

四川盆地涪陵焦石坝地区 黑色页岩非均质性特征及控制因素

刘猛¹, 刘超¹, 舒志恒¹, 陆永潮², 古茜³, 谭淙文³, 徐向³

(1. 中国石化江汉油田分公司, 湖北潜江 433124; 2. 中国地质大学资源学院, 武汉 430074;
3. 中国石化重庆涪陵页岩气勘探开发有限公司, 重庆 408014)

摘要:页岩的宏观和微观多重非均质性研究是页岩气勘探开发的核心内容之一。四川盆地涪陵焦石坝地区黑色页岩可划分为2个三级层序, 9个小层, 其宏观非均质性主要表现为: 页理缝总体呈现自下而上先减少后增加的趋势; 砂质条带与页理呈负相关性, 表现为先增加后减少; 黄铁矿总体呈现出自下而上逐渐减少的特征; 笔石种类则显示出海侵体系域以双笔石科为主, 早期高位和晚期高位体系域逐渐过渡至以单笔石科为主, 笔石丰度则表现出从下至上逐渐减少的趋势。其微观非均质性主要表现为: 有机碳含量由下至上具有逐渐减小的趋势, 在海侵体系域内含量最高; 黏土矿物含量的变化由下至上逐渐增加。整体来看, 生物、等深流、陆源3种沉积作用共同控制了焦石坝地区黑色页岩的非均质性。

关键词:页岩气; 非均质性; 焦石坝; 涪陵; 四川盆地

中图分类号: TE132.2

文献标识码: A

Heterogeneity characteristics and controlling factors of black shale in Jiaoshiba, Fuling, Sichuan Basin

LIU Meng¹, LIU Chao¹, SHU Zhiheng¹, LU Yongchao², GU Qian³, TAN Congwen³, XU Xiang³

(1. Jiangnan Oilfield Company, SINOPEC, Qianjiang, Hubei 433124, China;

2. China University of Geosciences, Faculty of Earth Resources, Wuhan, Hubei 430074, China;

3. Chongqing Fuling Shale Gas Exploration and Development Company, SINOPEC, Chongqing 408014, China)

Abstract: The study of macroscopic and microscopic heterogeneity of shale is one of the core aspects of shale gas exploration and development. The black shale in Jiaoshiba area in Fuling of Sichuan Province can be divided into two third-level sequences and nine sub-layers. The macroscopic heterogeneity mainly shows as follows. Laminae decrease first and then increase from bottom to top, sandy bands first increase and then decrease, while pyrites gradually decrease. Graptolithina in the transgressive system tract is mainly diplograptus type, while those in the early and late high system tracts are mainly monograptus type. Graptolithina abundance gradually reduces from bottom to top. The microscopic heterogeneity mainly shows as follows. TOC content in the transgressive system tract is the highest, and then decreases upwards, while clay mineral content gradually increases from bottom to top. On the whole, three kinds of sedimentation, bio-current, isochronous flow and terrigenous source, jointly controlled the heterogeneity of black shale in the Jiaoshiba area.

Key words: shale gas; heterogeneity; Jiaoshiba; Fuling; Sichuan Basin

1 研究区概况

1.1 区域构造特征

焦石坝地区位于四川盆地川东南构造区的川东褶皱带、万县复向斜的南部与方斗山背斜带西侧的交会区域。焦石坝构造位于包鸾—焦石坝背斜带, 焦页A井井区即位于该构造。焦石坝构造为

主体平缓、边缘被大耳山西、石门、吊水岩、天台场等断层夹持所复杂化的断背斜构造。

1.2 焦石坝地区黑色页岩

由于扬子板块和华夏陆块会聚, 以及扬子与华北板块的不断俯冲碰撞, 四川盆地晚奥陶世五峰期发生海侵, 在上扬子地区, 尤其是沿川西南及川东南等地区, 形成了五峰—龙马溪早期相对滞留、缺

氧、水体较深的深水陆棚沉积环境,从而发育了一套巨厚的黑色页岩,其内不但富含黄铁矿,而且还见丰富的笔石与大量的硅质放射虫,及少量硅质海绵骨针等生物共生。该套岩性横向稳定,是四川盆地主要的烃源岩系^[1-3]。焦页 A 井实钻证实,该区内五峰组—龙马溪组一段厚度达 89 m,岩性主要为硅质页岩,富含黄铁矿和笔石,且富含有机质,为一套重要的烃源岩,是该区页岩气勘探的主要目标,自下而上可将其划分为 2 个三级层序,9 个小层^[4](图 1)。

2 宏观非均质性

国内外对黑色细粒沉积物的宏观非均质性研究比较少见,本次研究在建立高精度等时格架的基础上,从黑色页岩的页理、砂质条带发育特征、黄铁矿发育情况以及笔石发育特征等方面入手,分析不同沉积时期黑色页岩的差异,阐明焦石坝黑色页岩宏观非均质性的基本特征。其中,页理总体呈现自下而上先减少后增加的趋势;砂质条带与页理呈负相关性,表现为先增加后减少;黄铁矿总体呈现出自下而上逐渐减少的特征;笔石种类则显示出海侵体系域以双笔石科为主,早期高位和晚期高位体系域逐渐过渡至以单笔石科为主,笔石丰度则表现出从下至上逐渐减少的趋势^[2-5]。

2.1 页理非均质性

根据对页理发育程度的统计,总体趋势为自下而上先减少后增加(图 2)。在海侵体系域中页理大量发育,在早期高位体系域中页理比较发育,在晚期高位体系域中页理大量发育,但是仍低于海侵体系域中页理的发育程度。在层序 Sq1 中,页理发育程度自下而上由比较发育减少到一般发育,大致在深度 2 412.5 m 处,其下部页理比较发育,其上部页理一般发育。在层序 Sq2 的海侵体系域内部的准层序组 P2ss1 和 P2ss2 中,页理整体发育程度较高,且自下而上由比较发育增加到大量发育。在早期高位体系域内部的准层序组 P2ss3 中,页理发育程度自下而上由比较发育增加到大量发育,但是其页理整体发育程度仍低于准层序组 P2ss1 和 P2ss2 中的页理发育程度。在早期高位体系域内的准层序组 P2ss4 中,页理发育程度整体为比较发育。在早期高位体系域内的准层序组 P2ss5 下部,页理发育程度为一般发育,向上增加到大量发育,其页理整体发育程度高于准层序组 P2ss3 中的页理发育程度。在早期高位体系域中的准层序组 P2ss5 的顶底部,页理发育程度都较高,但是中间部位很少发育。在晚期高位体系域内的准层序组 P2ss6 中,页理整体大量发育,只有在底部页理一般发育。在晚期高位体系域内的准层序组 P2ss7 中,自下而

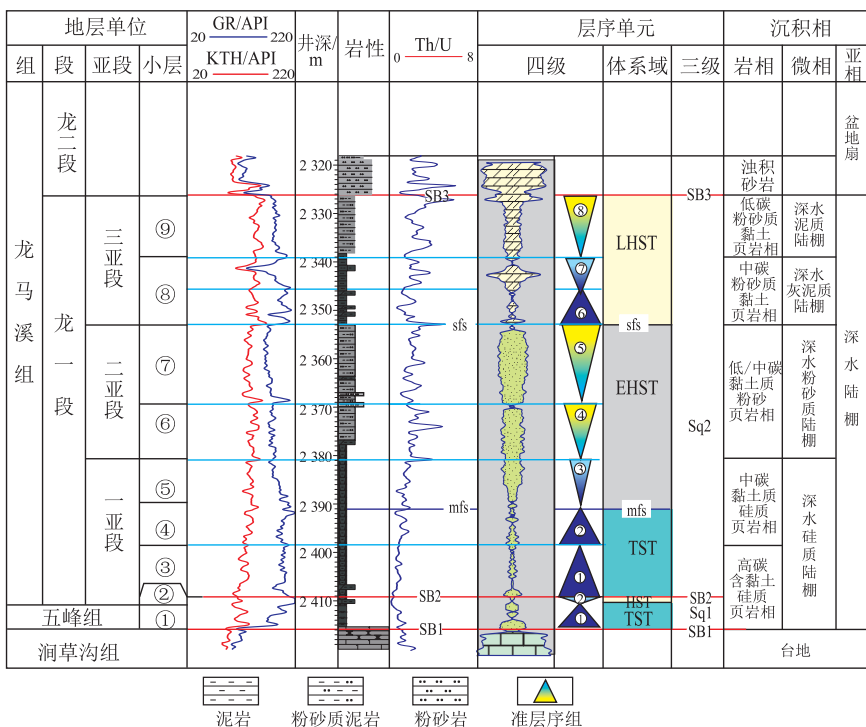


图 1 四川盆地焦石坝地区焦页 A 井五峰组—龙马溪组一段层序划分

Fig.1 Sequence division from the Wufeng Formation to the first member of Longmaxi Formation in well JY A, Jiaoshiba area, Sichuan Basin

上页理发育程度由大量发育减少到一般发育。在晚期高位体系域内的准层序组 P2ss8 中,页理整体为一般发育,在顶部少部分页理发育不明显^[5-6]。

2.2 砂质条带发育非均质性

砂质条带发育程度的总体趋势为自下而上先增加后减少(图 2)。在海侵体系域内,砂质条带很少发育。在早期高位体系域内,砂质条带发育程度较高。在晚期高位体系域内,砂质条带整体很少发育,仅在中部小范围大量发育砂质条带。在海侵体系域内部的 2 个准层序组和早期高位体系域内部的准层序组 P2ss3 中,都很少发育砂质条带。到早期高位体系域内部的准层序组 P2ss4 中,开始明显发育砂质条带,从一般发育增加到大量发育,后又减少到比较发育,总体呈现先增加后减少的趋势。在早期高位体系域内部的准层序组 P2ss5 的下部,砂质条带一般发育,局部比较发育,顶部又减少到很少发育。在早期高位体系域内部的准层序组 P2ss5 的中部,整体很少发育砂质条带,上部一般发育。在晚期高位体系域内部的准层序组 P2ss6 中,砂质条带很少发育。到晚期高位体系域内部的准层序组 P2ss7 中,开始出现大量发育的砂质条带,但是大量发育的地层厚度不大。在晚期高位体系域内部的准层序组 P2ss8 中,很少发育砂质条带^[7-8]。

2.3 黄铁矿发育非均质性

根据对每个准层序组黄铁矿估计厚度的统计,黄铁矿发育的总体趋势为自下而上逐渐减少(图 3)。在海侵体系域内,黄铁矿含量最高,最大估计厚度可达 15.8 cm。到早期高位体系域内,黄铁矿估计厚度减少到 5~10 cm 和 1~5 cm。到晚期高位体系域,含量再少量增加后又减少。如表 1 所示,在海侵体系域内部的准层序组 P2ss1 和 P2ss2 中,黄铁矿发育的估计厚度达到了 15.8 cm,相对于层序 Sq2 有了明显的增加趋势。在早期高位体系域内部的准层序组 P2ss3 中,黄铁矿估计厚度为 5.4 cm,相

表 1 四川盆地焦石坝地区焦页 A 井 Sq2 层序内黄铁矿估计厚度统计

Table 1 Estimated pyrite thickness in Sq2, well JY A, Jiaoshiba area, Sichuan Basin

| 体系域 | 四级层序 | 深度/m | 黄铁矿估计厚度/cm |
|------|-------------|-----------------|------------|
| LHST | P2ss8 | 2 339.5~2 330.5 | 0.9 |
| | P2ss7 | 2 345.4~2 339.5 | 1.1 |
| | P2ss6 | 2 353.1~2 345.4 | 7.8 |
| | P2ss6 | 2 361.5~2 353.1 | 1.1 |
| EHST | P2ss5 | 2 368.8~2 361.5 | 1.3 |
| | P2ss4 | 2 378.8~2 368.8 | 3.5 |
| | P2ss3 | 2 392.0~2 378.8 | 5.4 |
| TST | P2ss1-P2ss2 | 2 411.0~2 392.0 | 15.8 |

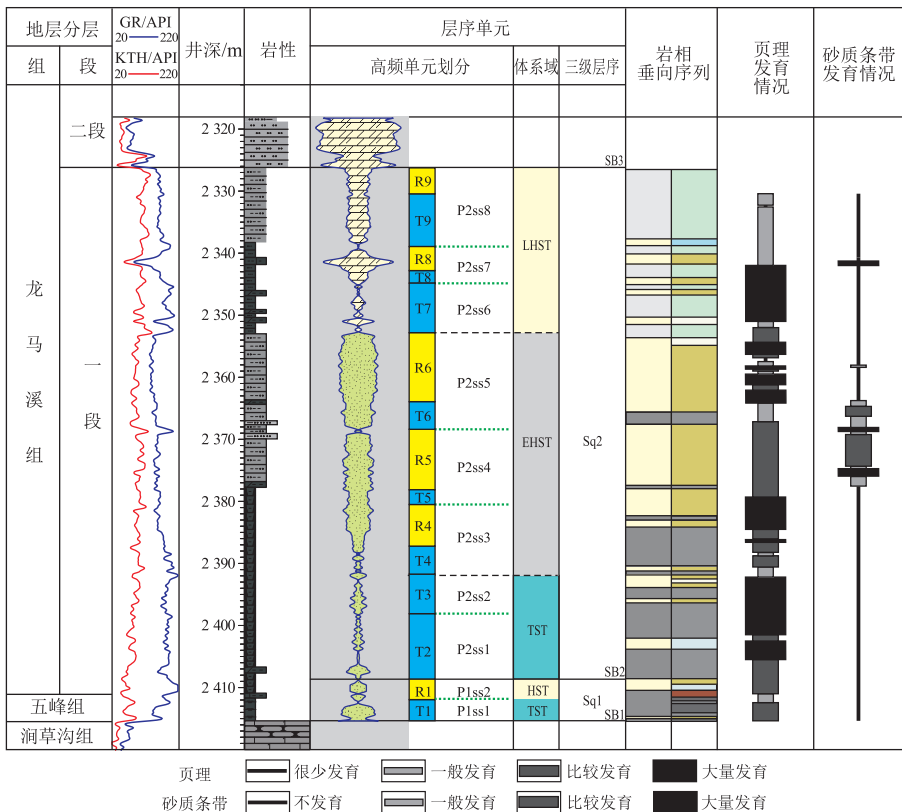


图 2 四川盆地焦石坝地区黑色页岩页理及砂质条带非均质性特征

Fig.2 Black shale and sandy strip heterogeneity characteristics of Jiaoshiba area, Sichuan Basin

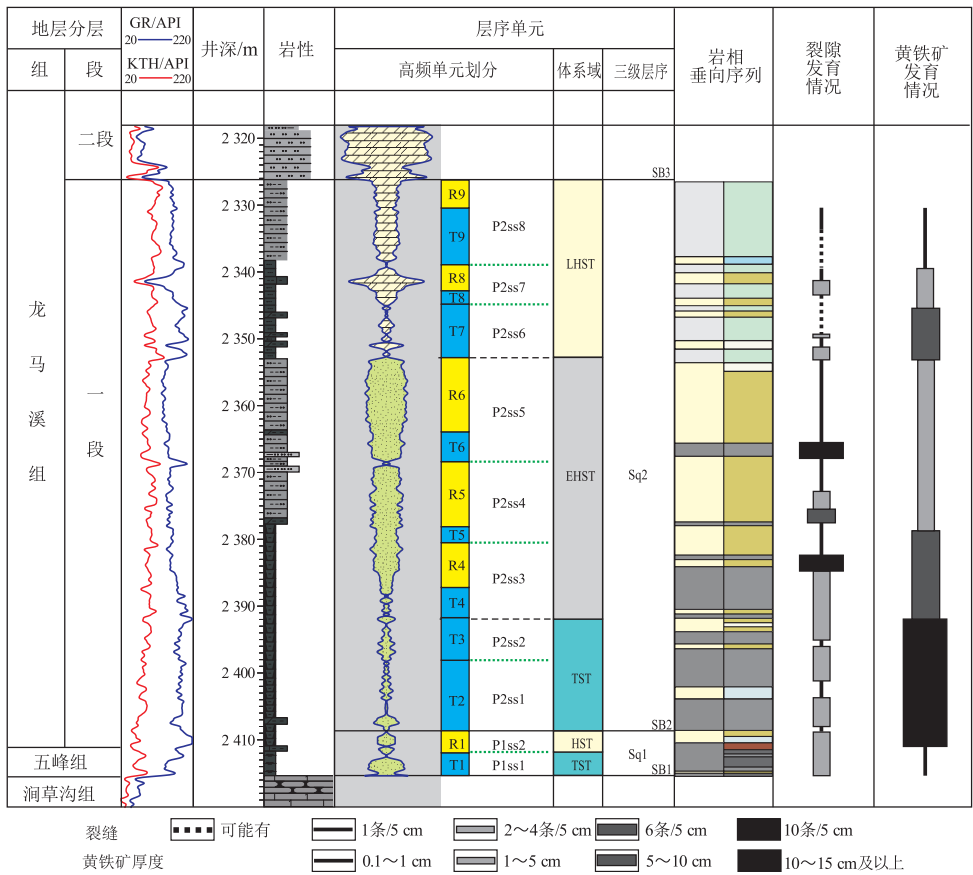


图3 四川盆地焦石坝地区黑色页岩黄铁矿非均质性特征

Fig.3 Black shale pyrite heterogeneity characteristics of Jiaoshiba area, Sichuan Basin

对于海侵体系域中黄铁矿估计厚度有明显减少的趋势。在早期高位体系域内部的准层序组 P2ss4 和 P2ss5 中,黄铁矿估计厚度都在 1~5 cm 范围内;在准层序组 P2ss4 中估计平均厚度为 3.5 cm,在准层序组 P2ss5 中估计平均厚度为 1.3 cm。从黄铁矿发育估计厚度上看,早期高位体系域内部的 P2ss3、P2ss4 和 P2ss5 这 3 个准层序组中,自下而上呈向上减少的趋势。在晚期高位体系域内部的准层序组 P2ss6 中,底部黄铁矿估计厚度为 1.1 cm,上部为 7.8 cm,厚度有增加的趋势。在晚期高位体系域内部的准层序组 P2ss7 中,黄铁矿估计厚度为 1.1 cm,相对于准层序组 P2ss6 中有减少的趋势。在晚期高位体系域内部的准层序组 P2ss8 中,黄铁矿估计厚度为 0.9 cm,相对于准层序组 P2ss7 中有减少的趋势^[9-10]。

2.4 笔石发育非均质性

根据对笔石发育种类及数量的统计,以尖笔石、雕笔石、直笔石、锯笔石、单笔石、耙笔石、栅笔石、花瓣笔石各笔石种属为统计依据,焦石坝地区黑色页岩中尖笔石最为发育,其次为直笔石、单笔石、耙笔石,发育少量雕笔石、锯笔石、栅笔石和花

瓣笔石。在底部海侵体系域内部的准层序组 P1ss1 中,笔石种类以尖笔石最为发育,少量发育雕笔石、直笔石和单笔石。向上的准层序组 P2ss1 和 P2ss2 中,仍以尖笔石丰度最高,雕笔石、直笔石、栅笔石和花瓣笔石较少,且分布不均匀。在早期高位体系域内部的准层序组 P2ss3 中,笔石的发育情况与下伏的海侵体系域准层序组 P2ss1 和 P2ss2 中的类似,没有明显的变化,仍以尖笔石为主,雕笔石、直笔石和栅笔石较少,但花瓣笔石则没有发育。早期高位体系域内的准层序组 P2ss4 中,笔石发育的明显变化是直笔石的含量增加,由低丰度变为中等,但栅笔石也不发育了,整体仍以尖笔石含量最多,但与下伏的准层序组相比有不太明显的减少趋势。在早期高位体系域内部的准层序组 P2ss5 中,尖笔石含量明显变少,直笔石有变多的趋势,但仍以尖笔石为主,雕笔石变少,单笔石明显变多,耙笔石大量出现,但含量小于 10%。在早期高位体系域内部的准层序组 P2ss5 中,尖笔石含量变化不大,直笔石、单笔石和耙笔石丰度中等,出现少量锯笔石。在晚期高位体系域内部的准层序组 P2ss6 中,笔石发育情况与准层序组 P2ss5 中基本

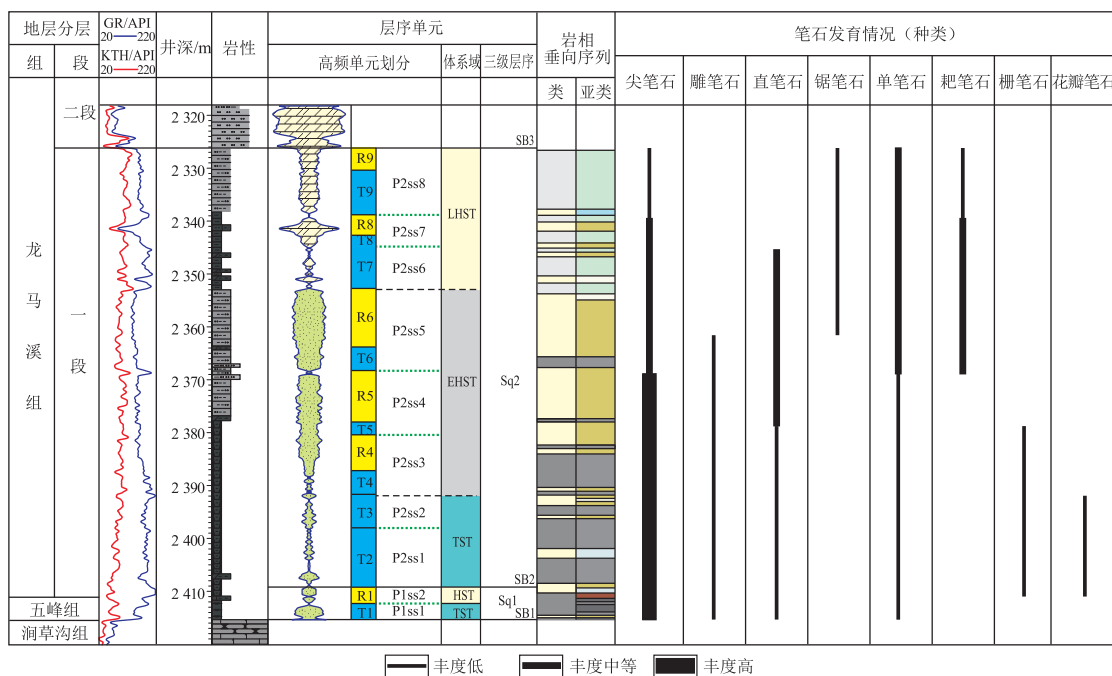


图 4 四川盆地焦石坝地区黑色页岩笔石发育特征

Fig.4 Black shale graptolite development characteristics of Jiaoshiiba area, Sichuan Basin

一致。在晚期高位体系域内部的准层序组 P2ss7 中,尖笔石含量减少,但仍为大于 5% 的中等丰度,直笔石突然消失,锯笔石、单笔石和耙笔石含量稳定,与准层序组 P2ss5 中基本一致。在晚期高位体系域内部的准层序组 P2ss8 中,尖笔石含量明显变少,丰度变为低等,锯笔石、单笔石变化不大,耙笔石含量也减少至 5% 以下的低丰度^[11-13](图 4)。

3 微观非均质性

焦石坝地区黑色页岩在有机碳含量及黏土矿物含量方面均表现出明显的垂向非均质性。其中,有机碳含量由下至上逐渐减小,在下部海侵体系域内含量最高;黏土矿物含量由下至上逐渐增加,在晚期高位体系域内含量最高^[14]。

3.1 有机碳含量非均质性

数据分析显示,总体上有机碳含量由下至上具有逐渐减小的趋势(图 5)。在下部海侵体系域的 2 个准层序组中,有机碳含量较高,为 1.29% ~ 5.89%,平均 3.77%;其次为早期高位体系域,为 0.91% ~ 3.99%,平均 2.19%;最低为晚期高位体系域,为 0.55% ~ 3.26%,平均 1.69%。

通过分析可以看出,S₂初始值由下至上具有逐渐减小的趋势,在下部海侵体系域时期为较高值,其中的变化趋势可分为 2 部分。首先,在准层序组 P1ss1 的底部 S₂ 有最高值,可达 48.36 mg/g,向上至准层序组 P2ss1 的中下部,S₂ 初始值急剧减少到

海侵体系域时期的最低值;其次,从准层序组 P2ss1 的中下部向上至准层序组 P2ss2, S₂ 初始值具有先增加再减少的趋势。次为早期高位体系域时期,其中的变化趋势也可分为 2 部分。首先,从准层序组 P2ss3 的底部至准层序组 P2ss3 的顶部, S₂ 初始值具有先增加再减少的趋势;其次,准层序组 P2ss3 的顶部至准层序组 P2ss5 的顶部, S₂ 初始值具有齿状缓慢减少的趋势。最后为晚期高位体系域时期,其中在准层序组 P2ss6 和 P2ss7 中, S₂ 初始值均具有齿状缓慢减少的趋势,在准层序组 P2ss8 的中下部, S₂ 初始值有最低值。

有机碳残余值与有机碳恢复值具有大致相同的变化趋势,由下至上均逐渐减小。在海侵体系域时期为较高值,有机碳残余值与有机碳恢复值的变化趋势可分为 2 部分。首先,在准层序组 P1ss1 的底部有机碳残余值与有机碳恢复值有最高值,向上至准层序组 P2ss1 的中下部具有缓慢减少的趋势;其次,从准层序组 P2ss1 的中下部至准层序组 P2ss2,有机碳残余值与有机碳恢复值具有先增加再减少的趋势。次为早期高位体系域时期,有机碳残余值与有机碳恢复值的变化趋势也可分为 2 部分。首先,从准层序组 P2ss3 的底部至准层序组 P2ss3 的顶部,有机碳残余值与有机碳恢复值具有先增加再减少的趋势;其次,准层序组 P2ss3 的顶部至准层序组 P2ss5 的顶部,有机碳残余值与有机碳恢复值具有齿状缓慢减少的趋势,并在准层序组

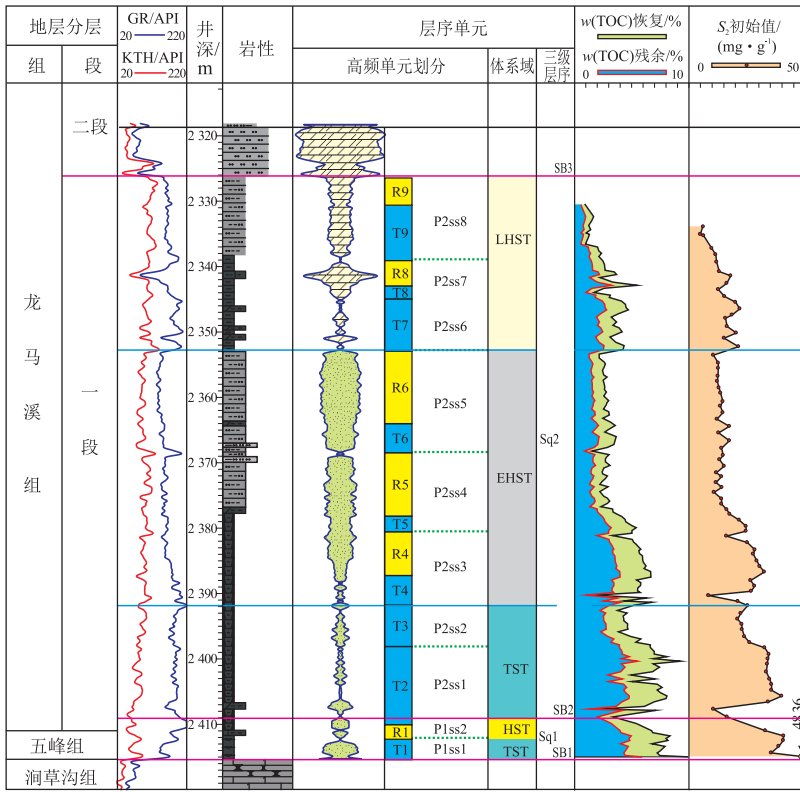


图 5 四川盆地焦石坝地区黑色页岩有机碳含量

Fig.5 Black shale TOC contents in Jiaoshiba area, Sichuan Basin

P2ss5 的底部有最低值。最后为晚期高位体系域时期,其中在准层序组 P2ss6 中,有机碳残余值与有机碳恢复值具有齿状缓慢减少的趋势,在准层序组 P2ss7 的中下部有最高值,在准层序组 P2ss8 的中下部有最低值。通过以上的分析可以得出,有机碳残余值与有机碳恢复值的变化趋势与 S₂ 初始值的变化趋势有较高的一致性^[14-15]。

3.2 黏土矿物发育非均质性

通过对焦石坝地区黑色页岩实测资料的系统分析可知,黏土矿物发育在垂向上具有明显的非均质性变化,总体上黏土总量由下至上具有逐渐增加的趋势(图 6)。在上部晚期高位体系域的 3 个准层序组中,黏土总量为较高值,平均值为 53.24%,其中在准层序组 P2ss7 的中下部有最高值,为 62.6%,在准层序组 P2ss6 的上部有最低值,为 36.7%;次为早期高位体系域,平均值为 41.14%,其中在准层序组 P2ss1 的上部和中下部有最高值,为 47%,在准层序组 P2ss4 的中部有最低值,为 33.3%;最后为海侵体系域,平均值为 31%,其中在准层序组 P1ss1 的上部有最高值,为 49.1%,在准层序组 P1ss1 的顶部有最低值,为 16.6%。

黏土矿物主要包括伊利石、伊蒙混层和绿泥石。其中伊利石含量由下至上具有逐渐增加的趋势;在

晚期高位体系域时期有较高值,平均值为 47.5%,在准层序组 P2ss7 的中上部有最高值,为 61%,在准层序组 P2ss6 的上部有最低值,为 27%;次为早期高位体系域时期,平均值为 44.33%,在准层序组 P2ss1 的中上部和准层序组 P2ss2 的中上部有最高值,为 68%,在准层序组 P2ss1 的中部有最低值,为 16%;最后为海侵体系域时期,平均值为 23.75%,在准层序组 P1ss1 的底部有最高值,为 49%,在准层序组 P1ss1 的顶部有最低值,为 12%。伊蒙混层含量由下至上具有逐渐减小的趋势:在海侵体系域时期为较高值,平均值为 72.13%,在准层序组 P1ss2 的中下部有最高值,为 85%,在准层序组 P1ss1 的底部和准层序组 P1ss2 的上部有最低值,为 43%;次为早期高位体系域时期,平均值为 47.86%,在准层序组 P2ss1 的中部有最高值,为 80%,在准层序组 P2ss2 的中上部有最低值,为 25%;最后为晚期高位体系域时期,平均值为 47.55%,在准层序组 P2ss8 的上部有最高值,为 69%,在准层序组 P2ss5 的中下部有最低值,为 32%。绿泥石含量由下至上具有先增加后减小的趋势:在早期高位体系域时期为较高值,平均值为 7.81%,在准层序组 P2ss4 的下部有最高值,为 20%,在准层序组 P2ss2 的中部有最低值,为 2%;次为晚期高位体系域时期,平

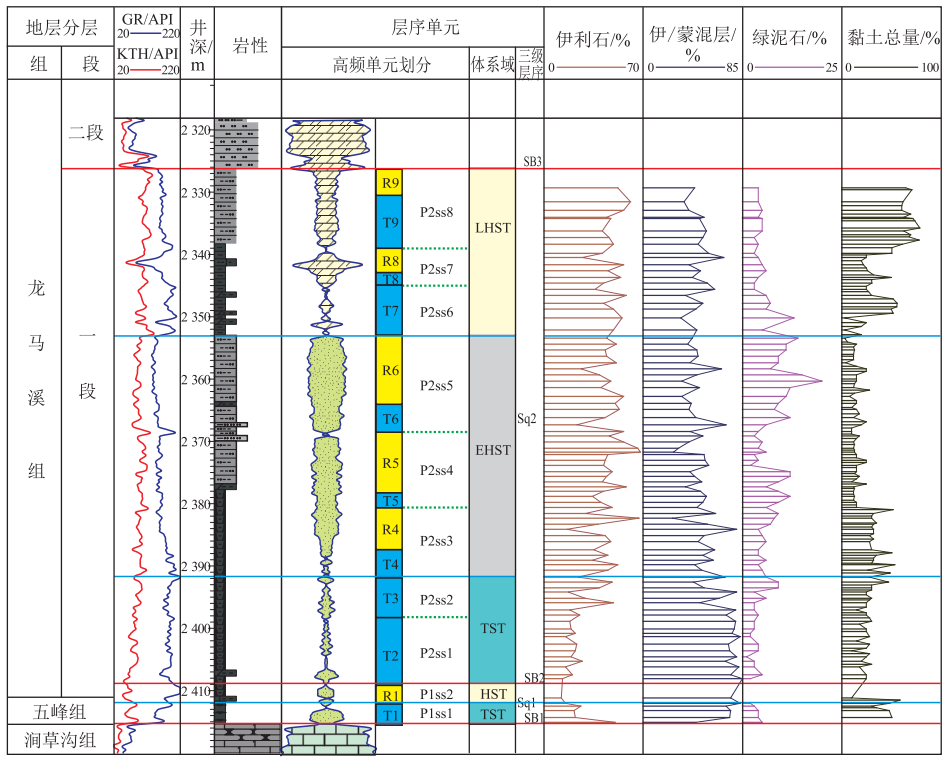


图 6 四川盆地焦石坝地区黑色页岩黏土矿物

Fig.6 Clay minerals in black shale in Jiaoshiba area, Sichuan Basin

均值为 4.95%，在准层序组 P2ss5 的下部有最高值，为 13%，在准层序组 P2ss5 的上部有最低值，为 3%；最后为海侵体系域时期，平均值为 3.74%，在准层序组 P1ss2 的上部有最高值，为 9%，在准层序组 P1ss2 的中下部有最低值，为 1%。

综上所述，伊利石含量由下至上具有逐渐增加的趋势，伊蒙混层含量由下至上具有逐渐减小的趋势，绿泥石含量由下至上具有先增加后减小的趋势。其中伊利石含量的变化趋势与黏土总量的变化趋势具有较高的一致性，伊蒙混层含量的变化趋势则与黏土总量的变化趋势相反^[16-19]。

4 非均质控制因素分析

前文中，生物沉积作用控制了笔石的发育情况，陆源碎屑控制了黏土矿物的含量，在此重点阐述等深流对焦石坝地区黑色页岩非均质性的控制作用。

等深流是由于地球旋转而形成的温盐环流。这种环流平行海底等深线作稳定低速流动(5~20 cm/s)，主要出现在陆隆区，亦称为高流、水平流和平流等。由等深流沉积形成的岩石称为等积岩。在焦石坝地区黑色页岩早期高位体系域内广泛发育的砂质条带就属于等深流沉积，主要证据如下：(1) 研究区龙马溪组一段早期高位体系域内的岩

心特征与现代海洋等深流沉积具有相似的沉积结构；(2) 野外剖面相应层位也发现有同样的等深流沉积结构，在研究区鹿角剖面 and 漆辽剖面广泛发育夹有薄砂体的等深流沉积，同时可见砂层表面的笔石化石具有一定的定向性；(3) 焦页 1 井岩心具有典型的等深流沉积序列，且相应层段岩心中笔石化石具有明显的定向性^[20]。

5 结论

- (1) 焦石坝地区黑色页岩页理缝总体呈现自下而上先减少后增加的趋势，砂质条带表现为先增加后减少，黄铁矿总体呈现出自下而上逐渐减少的特征，笔石丰度则表现出从下至上逐渐减小的趋势。
- (2) 焦石坝地区黑色页岩有机碳含量由下至上具有逐渐减小的趋势，在海侵体系域内含量最高，黏土矿物含量的变化由下至上逐渐增加。
- (3) 生物、等深流和陆源 3 种沉积作用共同控制了焦石坝地区黑色页岩非均质性。

参考文献：

[1] 刘树根, 马文辛, JANSAL, 等. 四川盆地东部地区下志留统龙马溪组页岩储层特征[J]. 岩石学报, 2011, 27(8): 2239-2252.
LIU Shugen, MA Wenxin, JANSAL, et al. Characteristics of the shale gas reservoir rocks in the Lower Silurian Longmaxi Forma-

- tion, east Sichuan Basin, China [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2011, 27(8): 2239-2252.
- [2] LOUCKS R G, REED R M, RUPPEL S C, et al. Preliminary classification of matrix pores in mudrocks [J]. *Gulf Coast Association of Geological Societies Transactions*, 2010, 60: 435-441.
- [3] LOUCKS R G, REED R M, RUPPEL S C, et al. Spectrum of pore types and networks in mudrocks and a descriptive classification for matrix-related mudrock pores [J]. *AAPG Bulletin*, 2012, 96(6): 1071-1098.
- [4] 魏志红, 魏祥峰. 页岩不同类型孔隙的含气性差异: 以四川盆地焦石坝地区五峰组—龙马溪组为例 [J]. *天然气工业*, 2014, 34(6): 37-41.
WEI Zhihong, WEI Xiangfeng. Comparison of gas-bearing property between different pore types of shale: A case from the Upper Ordovician Wufeng and Longmaxi Fms in the Jiaoshiba area, Sichuan Basin [J]. *Natural Gas Industry*, 2014, 34(6): 37-41.
- [5] ROSS D J, BUSTIN R M. Shale gas potential of the Lower Jurassic Gordondale Member, northeastern British Columbia, Canada [J]. *Bulletin of Canadian Petroleum Geology*, 2007, 55(1): 51-75.
- [6] 高岗, 柳广弟, 王绪龙, 等. 准噶尔盆地上三叠统泥页岩解吸气特征 [J]. *天然气地球科学*, 2013, 24(6): 1284-1289.
GAO Gang, LIU Guangdi, WANG Xulong, et al. Characteristics of separated shale gas from the Upper Triassic of Junggar Basin [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2013, 24(6): 1284-1289.
- [7] ZHANG T W, ELLIS G S, RUPPEL S C, et al. Effect of organic-matter type and thermal maturity on methane adsorption in shale-gas systems [J]. *Organic Geochemistry*, 2012, 47: 120-131.
- [8] HILL R J, JARVIE D M, ZUMBERGE J, et al. Oil and gas geochemistry and petroleum systems of the Fort Worth Basin [J]. *AAPG Bulletin*, 2007, 91(4): 445-473.
- [9] XIA Xinyu, TANG Yongchun. Isotope fractionation of methane during natural gas flow with coupled diffusion and adsorption/desorption [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2012, 77: 489-503.
- [10] 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.
ZHANG Jinchuan, JIN Zhijun, YUAN Mingsheng. Reservoiring mechanism of shale gas and its distribution [J]. *Natural Gas Industry*, 2004, 24(7): 15-18.
- [11] 郭彤楼, 张汉荣. 四川盆地焦石坝页岩气田形成与富集高产模式 [J]. *石油勘探与开发*, 2014, 41(1): 28-36.
GUO Tonglou, ZHANG Hanrong. Formation and enrichment mode of Jiaoshiba shale gas field, Sichuan Basin [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2014, 41(1): 28-36.
- [12] 聂海宽, 张金川, 张培先, 等. 福特沃斯盆地 Barnett 页岩气藏特征及启示 [J]. *地质科技情报*, 2009, 28(2): 87-93.
NIE Haikuan, ZHANG Jinchuan, ZHANG Peixian, et al. Shale gas reservoir characteristics of Barnett shale gas reservoir in Fort Worth Basin [J]. *Geological Science and Technology Information*, 2009, 28(2): 87-93.
- [13] 徐旭辉, 郑伦举, 马中良. 泥页岩中有机质的赋存形态与油气形成 [J]. *石油实验地质*, 2016, 38(4): 423-428.
XU Xuhui, ZHENG Lunju, MA Zhongliang. Organic matter occurrence and hydrocarbon generation in shale [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2016, 38(4): 423-428.
- [14] 郭英海, 赵迪斐. 微观尺度海相页岩气储层微观非均质性研究 [J]. *中国矿业大学学报*, 2015, 4(2): 250-257.
GUO Yinghai, ZHAO Difei. Micro-scale marine shale gas reservoir microscopic heterogeneity research [J]. *Journal of Chinese Mining University*, 2015, 4(2): 250-257.
- [15] 高波. 四川盆地龙马溪组页岩气地球化学特征及其地质意义 [J]. *天然气地球科学*, 2015, 26(6): 1173-1182.
GAO Bo. Geochemical characteristics of shale gas from Lower Silurian Longmaxi Formation in the Sichuan Basin and its geological significance [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2015, 26(6): 1173-1182.
- [16] 焦淑静, 韩辉, 翁庆萍, 等. 页岩孔隙结构扫描电镜分析方法研究 [J]. *电子显微学报*, 2012, 31(5): 432-436.
JIAO Shujing, HAN Hui, WENG Qingping, et al. Scanning electron microscope analysis of porosity in shale [J]. *Journal of Chinese Electron Microscopy Society*, 2012, 31(5): 432-436.
- [17] 吉利明, 邱军利, 夏燕青, 等. 常见黏土矿物电镜扫描微孔隙特征与甲烷吸附性 [J]. *石油学报*, 2012, 33(2): 249-256.
JI Liming, QIU Junli, XIA Yanqing, et al. Characteristics of micro-pore and adsorption of methane by electron microscopy of common clay minerals [J]. *Petroleum Journal*, 2012, 33(2): 249-256.
- [18] 杨峰, 宁正福, 胡昌蓬, 等. 页岩储层微观孔隙结构特征 [J]. *石油学报*, 2013, 34(2): 301-311.
YANG Feng, NING Zhengfu, HU Changpeng, et al. Characterization of microscopic pore structures in shale reservoirs [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2013, 34(2): 301-311.
- [19] 秦华, 范小军, 刘明, 等. 焦石坝地区龙马溪组页岩解吸气地球化学特征及地质意义 [J]. *石油学报*, 2016, 37(7): 846-854.
QIN Hua, FAN Xiaojun, LIU Ming, et al. Geochemical characteristics and geological significance of desorbed shale gas in Longmaxi Formation, Jiaoshiba area [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2016, 37(7): 846-854.
- [20] 黄文明, 刘树根, 王国芝, 等. 四川盆地地下古生界油气地质条件及气藏特征 [J]. *天然气地球科学*, 2011, 22(3): 465-476.
HUANG Wenming, LIU Shugen, WANG Guozhi, et al. Characteristics of hydrocarbon geologic conditions and gas reservoirs in Lower Paleozoic of Sichuan Basin [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2011, 22(3): 465-476.

(编辑 韩 彧)