

文章编号:0253-9985(2012)03-0346-07

上扬子地区志留系龙马溪组富有机质泥岩储层特征

刘伟,余谦,闫剑飞,门玉澎,张海全,吴剑

(成都地质矿产研究所,四川成都610082)

摘要:岩石矿物组成及脆性矿物含量对富有机质泥岩人工造缝能力影响明显,在页岩气储层描述及评价中显得尤为重要。以野外工作为基础,针对上扬子地区志留系龙马溪组下部富有机质泥岩开展X-衍射分析及显微观察。研究表明,该套富有机质泥岩储层脆性矿物平均含量约50%~70%,具有较好的破裂潜力。旺苍双汇、雷波银厂村、习水吼滩等剖面揭示,碎屑矿物主要为石英及少量长石,岩屑极少,矿物棱角分明,星点状分布,无明显定向性;自生脆性矿物主要为方解石、白云石,自形-半自形晶,局部相对富集组成宏观可见的细微条纹,黄铁矿含量低但岩石中普遍含有;生物矿物为微量硅质放射虫,有溶蚀现象。区域上,脆性矿物分为石英+长石组合、石英+长石+方解石+白云石组合。沉积中心——四川泸州-宜宾、重庆武隆-石柱地区,以及黔中-雪峰隆起北侧边缘沉积相带,方解石、白云石含量较高。汉南古陆、川中隆起与黔中-雪峰隆起向沉积区供给碎屑沉积物能力不同,造成陆地边缘沉积区矿物组成的差异。可见,寻找富脆性矿物分布区的关键应从重建古地理格局开始,尤其是进行沉积微相分析。

关键词:脆性矿物;富有机质泥岩;龙马溪组;页岩气;上扬子地区

中图分类号:TE122.2

文献标识码:A

Characteristics of organic-rich mudstone reservoirs in the Silurian Longmaxi Formation in Upper Yangtze region

Liu Wei, Yu Qian, Yan Jianfei, Men Yupeng, Zhang Haiquan and Wu Jian

(Chengdu Institute of Geology and Mineral Resources, Chengdu, Sichuan 610082, China)

Abstract: Mineral composition and brittle mineral contents of organic-rich mudstone are critical to fracturing, so they are important parts of shale gas reservoir description and evaluation. X-ray diffraction and microscopic observation were performed on outcrop samples from organic-rich mudstones in the Silurian Longmaxi Formation in the Upper Yangtze region. The results show that the contents of brittle minerals average about 50 – 70%. The clastic minerals of organic-rich mudstones mainly consist of quartz, few feldspars and very few detritus in the lower Longmaxi Formation of the Silurian on Wangcang, Leibo and Xishui outcrops. The clastic minerals have clear angular shape and scattered distribution and no clear orientation. Authigenic brittle minerals are mainly calcites and dolomites. Calcites and dolomites show semi-euhedral to euhedral crystalline, relatively rich in local strata forming slight fringes. Pyrites are common but its content is low. Biogenic minerals are rare and mainly of siliceous radiolarians with the characteristic of dissolution. Regionally, brittle mineral combinations can be divided into two types: quartzs-feldspars and quartzs-feldspars – calcites-dolomites. High calcite and dolomite contents occur in main sedimentary centers, i. e. Luzhou-Yibin area in Sichuan, Wulong-Shizhu area in Chongqing and the northern margin of Central-Guizhou-Xuefeng uplift. Hannan ancient land and Central Sichuan uplift are different from Central Guizhou-Xuefeng uplift in the capability of providing detrital sediments, resulting in different mineral composition in the marginal shallow water deposits. In summary, the key to find brittle-mineral rich areas is the reconstruction of palaeogeography, especially the analysis of sedimentary

收稿日期:2011-10-03;修订日期:2012-05-10。

第一作者简介:刘伟(1981—),男,工程师,沉积、页岩气地质。

基金项目:全国油气资源战略选区调查与评价国家专项(2009GYXQ15-08)。

microfacies.

Key words: brittle mineral, organic-rich mudstone, Longmaxi Formation, shale gas, Upper Yangtze region

目前,页岩气已成为我国非常规油气勘探的热点^[1-5]。2011年4月北京召开的“页岩气国际学术研讨会”,是近年来国内最大规模的一次页岩气研讨盛会,具有里程碑式意义。在此背景下,国内外众多高校及科研机构更加关注志留系龙马溪组下部黑色富有机质泥岩。该段泥岩是上扬子地区下古生界主力烃源岩之一,具有厚度大、分布广和生烃能力强的特点^[6]。以往的钻探(如丁山1井、阳63井和隆32井等)及新近钻井(如长芯1井、渝页1井、宁201井和阳101井等)都证实该段富有机质泥岩较好的页岩气显示,勘探潜力巨大^[7-8]。

富有机质泥岩作为特殊的储层,一般具有低孔、超低渗的特点。裂缝的发育程度直接决定了页岩气藏是否具有工业价值。美国Fort Worth盆地Barnett页岩气藏中裂缝非常发育的区域,天然气的生产速度最低,其高产井基本上都分布在裂缝不发育的地方^[9]。Barnett页岩气藏的勘探不是寻找裂缝,而是寻找易扩散、高含气量和能进行压裂的页岩区^[10]。岩石中矿物组成及含量决定了压裂改造中人造裂缝的发育程度。因此在目前的研究程度下,岩石矿物组成及脆性矿物含量是龙马溪组富有机质泥岩储层描述及评价的重要指标。以四川旺苍双汇、雷波银厂村及贵州习水吼滩等露头剖面为依托,采用显微观察及X-衍射矿物分析为手段,对龙马溪组富有机质泥岩储层矿物组成、微观结构及影响因素展开研究,进而探讨脆性矿物平面分布趋势,为页岩气储层研究提供参考。

1 地质背景

1.1 龙马溪组下部沉积格局

中上扬子地区,早志留世龙马溪沉积期是继晚奥陶世以来盆山格局发生重大转变的时期^[11]。汉南古陆、滇中隆起、黔中隆起和川中隆起等较前期扩大,海域面积缩小,导致中、上扬子海域被陆地围限,成为克拉通内局限浅海(图1)。龙马溪组

下部主要划分为陆地边缘相带及局限浅海相带。

1) 陆地边缘相带

古隆起的形成及扩大,导致向其沉积区提供了较多的陆源碎屑物。各陆地边缘特征有所不同,总体表现为低能海陆过渡环境。

黔中-雪峰隆起以北边缘沉积区,龙马溪组下部陆地边缘相带保留完整。遵义、湄潭和绥阳等地主要岩性为浅灰-浅灰绿色钙质泥岩夹粉砂岩条带,具潮汐层理,底栖生物繁盛,管状虫迹也较发育(图2a-c)。向东至酉阳、秀山及湘西地区,龙马溪组下部富有机质段粉砂含量较高,向上为渐变为钙质粉砂岩,透镜状层理发育。川中隆起和汉南古陆边缘相遭受后期剥蚀,旺苍双汇等地以含粉砂-粉砂质含碳泥岩为主,富有机质岩性段显著减薄,粉砂级碎屑矿物丰富,推测陆地边缘相为粉砂泥质沉积。

2) 局限浅海相带

局限浅海相带占据了中上扬子克拉通盆地的广大区域,龙马溪组下部主要岩性为黑色碳质泥岩和含粉砂碳质泥岩,有机质丰度高。生物见笔石顺层面分布,个体完整,局部可形成笔石生物层(图2c-e)。

1.2 富有机质泥岩分布特征

龙马溪组黑色富有机质泥岩主要分布于该组下部,约对应 *Glyptograptus persculptus* - *Pristiograptus cyphus* 笔石带,沉积时间超过龙马溪期一半,但沉积厚度仅占龙马溪组的10%~30%;龙马溪组上部灰色泥岩段(露头揭示常见灰绿、黄绿色,井下新鲜色为深灰色-灰色),约对应 *P. cyphus* - *Monograptus sedgwickii* 笔石带,沉积时间不到一半,但厚度占全组厚度的70%~80%^[11]。

富有机质泥岩主要分布于局限浅海相带,厚度大且有机质丰度高^[12]。随着区域上资料点的不断补充完善,富有机质泥岩段存在两个主要沉积中心,分别为四川泸州-宜宾地区及重庆武隆-石柱地区,微呈北东-南西向展布(图1)。沉积中心富有机质泥岩厚度一般可达120~200 m,并与有机碳高值分布区形成了较好的对应关系^[7,13]。

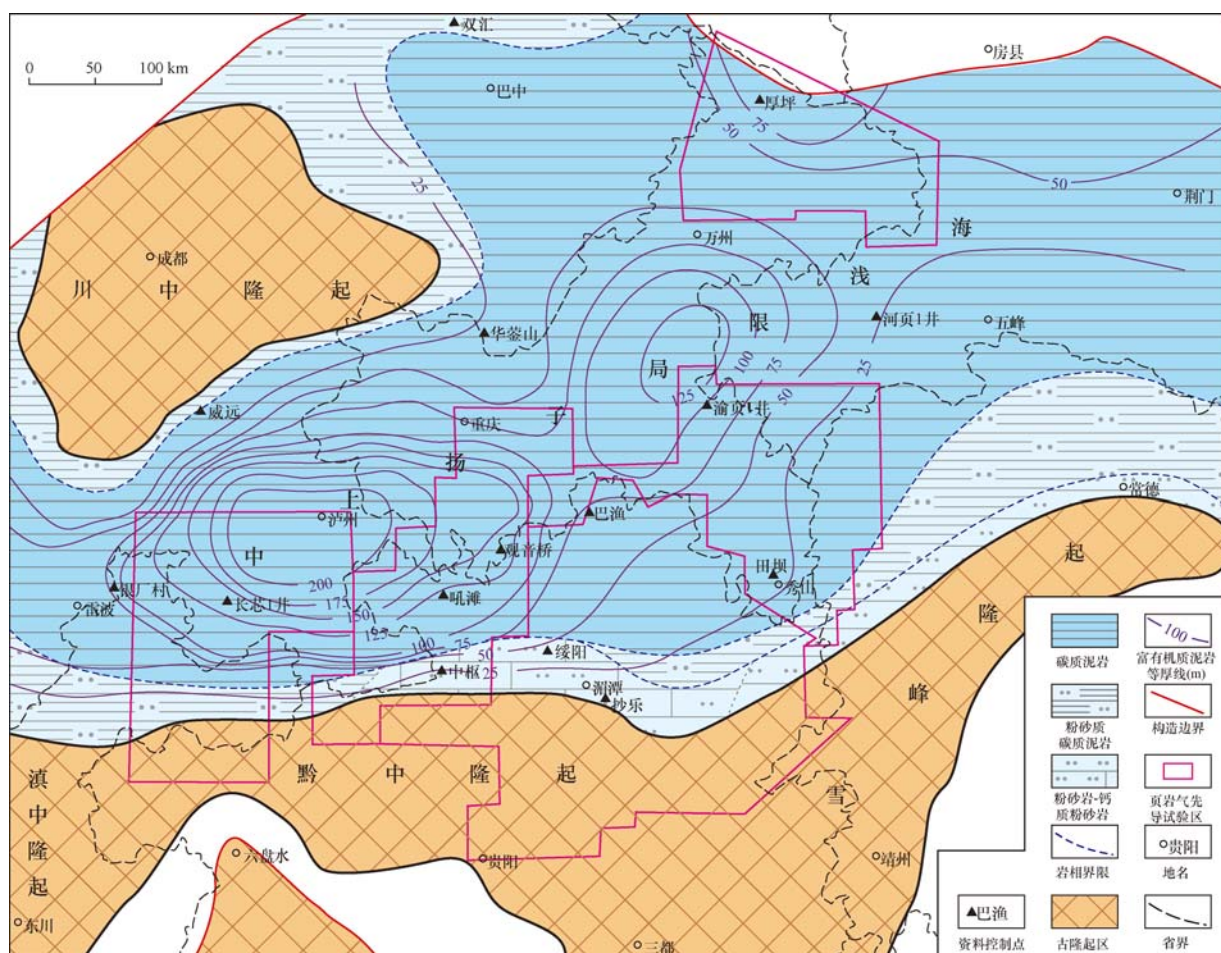


图1 上扬子地区志留系龙马溪组下部沉积格局

Fig. 1 Sedimentary framework of the Lower Longmaxi Formation of the Silurian in the Upper Yangtze region

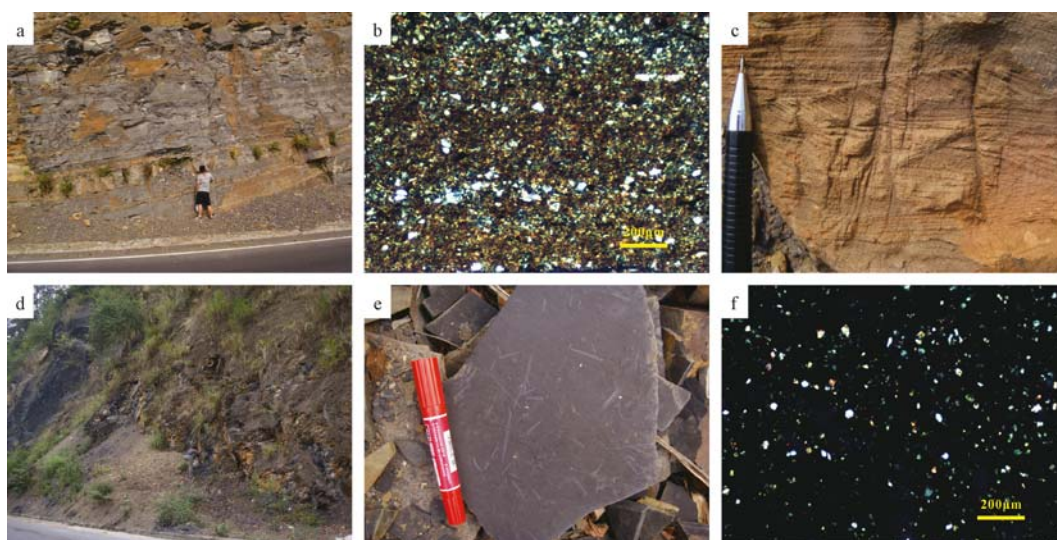


图2 上扬子地区志留系龙马溪组下部沉积特征

Fig. 2 Sedimentary characteristics of the Lower Longmaxi Formation of the Silurian in the Upper Yangtze region

a. 陆地边缘相带典型露头, 贵州绥阳; b. 含钙砂质泥岩显微特征, 贵州绥阳, 正交光; c. 钙质粉砂条带沙纹层理, 贵州绥阳; d. 局限浅海相带典型露头, 贵州道真; e. 笔石顺层分布且个体完整, 贵州道真; f. 含钙粉砂质泥岩显微特征, 贵州道真, 正交光

陆地边缘相带,富有机质泥岩明显减薄且粉砂含量较高,厚度一般小于 50 m。如湄潭抄乐等地,龙马溪组为风化呈灰黄绿色含粉砂钙质泥岩,岩石中基本不含有机质。

2 富有机质泥岩矿物组成及显微特征

泥岩是最细的碎屑沉积物,主要包括碎屑矿物(如石英和长石等)、自生脆性矿物(如方解石、白云石、蛋白石、玉髓、黄铁矿和海绿石等)、粘土矿物(如伊利石、蒙脱石和高岭石等)及比例不等的有机质^[14]。

如表 1,龙马溪组富有机质泥岩脆性矿物总体含量约占 51.7%~78%(碎屑矿物与自生脆性矿物含量之和)。其中,石英为脆性矿物的主要贡献者,约占总含量的 37.8%;次为方解石+白云石、钾长石+斜长石,含量平均分别为约 14.2%和 9.5%;黄铁矿含量平均约 2.0%。粘土矿物约占总体的 36.1%,主要由伊利石组成,伊/蒙混层、高岭石和绿泥石含量相比较低。

各剖面龙马溪组下部属于陆地边缘相带-局限浅海相带的不同位置。结合显微观察及 X-衍射分析,旺苍双汇剖面方解石、白云石稀少,脆性矿物为石英+长石组合;其余剖面脆性矿物为石英+长石+方解石+白云石组合。黄铁矿含量较低,但总体稳定,变化不大。各剖面均表现出方解石和白云石向上呈增多的趋势,但含量存在差异。以旺苍双汇、习水吼滩和雷波银厂村为代表分述如下。

2.1 旺苍双汇剖面

龙马溪组富有机质泥岩段厚 46.08 m。底部 2.39 m 岩性为黑色含粉砂碳质泥岩,脆性矿物石英和长石,测试含量 50.5%(SHP6CH1)。岩石中石英碎屑呈点状分布,磨圆差呈棱角状,粒度细粉砂级。云母具定向性,顺层方向排列,局部发育显微富粉砂细条带。上部 43.69 m 岩性为灰黑色含碳泥岩夹泥质粉砂正粒序层。碳质含量呈逐渐降低的趋势。正粒序结构宽数毫米不等,局部可见显微底冲刷构造,具低密度碎屑流特征。向上过渡至龙马溪组上部灰色泥岩段。石英、长石及岩屑(火山岩和变质岩为主)呈向上增加趋势,表明陆源碎屑补给逐渐加强。泥岩水平成岩缝中充填沥青,顺层方向展布,局部呈浸染状(图 3a)。

总体,富有机质泥岩厚度薄,脆性矿物缺乏方解石和白云石等自生脆性矿物。

2.2 雷波银厂村剖面

龙马溪组富有机质泥岩段厚约 51 m。下部 49 m 岩性为含粉砂碳质泥岩,脆性矿物石英+长石测试含量 29.6%~53%,由下而上呈减少的趋势;方解石+白云石测试含量 20.9%~24.7%,呈向上增多的趋势。镜下该段见石英碎屑呈点状分布,向上见方解石、石英等组成显微纹层或条带(图 3b);生物见笔石,偶见放射虫。上部厚约 2 m 为粉砂质含碳泥岩。颗粒主要为棱角状石英、灰岩岩屑,并偶见斜长石。碳质含量渐少并向龙马溪组上部灰绿色块状泥岩过渡。龙马溪组上段岩性为灰色泥岩与泥灰岩不等厚韵律组合,颗粒主

表 1 上扬子地区龙马溪组下部富有机质泥岩矿物组成

Table 1 Mineral compositions of organic-rich mudstones in the Lower Longmaxi Formation of the Upper Yangtze region

采样位置	样品号	矿物组成含量/%				
		石英	钾长石+斜长石	方解石+白云石	黄铁矿	粘土矿物
习水吼滩	HTP4CH2	67.1	8.5	—	—	24.4
习水吼滩	HTP6CH3	32.3	5.9	14.9	2.4	44.4
旺苍双汇	SHP6CH1	39.3	11.2	—	5.0	44.5
雷波银厂村	YCP4CH2	50.0	3.0	20.9	2.5	22.2
雷波银厂村	YCP8S3	20.0	9.6	24.7	—	43.1
道真巴渔	BYP6-S4	38.0	9.0	5.0	2.0	46.0
仁怀中枢	ZSP3-CH1	30.0	13.0	32.0	3.0	22.0
綦江观音桥	GYP3-S2	38.0	19.0	12.0	1.0	30.0
长芯 1 井 ^[7]	(均值)	25.3	6.1	18.2	2.2	48.3
平均		37.8	9.5	14.2	2.0	36.1

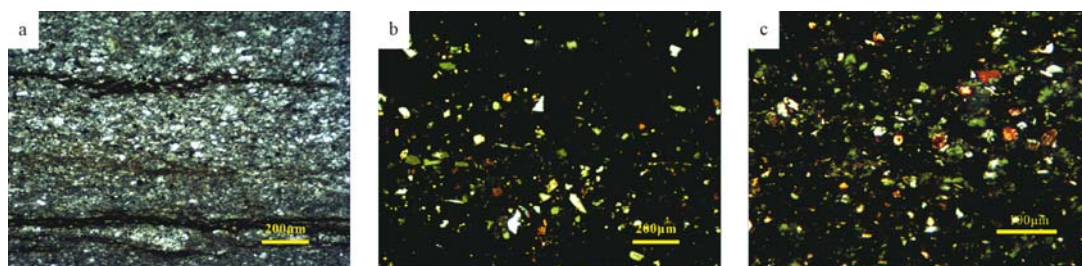


图3 上扬子地区龙马溪组下部富有机质泥岩显微结构

Fig. 3 Microstructure of organic-rich mudstones in the Lower Longmaxi Formation of the Upper Yangtze region

a. 水平缝中沥青充填,旺苍双汇,单偏光;b. 富粉砂条带中棱角状碎屑矿物,雷波银厂村,正交光;c. 棱角状碎屑矿物及云母片长轴定向排列,习水吼滩,正交光

要为石英和方解石,含量约5%~10%。

总体,富有机质泥岩段脆性矿物从石英+长石组合逐渐向石英+长石+方解石组合过渡,反映了该组沉积早期受陆源碎屑补给,晚期补给减弱,逐渐形成适合碳酸盐矿物沉积的水体环境。

2.3 习水吼滩剖面

龙马溪组富有机质泥岩段厚38.5 m。下部11.2 m岩性为粉砂质含碳泥岩,石英+长石测试含量75.6%。岩石中含棱角状石英颗粒,粉砂级粒度。上部27.3 m粉砂质含碳泥岩脆性矿物为石英、长石、方解石及白云石(图3c)。岩石中石英+长石测试含量38.2%。碳酸盐自生矿物以方解石为主,次为白云石,自形晶-半自形晶,测试含量14.9%。富有机质泥岩段碳酸盐自生矿物向上渐多,方解石与白云石从基本未见—与碎屑矿物混合共存。向上过渡至龙马溪组上部灰色泥岩段,碎屑颗粒主要有石英、灰岩岩屑及少量火山岩岩屑和斜长石。石英和长石呈棱角-次棱角状,岩屑次棱角-次圆状为主,局部颗粒组成显微条带或透镜状结构。

3 脆性矿物平面分布趋势

富有机质泥岩中方解石与白云石属内源自生矿物。对21组样品进行X-衍射分析数据表明,各采样剖面/钻孔中方解石+白云石含量存在一定差异。以雷波、习水、长宁和威远等地含量较高,达14.9%~42.6%,与沉积中心——四川泸州-宜宾地区基本对应。重庆綦江和贵州道真等地方解石+白云石含量达2%~16.1%。黔中隆起-雪峰隆起北侧边缘沉积区,方解石+白云石也

较高,如仁怀中枢剖面达32%。华蓥山和旺苍等地则基本未见方解石+白云石。

据此差异性,沉积区可分为3个主要矿物组成分区(图4)。

1) 汉南古陆及川中隆起边缘分区,约对应陆地边缘沉积相带的含粉砂质沉积区。岩石脆性矿物含量可达50%~60%,其中以石英+长石组合为主,自生矿物为少量黄铁矿,缺乏碳酸盐自生矿物,代表剖面为旺苍双汇剖面。

2) 沉积中心分区,大致对应上扬子局限浅海相两大沉积中心(四川泸州-宜宾地区及重庆武隆-石柱地区)及黔中-雪峰隆起边缘沉积相带。富有机质泥岩脆性矿物总体含量可达50%~75%。石英+长石含量30%~60%,方解石+白云石含量15%~40%,代表剖面为雷波银厂村剖面及仁怀中枢剖面。

3) 过渡分区,约对应黔中-雪峰隆起北侧和上扬子北部-中扬子局限浅海沉积相带。脆性矿物总体含量约45%~75%。石英+长石含量一般可达35%~60%,碳酸盐自生矿物含量一般可达2%~15%。代表剖面为习水吼滩剖面。

总体上,3个矿物组成分区的脆性矿物总含量处于50%~70%水平。远离陆地的局限浅海相带,碳酸盐矿物含量呈增高的趋势,相应陆源碎屑矿物略有下降。汉南古陆与川中隆起暴露时间较长,为稳定剥蚀区,形成了陆源碎屑补给为主的边缘沉积相带;相比之下,黔中-雪峰隆起向沉积区提供碎屑量小,并有利于碳酸盐自生矿物的形成。由此表明,龙马溪组富有机质泥岩中脆性矿物组成及含量受古地理格局的控制,一方面与所处沉积区位置有关,另一方面与邻近物源区提供碎屑沉积物能力有关。若仅以数据总

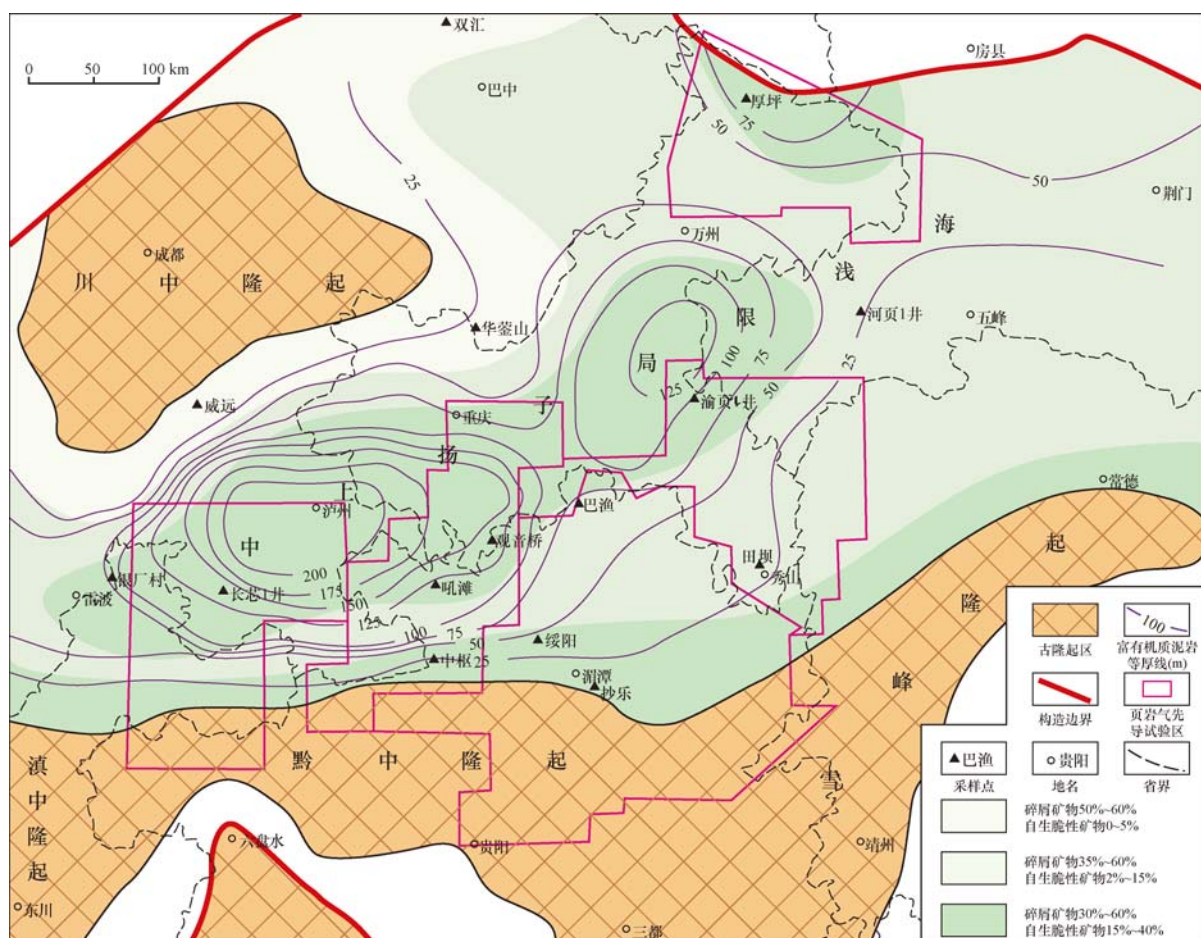


图4 上扬子地区龙马溪组下部富有机质泥岩矿物平面分布趋势

Fig. 4 Areal distribution of minerals in the organic-rich mudstones in the Lower Longmaxi Formation of the Upper Yangtze region

体统计分布区间,则往往不能看出沉积区内部的差异性。

4 结语及认识

美国 Barnett 型页岩储层研究经验表明,要取得较好压裂改造效果,脆性矿物含量通常要大于 50%^[9]。以此为参考,上扬子地区龙马溪组富有机质泥岩中脆性矿物含量约占总体的 50% ~ 70%,保证了较好的破裂潜力。

显微观察与 X-衍射测试具有较好吻合性,只是在统计尺度上存在一定差异。岩石中岩屑极少,碎屑矿物主要为石英和长石,棱角分明,星点状分布于碳质泥岩中,无明显定向性,局部少量粉砂级碎屑条带或纹层。自生矿物主要为方解石和白云石,黄铁矿含量少但岩石中普遍可见。方解

石与白云石自形-半自形晶,局部相对富集组成宏观可见的细微条纹。生物矿物见硅质放射虫,提供了微量二氧化硅,有溶蚀现象。

纵向上,汉南古陆及川中隆起边缘分区缺乏方解石和白云石,碎屑矿物呈向上渐增的趋势;过渡分区与沉积中心分区中方解石和白云石基本未见—与碎屑矿物混合共存。岩屑在富有机质泥岩中含量极少,主要从龙马溪组上部灰色泥岩段出现并向上渐多。区域上,由陆地边缘分区—过渡分区—沉积中心分区(及黔中-雪峰隆起边缘分区),富有机质泥岩中方解石+白云石含量从平均约 8%增加到平均约 25%,呈逐渐增高的趋势。

综合分析表明,古地理格局对脆性矿物组成及其含量有控制作用,同时也控制了富有机质泥岩厚度和有机质富集区分布。精细化认识古地理格局,尤其是沉积微相展布规律,是寻找富脆性矿

物分布区的关键,对进一步认识富有机质泥岩储层特征也有重要价值。

参 考 文 献

- [1] 张金川,徐波,聂海宽,等. 中国页岩气资源勘探潜力[J]. 天然气工业,2008,28(6):136-140.
Zhang Jinchuan, Xu Bo, Nie Haikuan, et al. Exploration potential of shale gas resources in China[J]. Natural Gas Industry, 2008, 28(6):136-140.
- [2] 李建忠,董大忠,陈更生,等. 中国页岩气资源前景与战略地位[J]. 天然气工业,2009,29(5):11-16.
Li Jianzhong, Dong Dazhong, Chen Gengsheng, et al. Prospects and strategic position of shale gas resources in China[J]. Natural Gas Industry, 2009, 29(5):11-16.
- [3] 李玉喜,聂海宽,龙鹏宇. 中国富含有机质泥页岩发育特点与页岩气战略选区[J]. 天然气工业,2009,29(12):115-118.
Li Yuxi, Nie Haikuan, Long Pengyu. Development characteristics of organic-rich shale and strategic selection of shale gas exploration area in China[J]. Natural Gas Industry, 2009, 29(12):115-118.
- [4] 董大忠,程克明,王玉满,等. 中国上扬子区下古生界页岩气形成条件及特征[J]. 石油与天然气地质,2010,31(3):288-299,308.
Dong Dazhong, Cheng Keming, Wang Yuman, et al. Forming conditions and characteristics of shale gas in the Lower Paleozoic of the Upper Yangtze region, China[J]. Oil & Gas Geology, 2010, 31(3):288-299,308.
- [5] 张大伟. 加速我国页岩气资源调查和勘探开发战略构想[J]. 石油与天然气地质,2010,31(2):135-139,150.
Zhang Dawei. Strategic concepts of accelerating the survey, exploration and exploitation of shale gas resources in China[J]. Oil & Gas Geology, 2010, 31(2):135-139,150.
- [6] 何发岐,朱彤. 陆相页岩气突破和建产的有利目标——以四川盆地侏罗统为例[J]. 石油实验地质,2012,34(3):246-251.
He Faqi, Zhu Tong. Favorable targets of breakthrough and built-up of shale gas in continental facies in Lower Jurassic, Sichuan Basin[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2012, 34(3):246-251.
- [7] 王社教,王兰生,黄金亮,等. 上扬子区志留系页岩气成藏条件[J]. 天然气工业,2009,29(5):45-50.
Wang Shejiao, Wang Lansheng, Huang Jinliang, et al. Accumulation conditions of shale gas reservoirs in Silurian of the Upper Yangtze region[J]. Natural Gas Industry, 2009, 29(5):45-50.
- [8] 张金川,李玉喜,聂海宽,等. 渝页1井地质背景及钻探效果[J]. 天然气工业,2010,30(12):114-118.
Zhang Jinchuan, Li Yuxi, Nie Haikuan, et al. Geologic setting and drilling effect of the shale cored well Yuye 1, Panshui county of Chongqing[J]. Natural Gas Industry, 2010, 30(12):114-118.
- [9] Kent A, Bowker. Barnett shale gas production, Fort Worth Basin: issues and discussion[J]. AAPG Bulletin, 2007, 91(4):523-533.
- [10] 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.
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 Petrologica Sinica, 2009, 30(4):484-491.
- [11] 周名魁,王汝植,李志明,等. 中国南方奥陶-志留纪岩相古地理与成矿作用[M]. 北京:地质出版社,1993:1-115.
Zhou Mingkui, Wang Ruzhi, Li Zhiming, et al. Ordovician to Silurian lithofacies, paleogeography and mineralization in south China[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1993:1-115.
- [12] 梁狄刚,郭彤楼,陈建平,等. 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,2008,13(2):1-16.
Liang Digang, Guo Tonglou, Chen Jianping, et al. Some progresses on studies of hydrocarbon generation and accumulation in marine sedimentary regions, southern China (Part 1): distribution of four suits of regional marine source rocks[J]. Marine Origin Petroleum Geology, 2008, 13(2):1-16.
- [13] 梁狄刚,郭彤楼,边立曾,等. 中国南方海相生烃成藏研究的若干新进展(三)——南方四套区域性海相烃源岩的沉积相及发育的控制因素[J]. 海相油气地质,2009,14(2):1-19.
Liang Digang, Guo Tonglou, Bian Lizeng, et al. Some progresses on studies of hydrocarbon generation and accumulation in marine sedimentary regions, southern China (Part 3): controlling factors on the sedimentary facies and development of palaeozoic marine source rocks[J]. Marine Origin Petroleum Geology, 2009, 14(2):1-19.
- [14] 刘宝珺. 沉积岩石学[M]. 北京:地质出版社,1980:1-497.
Liu Baojun. Sedimentary petrology[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1980:1-497.

(编辑 张亚雄)