其相关系数为0.8906(图8)。通过以上关系式说明当有机质含量为0时,其黏土矿物及矿物颗粒表面吸附天然气量为 $0.1915\text{m}^3/\text{t}$;随着有机碳含量增加吸附气量也逐渐增加。

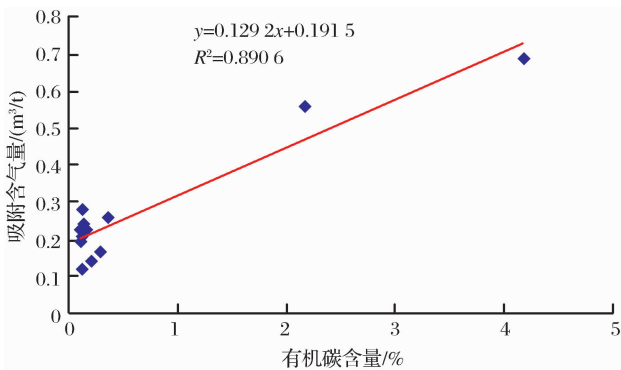


图8 HY1井有机碳含量—吸附气相关性
Figure 8 Correlation diagram of TOC and adsorption gas in well HY1

中扬子地区五峰组—龙马溪组泥页岩TOC值分布范围为0.11%~5.01%,平均值为1.88%。纵向上表现为底部黑色硅质、炭质泥页岩有机碳含量高,向上发育的深灰色泥页岩、粉砂质泥页岩的有机碳含量逐渐降低(图5)。在页岩气中一般TOC<1.0%认为其为不好的气源岩,经过剔除不达标的样品后统计可知,研究区五峰组—龙马溪组泥页岩TOC值绝大部分大于1.5%,占整个样品总数的75%(图9)。根据上述吸附气量与有机碳含量关系式计算出吸附气量范围为 $0.20\sim0.84\text{m}^3/\text{t}$ 。

总含气量为游离气量与吸附气量之和,可以推算出总含气量范围为 $0.29\sim1.01\text{m}^3/\text{t}$,其直接影响因素为游离气量和吸附气量,间接控制因素主要为总孔隙度和有机碳含量的大小。

3.3 地质资源量

根据财政部和能源部公布的页岩气界定标准(赋存于TOC>1.0%烃源岩内,吸附气含量大于20%;页岩层系连续厚度大于30m,夹层厚度不超过

1m;夹层总厚度不超过页岩层系的20%),结合有机质成熟度、埋深、含气量、保存、地表条件等因素^[26-29],确定中扬子地区五峰组—龙马溪组页岩气有利区位于恩施—彭水一带(图1),含气页岩面积(A)约为 5174km^2 ,平均有效页岩厚度(h)约为57m,富有机质泥页岩平均密度(ρ)为 $2.71\text{g}/\text{cm}^3$,通过体积法($Q=0.01\times A\times h\times\rho\times q^{[18-19]}$)计算出有利区页岩气地质资源量范围为 $(0.23\sim0.81)\times 10^{12}\text{m}^3$ 。

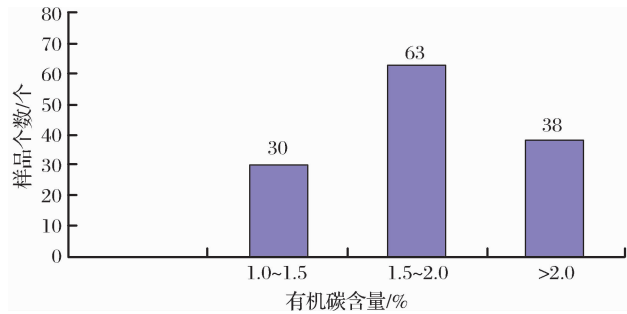


图9 中扬子地区各剖面五峰组—龙马溪组有机碳含量分布特征

Figure 9 Organic carbon content distribution histogram in Wufeng-Longmaxi Formation, in the middle Yangtze region

4 结论

通过对中扬子地区五峰组—龙马溪组泥页岩页岩气储层宏观特征、微观特征和含气性特征分析得出如下结论:

(1)研究区页岩层系由泥页岩、硅质泥页岩、笔石泥页岩、炭质泥页岩、粉砂质泥页岩、泥质粉砂岩、粉砂岩和砂岩等8种岩相组成,其中后三者呈夹层状产出。矿物组分以石英和黏土矿物为主,含有少量长石、方解石、黄铁矿等,识别出基质孔、有机质孔、溶蚀孔和微裂缝4种储集空间类型。

(2)研究区页岩气主要包括游离气和吸附气2种,其中游离气量范围为 $0.09\sim0.17\text{m}^3/\text{t}$,其主控因素为总孔隙度;吸附气量范围为 $0.20\sim0.84\text{m}^3/\text{t}$,其主控因素为有机碳含量。总含气量范围为 $0.29\sim1.01\text{m}^3/\text{t}$ 。

(3)根据财政部和能源部公布的页岩气界定标准,结合前人研究结论,确定中扬子地区五峰组—龙马溪组页岩气有利区位于恩施—彭水一带,其地质资源量介于 $(0.23\sim0.81)\times 10^{12}\text{m}^3$ 之间,表明中扬子地区五峰组—龙马溪组泥页岩具有较好的页岩气勘探前景。

参考文献(References):

[1] Curtis J B. Fractured shale-gas systems[J]. AAPG Bulletin,

- 2002, 86(11): 1921-1938.
- [2] Jarvie M D, Hill J R, Roble E M, *et al.* Unconventional shale-gas system: The Mississippian Barnett shale gas of North-Central Texas as one model for thermogenic shale-gas assessment[J]. AAPG Bulletin, 2007, 91(4): 475-499.
- [3] Hill J R, Zhang E T, Katz J B, *et al.* Modeling of gas generation from the Barnett shale, Forth Worth Basin, Texas[J]. AAPG Bulletin, 2007, 91(4): 501-521.
- [4] Zou Caineng, Tao Shizhen, Yuan Xuanjun, *et al.* Global importance of "continuous" petroleum reservoirs: Accumulation, distribution and evaluation [J]. Petroleum Exploration and Development, 2009, 36(6): 669-682. [邹才能, 陶士振, 袁选俊, 等. "连续型"油气藏及其在全球的重要性: 成藏、分布与评价[J]. 石油勘探与开发, 2009, 36(6): 669-682.]
- [5] Zou Caineng, Dong Dazhong, Wang Shejiao, *et al.* Geological characteristics, formation mechanism and resource potential of shale gas in China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2010, 37(6): 641-653. [邹才能, 董大忠, 王社教, 等. 中国页岩气形成机理、地质特征及资源潜力[J]. 石油勘探与开发, 2010, 37(6): 641-653.]
- [6] Chen Gengsheng, Dong Dazhong, Wang Shiqian, *et al.* A preliminary study on accumulation mechanism and enrichment pattern of shale gas[J]. Natural Gas Industry, 2009, 29(5): 17-21. [陈更生, 董大忠, 王世谦, 等. 页岩气藏形成机理与富集规律初探[J]. 天然气工业, 2009, 29(5): 17-21.]
- [7] Liu Shugen, Zeng Xiangliang, Huang Wenming, *et al.* Basic characteristics of shale and continuous-discontinuous transition gas reservoirs in Sichuan Basin, China [J]. Journal of Chengdu University of Technology: Science & Technology Edition, 2009, 36(6): 578-592. [刘树根, 曾祥亮, 黄文明, 等. 四川盆地页岩气藏和连续型—非连续型气藏基本特征[J]. 成都理工大学学报: 自然科学版, 2009, 36(6): 578-592.]
- [8] Zhang Jinchuan, Jin Zhijun, Yuan Mingsheng. Reservoiring mechanism of shale gas and its distribution[J]. Natural Gas Industry, 2004, 24(7): 15-18. [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.]
- [9] Zhang Jinchuan, Xue Hui, Zhang Deming, *et al.* Shale gas and its reservoiring mechanism[J]. Geoscience, 2003, 17(4): 466. [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] Nie Haikuan, Tang Xuan, Bian Ruikang. Controlling factors for shale gas accumulation and prediction of potential development area in shale gas reservoir of South China[J]. Acta Petrolei Sinica, 2009, 30(4): 484-491. [聂海宽, 唐玄, 边瑞康. 页岩气成藏控制因素及中国南方页岩气发育有利区预测[J]. 石油学报, 2009, 30(4): 484-491.]
- [11] Li Yanxia, Lin Juanhua, Long Youkang, *et al.* Exploration prospect of gas-bearing marine mudstone-shale in Lower Palaeozoic in Mid-Yangtze region[J]. Geological Bulletin of China, 2011, 30(2/3): 349-356. [李艳霞, 林娟华, 龙幼康, 等. 中扬子地区下古生界—海相泥—页岩含气勘探远景[J]. 地质通报, 2011, 30(2/3): 349-356.]
- [12] Liu Xinmin, Fu Yixing, Gou Zhanfeng, *et al.* Characteristics of basin evolution and hydrocarbon response in the Middle Yangtze region since Nanhua Period[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2011, 85(4): 526-531. [刘新民, 付宜兴, 郭战峰, 等. 中扬子区南华纪以来盆地演化与油气响应特征[J]. 石油实验地质, 2011, 85(4): 526-531.]
- [13] Mu Chuanlong, Zhou Kenken, Liang Wei, *et al.* Depositional environments and petroleum exploration of the Early Paleozoic hydrocarbon source rocks in the Middle and Upper Yangtze region[J]. Acta Geologica Sinica, 2011, 85(4): 526-532. [牟传龙, 周恩恩, 梁薇, 等. 中上扬子地区早古生代烃源岩沉积环境与油气勘探[J]. 地质学报, 2011, 85(4): 526-532.]
- [14] Liang Chao, Jiang Zaixing, Yang Yiting, *et al.* Characteristics of shale lithofacies and reservoir space of the Wufeng-Longmaxi Formation, Sichuan Basin [J]. Petroleum Exploration and Development, 2012, 39(6): 691-698. [梁超, 姜在兴, 杨懿婷, 等. 四川盆地五峰组—龙马溪组页岩岩相及储集空间特征[J]. 石油勘探与开发, 2012, 39(6): 691-698.]
- [15] Milner M, McLin R, Petriello J, *et al.* Imaging Texture and Porosity in Mudstones and Shales: Comparison of Secondary and Ion-milled Backscatter SEM Methods[C]. SPE138975, 2010.
- [16] Loucks R G, Reed R M, Ruppel S C, *et al.* Morphology, genesis, and distribution of nanometer-scale pores in siliceous mudstones of the Mississippian Barnett shale[J]. Journal of Sedimentary Research, 2009, 79(12): 848-861.
- [17] Huang Zhenkai, Chen Jianping, Xue Haitao, *et al.* Microstructural characteristics of the Cretaceous Qingshankou Formation shale, Songliao Basin[J]. Petroleum Exploration and Development, 2013, 40(1): 58-65. [黄振凯, 陈建平, 薛海涛, 等. 松辽盆地白垩系青山口组泥页岩孔隙结构特征[J]. 石油勘探与开发, 2013, 40(1): 58-65.]
- [18] Zhang Jinchuan, Lin Lamei, Li Yuxi, *et al.* The method of shale gas assessment: Probability volume method[J]. Earth Science Frontier, 2012, 19(2): 184-191. [张金川, 林腊梅, 李玉喜, 等. 页岩气资源评价方法与技术: 概率体积法[J]. 地学前缘, 2012, 19(2): 184-191.]
- [19] Bu Shaofeng, Ma Ruolong, Yuan Haifeng, *et al.* Evaluation methods of shale gas resource potential and selection of parameters in central Hunan, China[J]. Journal of Chengdu University of Technology: Science & Technology Edition, 2012, 39(2): 223-230. [步少峰, 马若龙, 袁海锋, 等. 湘中地区海相页岩气资源潜力评价方法及参数选取[J]. 成都理工大学学报: 自然科学版, 2012, 39(2): 223-230.]
- [20] Dariuse Strapoc, Maria Mastalerz, Arndt Schimmelmann, *et al.* Geochemical constraints on the origin and volume of gas in the New Albany shale (Devonian-Mississippian), eastern Illinois Basin[J]. AAPG Bulletin, 2010, 94(11): 713-7140.
- [21] Chalmers G R L, Bustin R M. The gas shale of the Lower cretaceous in the northeast of British Columbia[J]. Bulletin of Canadian Petroleum Geology, 2008, 56(1): 1-21.
- [22] Ross D J K, Bustin R Marc. Shale gas potential of the Lower Jurassic Gordondale Member, northeastern British Columbia, Canada

- [J]. *Bulletin of Canadian Petroleum Geology*, 2007, 55(1): 51-75.
- [23] Ji Liming, Qiu Junli, Zhang Tongwei, *et al.* Experiments on methane adsorption of common clay minerals in shale[J]. *Journal of China University of Geosciences: Earth Science*, 2012, 37(5): 1043-1050. [吉利明, 邱军利, 张同伟, 等. 泥页岩主要黏土矿物组分甲烷吸附实验[J]. *中国地质大学学报: 地球科学*, 2012, 37(5): 1043-1050.]
- [24] Wu Jingshu, Yu Bingsong, Li Yuxi. Adsorption capacity of shale gas and controlling factors from the well Yuye 1 at the southeast of Chongqing[J]. *Journal of Southwest Petroleum University*, 2012, 34(4): 40-48. [武景淑, 于炳松, 李玉喜. 渝东南渝页1井页岩气吸附能力及其主控因素[J]. *西南石油大学学报*, 2012, 34(4): 40-48.]
- [25] Ji Liming, Luo Peng. Effect of sample size on volumetric determination of methane adsorption in clay minerals[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2012, 23(3): 535-540. [吉利明, 罗鹏. 样品粒度对黏土矿物甲烷吸附容量测定的影响[J]. *天然气地球科学*, 2012, 23(3): 535-540.]
- [26] Wang Pengwan, Chen Ziliao, He Xunyun, *et al.* Accumulation of Lower Cambrian Niutitang shale gas and prediction of potential area in Qiannan Sag[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2011, 22(3): 518-524. [王鹏万, 陈子焯, 贺训云, 等. 黔南坳陷下寒武统页岩气成藏条件与有利区带评价[J]. *天然气地球科学*, 2011, 22(3): 518-524.]
- [27] Long Pengyu, Zhang Jinchuan, Li Yuxi, *et al.* Reservoir-forming conditions and strategic select favorable area of shale gas in the Lower Paleozoic of Chongqing and its adjacent areas[J]. *Earth Science Frontiers*, 2012, 19(2): 221-232. [龙鹏宇, 张金川, 李玉喜, 等. 重庆及其周缘地区下古生界页岩气成藏条件及有利区带预测[J]. *地学前缘*, 2012, 19(2): 221-232.]
- [28] Xu Bo, Li Jinghan, Li Xiaoge, *et al.* Evaluation of hydrocarbon accumulation conditions for shale gas from the eastern sag of the Liaohe Oilfield and its gas-bearing properties[J]. *Acta Petroleologica Sinica*, 2011, 32(5): 451-458. [徐波, 李敬含, 李晓革, 等. 辽河油田东部凹陷页岩气成藏条件及含气性评价[J]. *石油学报*, 2011, 32(5): 451-458.]
- [29] Long Pengyu, Zhang Jinchuan, Tang Xuan, *et al.* Feature of muddy shale fissure and its effect for shale gas exploration and development[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2011, 22(3): 525-532. [龙鹏宇, 张金川, 唐玄, 等. 泥页岩裂缝发育特征及其对页岩气勘探和开发的影响[J]. *天然气地球科学*, 2011, 22(3): 525-532.]

Characteristics of Shale Reservoirs and Gas Content of Wufeng-Longmaxi Formation in the Middle Yangtze Region

QIU Xiao-song¹, YANG Bo², HU Ming-yi¹

(1. *Key Laboratory of Exploration Technologies for Oil and Gas Resources, Ministry of Education, Wuhan 430100, China;*

2. School of Graduate, Yangtze University, Wuhan 430100, China)

Abstract: The middle Yangtze region is one of the most important petroleum provinces, in which the shale of Wufeng-Longmaxi Formation is widely distributed and the exploratory well in Western Hubei and Hunan provinces has good gas show. At present, research of shale gas in China is hot, while the production of shale gas in North America has achieved success. Therefore, in our country, strengthening the study of characteristics of shale reservoirs and gas content has great significance for shale gas exploration and production. In this paper, based on the observation of field outcrops and cores, integrating with analysis of rock slice, mineral content, physical properties, organic geochemistry and other methods, the features of lithofacies, mineral, reservoir space and gas content of shale in Wufeng-Longmaxi Formation are studied in detail. The results show that shale of Wufeng-Longmaxi Formation in the study area is mainly composed of mud shale, siliceous shale, graptolite shale, carbonaceous shale and silt shale, quartz and clay consisting of essential minerals. The main reservoir space types are matrix pore, organic pore, dissolved pore, microfracture. Moreover, the content of free gas and adsorbed gas, which is mainly controlled by total porosity and organic carbon content, ranges from 0.09-0.17 m³/t and 0.20-0.84 m³/t respectively. The total gas content is between 0.29 m³/t and 1.01 m³/t. According to the definition standard of shale gas, the favorable region is located at Enshi-Pengshui area, and the estimated resources range from 0.23 × 10¹² m³ to 0.81 × 10¹² m³. These features indicate that the shale of Wufeng-Longmaxi Formation in the middle Yangtze region has good shale gas exploration prospect.

Key words: The middle Yangtze region; Wufeng-Longmaxi Formation; Shale reservoirs; Free gas; Adsorbed gas