

四川盆地涪陵地区五峰组-龙马溪组含气页岩段纵向非均质性及其发育主控因素

孟志勇

(中国石化 江汉油田分公司 勘探开发研究院,湖北 武汉 430223)

摘要:四川盆地涪陵地区下志留统龙马溪组发育一套富有机质泥页岩,勘探证实为一套优质含气页岩储层。该套页岩具有较强的纵向非均质性,直接影响了储层含气量及储层可改造性。研究首先建立了页岩等时层序地层对比格架;在等时地层格架中,分析了页岩储层在岩矿组成、黄铁矿含量、沉积构造、有机质丰度等方面的非均质性特征。在海侵期,页岩中主要发育自生硅质和沉积成因的自生黄铁矿,页理发育,有机碳含量高,与硅质之间呈现特殊的正相关耦合关系。早期高位域时期,页岩中主要包含陆源粉砂,发育小型波纹层理和透镜状层理;粘土质含量较海侵期有所增加,有机碳含量中等;兼有沉积成因的自生黄铁矿和后期次生成因的黄铁矿。晚期高位域时期,粘土质含量进一步增加;粉砂质含量减少;有机碳含量低;兼有沉积成因的自生黄铁矿和后期次生黄铁矿。从沉积作用、古海洋生产力和氧化还原环境等方面探讨了非均质性的影响因素,明确其主要受控于陆源供给速率、古生产力、水体氧化还原性和古洋流等因素。

关键词:页岩非均质性;页岩气;五峰组;龙马溪组;涪陵地区;四川盆地

中图分类号:TE122.2

文献标识码:A

Vertical heterogeneity and its controlling factors of the gas shale in the Wufeng-Longmaxi Fms in Fuling area, the Sichuan Basin

Meng Zhiyong

(Exploration and Production Research Institute, SINOPEC Jiangnan Oilfield Company, Wuhan, Hubei 430223, China)

Abstract: The organic shales in the Lower Silurian Longmaxi Fm in Fuling area, the Sichuan Basin are proved to be shale gas reservoirs of high quality. Nevertheless, they have relatively strong vertical heterogeneity, directly influencing its gas content and reservoir fracability. An isochronal sequence stratigraphic framework is first established. Then, the heterogeneities of the shale are analyzed in respects of petrological and mineralogical compositions, the content of pyrite, sedimentary structures and organic matter abundance within this framework. The shales deposited during TST are characterized by authigenic siliceous minerals and pyrites of sedimentary origin, obvious lamellation, high TOC and special positive relationship between TOC and siliceous mineral content. The shales deposited in the early HST feature in the occurrence of terrigenous silts, small wavy lamination and lenticular bedding, higher clay content than that of TST, moderate TOC, and the existence of both authigenic and secondary pyrites. The shales deposited during the late HST feature in even higher clay content but lower silt content, low TOC and the existence of both authigenic and secondary pyrites. The factors influencing shale heterogeneity are discussed in respects of sedimentology, paleo-marine productivity and redox conditions and they mainly include the influx rate of terrestrial deposits, paleo-marine productivity, redox conditions and paleo-current.

Key words: shale heterogeneity, shale gas, Wufeng Formation, Longmaxi Formation, Fuling area, Sichuan Basin

奥陶纪末五峰组-早志留世龙马溪组沉积早期,涪陵地区整体处于相对安静的深水陆棚沉积环境,发育了一套暗色富碳、富硅、富笔石页岩^[1-2],厚95 m左右,该套页岩储层纵向具较强的非均质性,在岩矿组成、有机质丰度等方面具明显的纵向差异性,结合页岩

气开发需要,根据影响页岩气富集及高产的主要地质参数纵向差异性,整个含气页岩段可划分为9个小层(图1)。

从涪陵页岩气田实际开发效果来看,下部①—⑤小层为最优质页岩,有机质丰度高,物性条件好,含气

收稿日期:2016-07-08;修订日期:2016-11-02。

作者简介:孟志勇(1979—),男,工程师,页岩气地质评价。E-mail:910167606@qq.com。

基金项目:国家科技重大专项(2016ZX05060)。

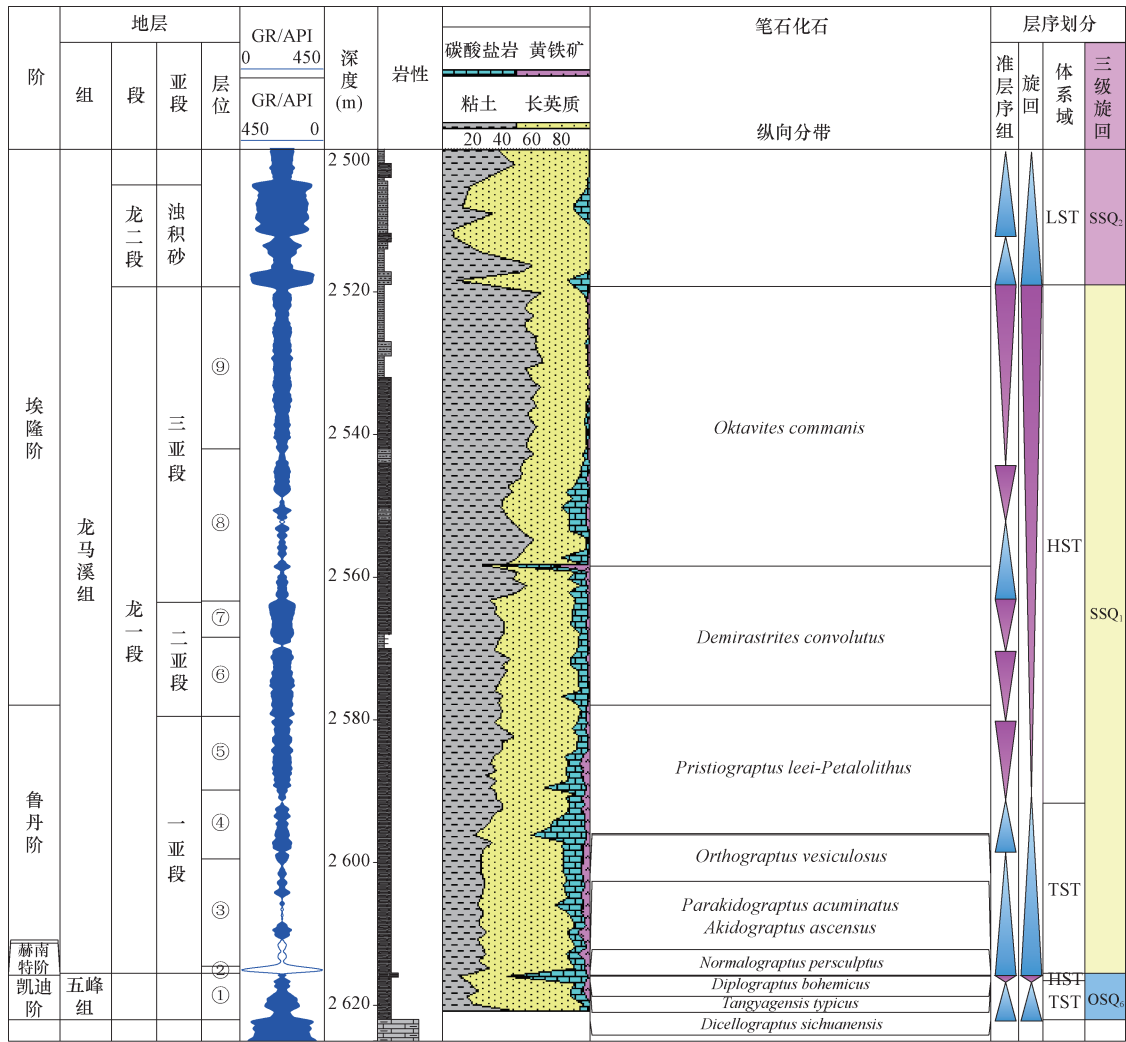


图1 涪陵地区五峰组-龙马溪组含气页岩段生物年代地层综合柱状图

Fig. 1 Generalized biostratigraphic column of the gas shales in the Wufeng-Longmaxi Fms, Fuling area

量高,脆性指数高,后期的压裂效果好,试气产量高(平均达 $36 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$),为开发井水平段最佳穿越层段,而水平段穿越上部⑥—⑨小层开发井的开发效果远远差于穿越①—⑤小层的开发井。页岩自身的非均质性对于页岩自身的品质及可改造性均产生了较大的影响,对后期页岩气的富集及高产起到了关键性的控制作用^[3],因此,厘清页岩储层的纵向非均质性特征及其发育主控因素,可有效指导国内海相页岩气地质评价研究工作。

本次研究首先确立了等时地层对比格架,在等时地层格架中开展了页岩储层纵向非均质性特征及其发育主控因素研究,探讨了陆源供给速率、古生产力、水体氧化还原性、古洋流等因素对页岩纵向非均质性的影响。

1 含气页岩段层序地层格架

涪陵地区五峰组-龙马溪组含气页岩段主体为深水陆棚沉积,发育一套富碳、富硅、富笔石的暗色页岩,

该地区笔石纵向分带研究结果表明:五峰组-龙马溪组含气页岩段共发育10个笔石带,先后经历了凯迪阶、赫南特阶、鲁丹阶及埃隆阶早期,历时约8.88 Ma,可划分为2个三级层序、3个四级层序。第一个三级层序对应于五峰组,从区域上来看,属奥陶系的第6个三级层序(OSQ₆),其底界为五峰组与涧草沟组灰岩的岩性岩相转换面,顶界为五峰组观音桥段富含介壳的灰云质泥岩与上覆的富碳富硅页岩的岩性岩相转换面为界。在湘鄂西地区五峰与龙马溪组界面处为一平行不整合面,普遍缺失观音桥段地层,该期三级层序最大海泛面位于五峰组观音桥段底界面附近。第二个三级层序对应于龙马溪组龙一段,从区域上来看,属志留系第一个三级层序(SSQ₁),层序上界面为龙一段富碳富硅页岩与上覆龙二段浊积砂段的岩性岩相转换面,SSQ₁总体来看存在两期次级海平面升降旋回,最大海泛面位于④小层中上部,次级海泛面位于⑧小层上部(图1)。

由于第一个三级层序的高位域时期沉积地层较薄,观音桥段在区域上地层厚度整体介于20~40 cm,因此涪陵地区五峰组-龙马溪组含气页岩段整体上可

粗略的划分为3个沉积阶段:①—④小层为海侵体系域;⑤—⑧小层为早期高位域;⑨小层为晚期高位域。

2 含气页岩段纵向非均质性特征

涪陵地区五峰组—龙马溪组含气页岩段岩矿、有机质丰度等诸多地质参数纵向上均具备明显的差异性和分段性特征。

2.1 岩矿纵向非均质性特征

从全岩分析结果来看,整个含气页岩段自下而上粘土矿物含量呈现逐渐增加的趋势,硅质含量呈现逐渐减小的趋势(图1,图2a)。其中海侵期(①—④小层)的硅质含量最高,介于40%~60%,粘土含量介于30%~40%;其次为早期高位域时期(⑤—⑧小层)

层),硅质含量介于30%~50%,粘土含量介于40%~50%;晚期高位域时期(⑨小层)硅质含量最低,介于20%~40%,粘土含量介于55%~60%。

薄片鉴定结果表明硅质成因在纵向上具备差异性特征,其中海侵期(①—④小层)发育放射虫、硅质海绵骨针等硅质骨骼类生物化石(图3a),同时发育少量陆源粉砂;早期高位域时期(⑤—⑧小层)主要以陆源粉砂为主,少见硅质骨骼类生物化石,与海侵期相比硅质(包括生物成因硅质与陆源粉砂)含量略有降低,粘土含量有所增加(图1,图3b);晚期高位域时期(⑨小层)硅质仍以陆源粉砂为主,但硅质含量在整个含气页岩段中最低,粘土含量明显增加(图1,图3c)。

为了较好的表征含气页岩段自生硅质含量的纵向变化特征,我们选取各段样品开展了微体古生物实验分析,整个试验过程分7个步骤完成:①首先把岩石样

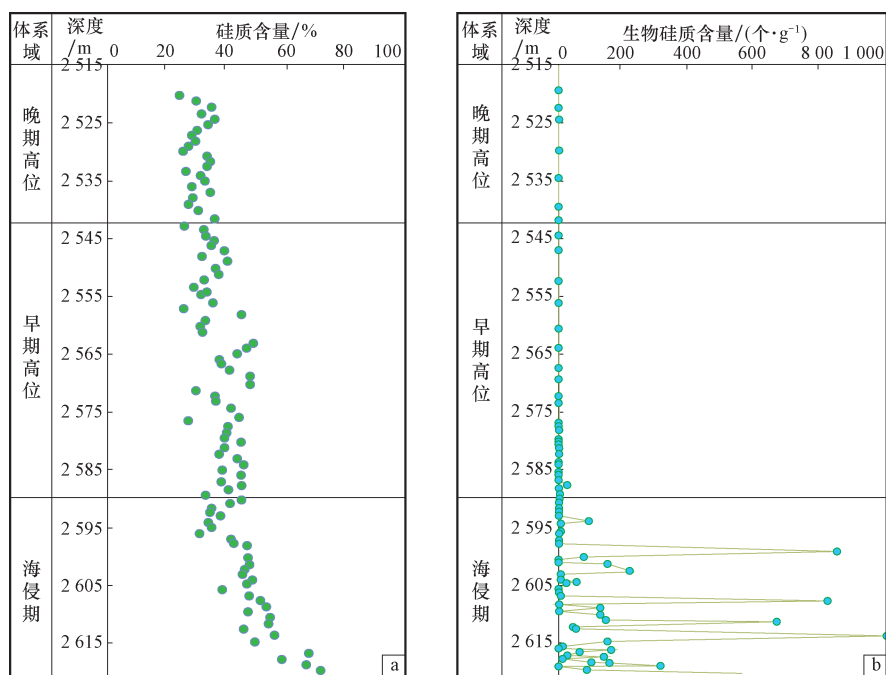


图2 涪陵地区五峰组—龙马溪组含气页岩段硅质及生物成因硅质含量纵向分布

Fig. 2 Vertical distribution of the total silica content and biogenic silica content of the gas shales in the Wufeng-Longmaxi Fms, Fuling area

a. 硅质含量(生物硅+陆源硅)纵向分布;b. 生物成因硅质含量纵向分布

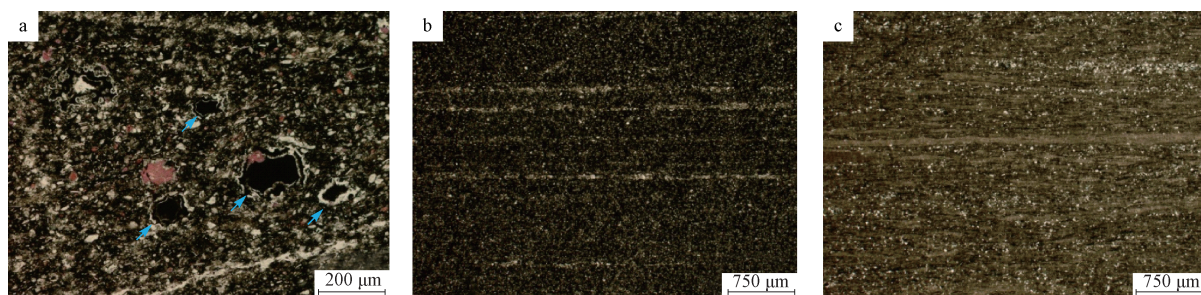


图3 涪陵地区五峰组—龙马溪组含气页岩段薄片照片

Fig. 3 Thin section photos of the gas shales in the Wufeng-Longmaxi Fms in Fuling area

a. 海侵期,发育硅质骨骼类生物化石,含少量陆源粉砂,箭头所指为硅质骨骼类生物放射虫化石;
b. 早期高位,发育陆源粉砂和粘土质;c. 晚期高位,发育粘土矿物,陆源粉砂含量低

品破碎成厘米级的碎块;②每件样品称取 50 ~ 100 g 不等干样品;把样品装入有网孔的塑料袋里,并用 1% ~ 4% 的 HF 酸处理 24 h。把 HF 酸处理后得到的残余物(小岩石颗粒)储存在封闭且有水的烧杯里 1 ~ 2 个星期,连续重复上述步骤,直到样品全部溶解完;③加浓的 HCl 酸热溶液处理,去除放射虫表面金属氧化物玷污,至放射虫用肉眼看呈白色;用抗絮凝剂(焦磷酸钠)溶液(20 g/L),加热至 80 ~ 100 °C,去除放射虫表面的粘土物质;④使用 63 μm 和 350 μm 孔径的筛子,轻柔地筛洗清洁后的放射虫;⑤把清洗后的放射虫倒在装有滤纸的漏斗上过滤,在凉干前用丙酮或乙醇等挥发性溶剂淋洗;⑥在显微镜下对酸处理后的残余物里的放射虫进行统计和挑选。取 1/*n* 样品均匀撒在玻璃板上,在 Olympus BX50 生物显微镜下逐行鉴定和统计;⑦每板样品中每个属种的个体数量 *m* 及所有属种的个体总数量 *M*。该样品放射虫的丰度即为 *nM*/样品重量,单位为个/g。

根据放射虫和硅质海绵骨针的实验室分析结果,不难看出生物成因硅质纵向具备明显的差异性特征,生物成因硅质主要发育于海侵期,早期高位和晚期高位时期发育程度明显降低(图 2b)。

2.2 黄铁矿纵向非均质性特征

2.2.1 发育程度

五峰组-龙马溪组含气页岩段沉积时期,涪陵地区主体为安静的深水陆棚沉积环境,地层中黄铁矿较为发育,全岩 X-衍射实验结果表明,含气页岩段黄铁矿发育程度在纵向上具备较大的差异性,总体上自上而下黄铁矿发育程度逐渐增加,具备“三段式”特征。

海侵期页岩地层中黄铁矿发育程度最高,黄铁矿含量一般介于 4.0% ~ 6.5% (重量比),早期高位域时期发育程度有所降低,黄铁矿含量一般介于 2% ~ 4%;晚期高位域时期黄铁矿发育程度最低一般介于 1.0% ~ 2.5%。

2.2.2 产状及成因变化特征

岩心观察结果显示海侵期岩心肉眼难以识别出黄铁矿,借助于放大镜可观察到部分星散状黄铁矿;早期高位和晚期高位页岩岩心上发育团块状和纹层状黄铁矿,但相比较而言,早期高位岩心团块状黄铁矿较晚期高位更为发育。扫描电镜观察结果表明整个含气页岩段发育草莓状黄铁矿,纵向上自下而上草莓状黄铁矿逐渐趋于发育,他形晶为主,含少量自形晶,粒径多集中在 5 μm 左右。

根据成因,黄铁矿可分为原生黄铁矿和次生黄铁矿,原生黄铁矿形成于沉积物沉积时期,主要形成于硫

化还原或富铁还原环境,具有较高的生长速率,形成的黄铁矿快速沉降到海底,由于海底缺乏单质硫的供给,使得他们不能进一步生长,从而具备较小的直径^[2-3];次生黄铁矿形成于水岩界面之下的还原环境,与沉积水体的沉积环境无关,具备较慢的生长速率和较长的生长时间,从而个体较大^[4-5]。

Wilkin 等^[3]提出硫化还原(原生黄铁矿)和氧化环境(次生黄铁矿)沉积的草莓状黄铁矿的平均粒径分别为 $5.0\mu\text{m} \pm 1.7\mu\text{m}$ 和 $7.7\mu\text{m} \pm 4.1\mu\text{m}$,在研究分析了现代海洋沉积物和沉积岩中草莓状黄铁矿之后,他们认为硫化环境或还原环境下形成的草莓状黄铁矿(原生)仅有 4% 的草莓状黄铁矿颗粒粒径会大于 10 μm,而氧化环境下水岩界面之下形成的草莓状黄铁矿有 10% ~ 50% 粒径超过 10 μm。

Wignall 等^[4]认为草莓状黄铁矿的最大黄铁矿直径(MFD)可以较好的区分草莓状黄铁矿的成因(硫化还原环境形成的原生黄铁矿或氧化环境水岩界面之下形成的次生黄铁矿),一般硫化还原环境下形成的草莓状黄铁矿的 MFD 一般小于 20 μm,而氧化-次氧化环境水岩界面下形成的草莓状黄铁矿一般大于 20 μm^[4-8]。

图 4 为根据涪陵地区五峰组-龙马溪组含气页岩段草莓状黄铁矿粒径概率统计结果编制的 Box-whisker 图,图中长条盒子包括了 $Q = 25\%$ 到 $Q = 75\%$ (Q 为分布百分数的概率)的粒径范围,草莓状黄铁矿粒径主要集中在 3 ~ 6 μm 要集范围内,盒子中的红色实线代表了 $Q = 50\%$ 中值粒径,多集中在 4 ~ 5 μm 集中范围内。图中长实线代表了所有粒径的分布范围,也表示了最小和最大的粒径值,图中显示草莓状黄铁矿最大粒径多小于 20 μm 显示。由统计结果可以看出涪陵地区五峰组-龙马溪组含气页岩段草莓状黄铁矿主要为还原环境条件下的原生黄铁矿。

结合全岩分析结果不难看出,涪陵地区五峰组-龙马溪组含气页岩段黄铁矿在发育程度及成因上均具备纵向差异性特征,其中海侵期黄铁矿最为发育,以还原条件下原生黄铁矿为主;早期高位域时期黄铁矿发育程度有所降低,兼有原生和次生成因;晚期高位域时期黄铁矿发育程度最低,兼有原生和次生成因。

2.3 沉积构造纵向非均质性特征

1) 海侵期(①—④小层)

岩心观察结果表明涪陵地区五峰组-龙马溪组含气页岩段海侵期页岩岩心发育页理,岩心出筒后常断裂成千层饼状,见灰白色粉砂质细纹层,纹层宽 0.1 mm 左右。

2) 早期高位域(⑤—⑧小层)

早期高位域时期,发育灰白色粉砂质粗纹层,纹层

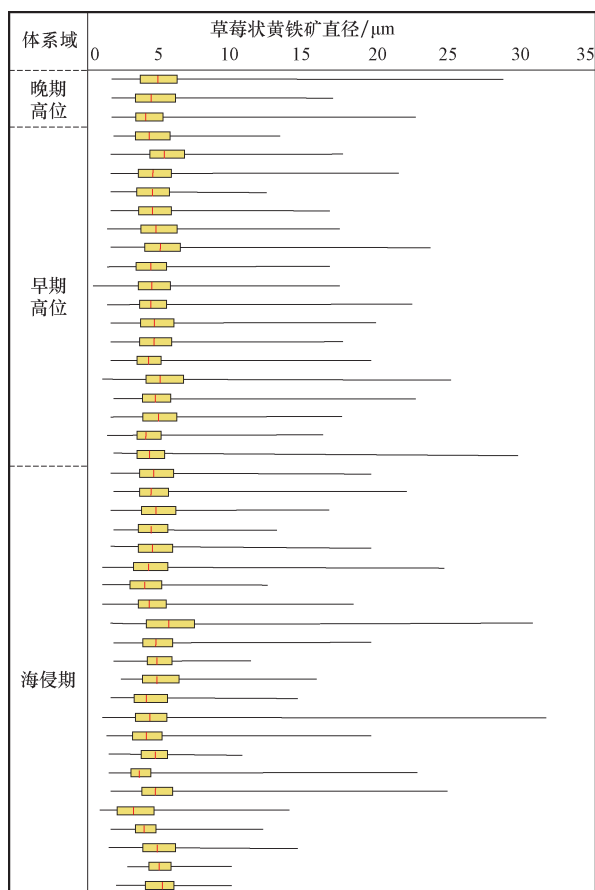


图 4 涪陵地区五峰组 - 龙马溪组含气页岩段黄铁矿粒径 Box-whisker 图

Fig. 4 Box-Whisker diagram of grain sizes of pyrites in the gas shales of the Wufeng-Longmaxi Fms, Fuling area

宽 0.1 ~ 1 mm, 发育小型波状、透镜状砂纹层理, 另外笔石化石见微弱定向型排列特征, 表明该时期沉积水体具备一定的水动力条件。

3) 晚期高位域(⑨)小层

晚期高位域时期, 主体为灰黑色含炭质粉砂质页岩, 夹泥质粉砂岩条带和泥质碎屑灰岩条带, 另在薄片下可观察到泥岩碎屑呈透镜状顺层分布, 表明该时期沉积水体具备了一定的水动力条件。

2.4 有机质丰度纵向非均质性特征

实测 TOC 的分析结果表明: 涪陵地区五峰组 - 龙马溪组含气页岩段 TOC 自下而上呈现逐渐降低的趋势, 具备明显的三段式特征, 其中海侵期 TOC 介于 2.0% ~ 5.0%, 平均为 3.5%, TOC 在整个含气页岩段中最高, 其次为早期高位域时期, TOC 一般介于 1.5% ~ 3.0%, 平均为 2.0%; 晚期高位域时期, TOC 一般为 1% 左右, 在整个含气页岩段中 TOC 最低。

总体来看, 涪陵地区五峰组 - 龙马溪组含气页岩段发育了一套富碳、富硅页岩, 页岩原生品质(岩矿、沉积构造、有机质丰度等)在纵向上具备较强非均质性特

征, 均表现出较为明显的“三段式”特征, 而页岩原生品质的纵向非均质性直接控制了页岩储层的储集能力、含气性及可改造性, 从而对页岩气的富集、高产产生了至关重要的影响, 因此, 厘清页岩纵向非均质性形成机理, 对于邻区的页岩气勘探开发地质评价工作具备良好的指导和借鉴作用。

2.5 宏观非均质性耦合关系

涪陵地区五峰组 - 龙马溪组含气页岩段沉积时期总体可划分为海侵期、早期高位和晚期高位 3 个时期, 页岩纵向上具备较强的非均质性特征。海侵期, 有机质丰度高、硅质含量高(生物成因硅质为主, 含部分陆源粉砂)、粘土矿物含量低, 页理发育、沉积成因的自生黄铁矿发育程度高, TOC 与硅质含量呈现明显的正相关关系, 相关系数达到了 0.78, 总体来看, 海侵期发育了一套富碳、富硅、富页理、富黄铁矿的优质页岩。

早期高位域时期, 有机质发育程度降低, 硅质含量有所降低(以陆源粉砂为主), 发育粉砂质纹层, 沉积成因的自生黄铁矿发育程度有所降低, TOC 与硅质含量之间不具备相关性。

晚期高位域时期, 有机质发育程度低, 硅质含量较早期高位域时期略有降低, 发育页理, 沉积成因的自生黄铁矿发育程度在整个含气页岩段中最低, TOC 与硅质含量之间不具备相关性。

3 页岩纵向非均质性发育主控因素

本次研究我们重点从古生产力、沉积环境和沉积作用入手对页岩纵向非均质性的形成机理进行了研究, 建立了涪陵地区五峰组 - 龙马溪组含气页岩段的纵向沉积演化模式, 明确了含气页岩段纵向非均质性的发育主控因素。

3.1 沉积作用

3.1.1 沉积速率

根据涪陵地区五峰组 - 龙马溪组含气页岩段笔石带的划分对比结果(图 1), 对比地质年代数据, 我们粗略地计算了涪陵地区五峰组 - 龙马溪组含气页岩段的沉积速率, 从纵向上来看, 海侵期对应 *Dicellograptus sichuanensis* 带(四川叉笔石带)到 *Pristiograptus leei*—*Petalolithus* 带(李氏锯笔石 - 花瓣笔石带), 大体相当于 Katian(凯迪阶) — Rhuddanian(鲁丹阶)^[9], 沉积时限约为 6.85 Ma, 沉积速率约为 5.84 m/Ma, 早期高位和晚期高位域时期对应 *Demirastrites convolutes*(盘旋半耙笔石带) — *Oktavites commanis*(通常奥氏笔石带), 大体相当于 Aeronian(埃隆介)早期, 沉积时限约 2.03

Ma, 沉积速率约为 29.56 m/Ma。从沉积速率上来看, 海侵期沉积速率明显低于高位域时期。

3.1.2 陆源供给量

从主量元素分析结果来看, 陆源元素 Al 和 Ti 自下而上呈现逐渐增加的趋势(图 5), 反映了陆源供给量自下而上呈现了逐渐加快的趋势。海侵期, 受海平面上升的影响, 河流入海量受到抑制, 陆源供给量低, 供给量少; 早期高位域时期, 河流入海量得到一定恢复, 陆源供给量有所升高, 供给量较海侵期有所增加, 晚期高位域时期, 河流入海量进一步增加, 陆源细粒沉积物供给量进一步增加。总体来看, 陆源供给量的纵向变化特征与沉积速率的纵向变化特征相互吻合。

3.1.3 底流沉积作用

深水环境中的沉积动力学机制及沉积体系与陆相和浅水环境有较大不同, 重力流和底流是深水环境中主导性的沉积机制, 底流的含义比较宽泛, 包含温盐差异底流, 风力驱动环流, 海湾流、内波内潮汐等多种成因所导致的深水流体^[10]。其中最为典型的是等深流沉积, 等深流是底流的一种重要类型, 水体深部或底部由于地球自转而导致温盐差异环流^[11], 流线与海底深度等值线近似平行(即顺斜坡走向), 通常称之为“等深流”。

涪陵地区早期高位域时期具备典型的等深流沉积特征, 岩心发育小型波纹层理和透镜状层理, 笔石化石呈现定向排列等, 底流(等深流)沉积作用在早期高位域沉积时期起到了主导性作用。

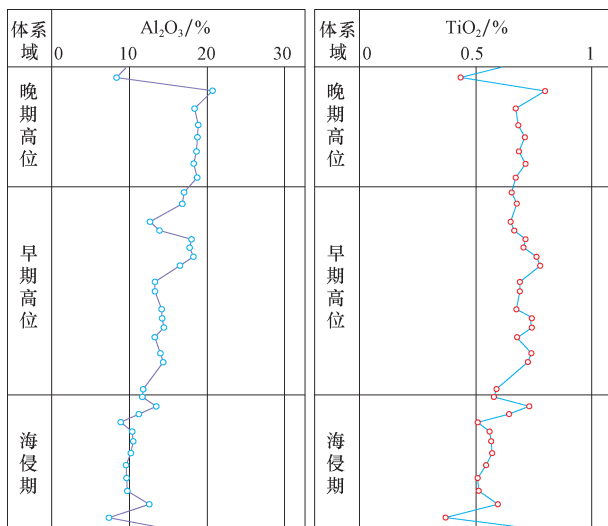


图5 涪陵地区五峰组-龙马溪组含气页岩段陆源元素纵向分布

Fig. 5 Vertical distribution of terrigenous Al_2O_3 and TiO_2 in the gas shales of the Wufeng-Longmaxi Fms, Fuling area

3.2 古海洋生产力

许多研究者认为在海相沉积中水体的生物生产力是控制沉积物中有机碳丰度的最重要因素^[12-14], 海洋表层生产力是指在单位时间内, 单位面积的表层海水中, 由于生物光合作用所进行的无机碳向有机碳所转变的量, 其生产是全球碳循环的重要环节^[15]。目前表征古海洋生产力的替代指标包括地球化学指标、生物沉积物指标和古生物指标等^[16]。

3.2.1 地球化学指标

Piper 等^[17]对 Carico 盆地的沉积物和 Meade Peak 的页岩研究后认为 Cu, Ni, Zn 在剔除陆源的影响后(即进行 Ti 或者 Al 校正, 校正公式为: $X_{xs} = X_{total} - Ti_{total} \times X_{PASS}/Ti_{PASS}$)可以很好地表征还原环境下古海洋生产力的变化。从涪陵地区 Cu_{xs} , Ni_{xs} , Zn_{xs} 的分析结果来看, 五峰组-龙马溪组含气页岩段的古海洋生产力具备由海侵体系域较高, 向早期高位体系域和晚期高位体系与逐渐降低的趋势, 其变化趋势与有机碳含量之间具有较为一致的对对应关系(图 6)。

3.2.2 生物成因硅指标

近年来研究表明, 越来越多的证据表明, 硅质骨骼类生物在全球碳循环系统中起到了较大的作用, 可表征古海洋生产力的演化特征^[18-22], 通过对涪陵地区五峰组-龙马溪组含气页岩段生物成因硅(包括放射虫和硅质海绵)的定量统计, 五峰组-龙马溪组含气页岩段硅质骨骼类生物生产力与同步分析的地球化学生产力(TOC)指标具有基本一致的变化特征(硅质含量与 TOC 之间呈现明显的正相关关系, 相关系数达 0.78), 即海侵体系域时期古海洋生产力高, 高位域时期古海洋生产力降低。

从上述研究不难看出, 古海洋生产力对涪陵地区五峰组-龙马溪组含气页岩段的有机碳和生物成因硅质的同步富集具备重要的控制作用, 较高的古海洋生产力利于硅质骨骼类生物化石(放射虫和硅质海绵)的发育, 硅质骨骼类生物的发育也为有机碳的富集提供了重要的来源。

3.3 氧化-还原环境

目前国内外对于古水体的氧化还原性研究, 主要借助于地球化学, 另外对沉积成因的自生黄铁矿的发育程度也是研究古水体氧化-还原环境的重要辅助手段。

3.3.1 地球化学指标

Hatch 等对北美堪萨斯州上宾西法尼亚系黑色页岩

的研究表明: $w(V)/w(V+Ni)$ 值能有效反映环境氧化-还原条件^[23], 高的 $w(V)/w(V+Ni)$ 值 (0.84 ~ 0.89) 反映水体分层, 底层水体中出现 H_2S 的厌氧环境; 中等比值 (0.54 ~ 0.82) 为水体分层不强烈的厌氧环境 (水体溶氧量 < 0.1 mL/L); 低值时 (0.45 ~ 0.60) 为水体分层弱的贫氧环境 (水体溶氧量 $0.1 \sim 1$ mL/L), 当该比值小于 0.45 时为富氧环境 (水体溶氧量 > 1 mL/L)。

Jones 等指出在判别古氧相时微量元素比值 V/Cr , Ni/Co 和 U/Th 最可靠^[24]。 V/Cr 比值大于 4.25 为厌氧环境, V/Cr 比值在 2.00 ~ 4.25 为贫氧环境, V/Cr

比值小于 2.00 为富氧环境。 Ni/Co 比值大于 7.00 为厌氧环境, Ni/Co 比值在 5.00 ~ 7.00 为贫氧环境, Ni/Co 比值小于 5.00 为富氧环境。 U/Th 比值大于 1.25 为厌氧环境, U/Th 比值在 0.75 ~ 0.25 为贫氧环境, U/Th 比值小于 0.75 为富氧环境。

从涪陵地区五峰组-龙马溪组含气页岩段微量元素分析结果来看, 古水体的氧化-还原性的纵向上具备明显的阶段式变化特征, 其中海侵期水体还原性强, 为贫氧-厌氧的还原-强还原环境, 高位域时期水体还原性减弱, 为弱氧化-还原环境 (图 7)。

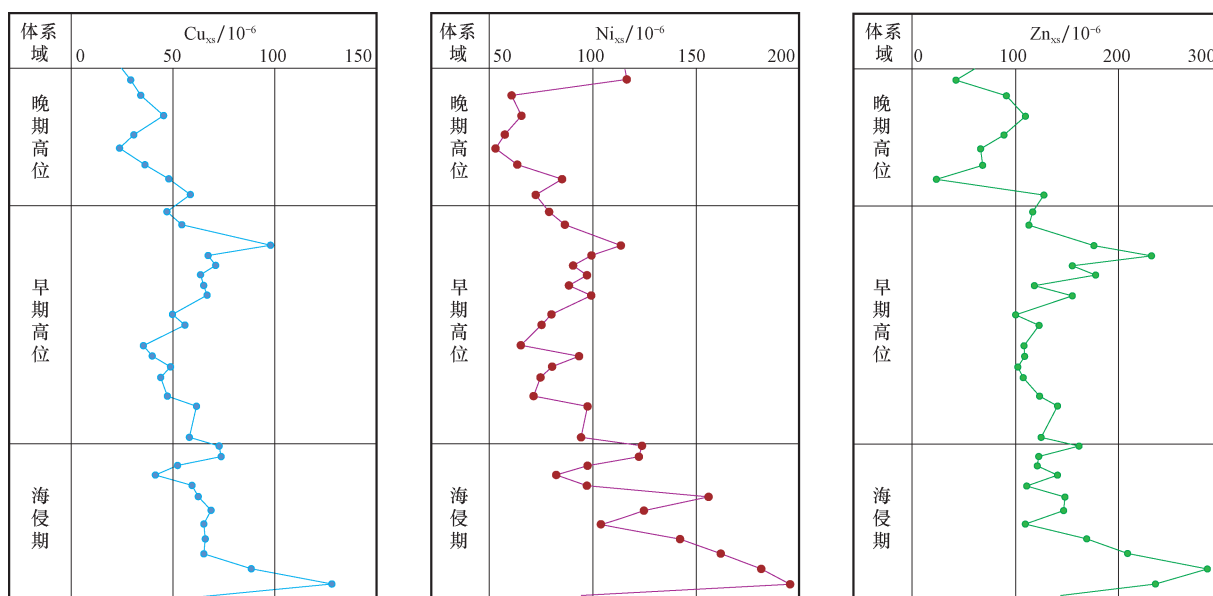


图6 涪陵地区五峰组-龙马溪组含气页岩段古海洋生产力演化

Fig. 6 Calibrated contents of Cu, Ni, and Zn in the gas shales, showing productivity of paleo-ocean during deposition of the Wufeng-Longmaxi Fms in Fuling area

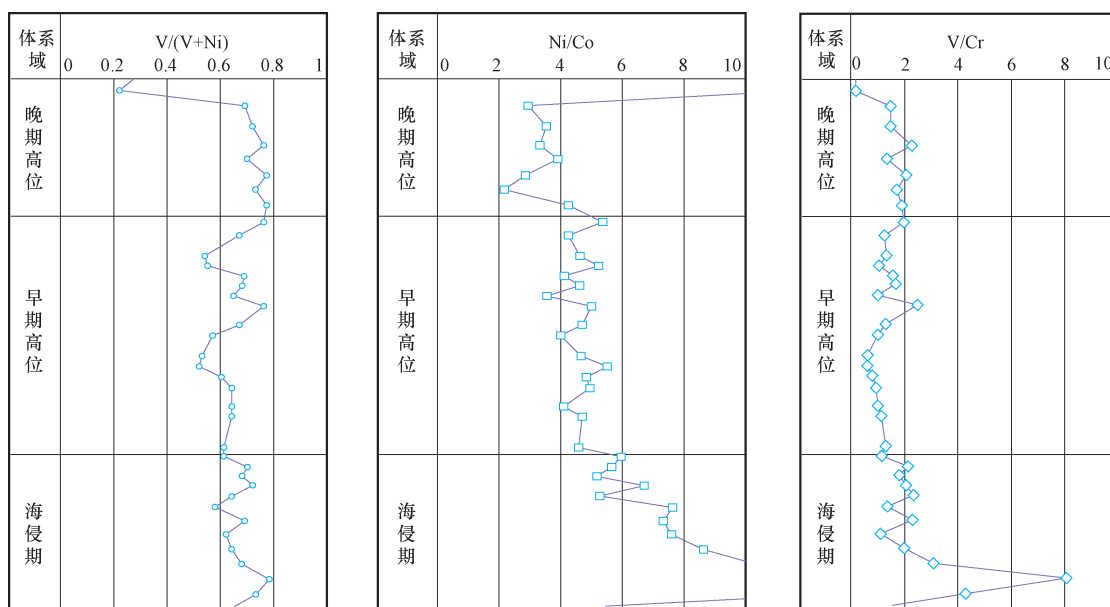


图7 涪陵地区五峰组-龙马溪组含气页岩段古海洋水体氧化还原性纵向演化

Fig. 7 $V/(V+Ni)$, Ni/Co and V/Cr in the gas shales, showing redox conditions of paleo-ocean water during the deposition of the Wufeng-Longmaxi Fms in Fuling area

3.3.2 沉积成因自生黄铁矿

前面已经阐述了涪陵地区五峰-龙马溪组含气页岩段黄铁矿的发育特征,其中海侵期沉积成因的原生黄铁矿最为发育,高位域时期的沉积成因原生黄铁矿发育程度有所降低,从沉积成因的原生黄铁矿发育程度来看,反映了古水体的还原性的纵向演化特征与地球化学元素所反映的特征一致:均表现为海侵期古水体还原性强,高位域时期古水体还原性有所减弱。

3.4 页岩纵向非均质性主控因素综合分析

从前述分析可以看出古生产力、古水体氧化还原性、陆源供给量(海平面升降)、底流沉积作用是导致涪陵地区五峰组-龙马溪组含气页岩纵向非均质性的主要控制因素。

3.4.1 海侵期(①—④小层)

海侵期,受海平面上升的影响,陆源沉积物供给量低(主要以粘土为主),沉积速率低,海洋表层具备蓬勃的古生产力,海底发育强还原性沉积环境,总体来看,海侵期为生物主控沉积阶段。蓬勃的古生产力使得水体中发育大量的浮游类生物(包括硅质骨骼类生物),为有机质的和自生硅质的富集提供了重要来源,同时硅质骨骼类生物的发育在提供自生硅质的同时,也成为沉积有机碳的重要来源,从而导致了该时期页岩有机碳含量与硅质含量之间呈现显著的正相关耦合关系;另外较低的陆源供给速率和安静的水体利于页理的发育,最终导致了涪陵地区在该时期发育了一套富碳、富硅、富黄铁矿、富页理的页岩。

3.4.2 早期高位域(⑤—⑧小层)

早期高位域时期,海平面由最高点开始缓慢下降,陆源输入量开始增加,但此时陆源供给沉积物仍以细粒粘土质为主,同时由于该时期古生产力有所降低,生物化学沉积作用明显降低,因此,该时期底流沉积作用起到了主导作用。受底流沉积作用的影响,陆源粉砂质含量有所增加,地层沉积速率加快;同时受底流沉积作用的影响,深层水动力活动明显增加,深层水体含氧量也随之显著增加,由海侵期的强还原环境转变为弱还原沉积环境,因此该时期沉积成因的自生黄铁矿含量较海侵期有所降低,有机质丰度和硅质含量(包括陆源粉砂和生物成因硅质)较海侵期均有所降低。

3.4.3 晚期高位域(⑨小层)

晚期高位域时期,陆源输入量进一步增加,以细粒粘土质为主,表层水体古生产力进入衰落期,因此该时

期为陆源主控沉积阶段。该时期,由于涪陵地区处于深水沉积环境,陆源粉砂供给量低,加上古生产力低下,无生物成因硅质补充,因此页岩地层中粘土矿物含量较早期高位域时期有明显增加,硅质含量明显降低。从古水体的氧化还原性来看,底层水体的含氧量与早期高位域时期大体相当,仍为弱还原沉积环境,但是表层水体古生产力的显著降低直接导致了有机质供给量显著降低,从而造成了该时期沉积页岩的有机质丰度较此前显著下降。

4 结论

1) 涪陵地区五峰组-龙马溪组含气页岩段岩矿、沉积构造、地化等方面纵向具备较强的非均质性特征,海侵期(①—④小层)发育自生硅质,页理发育,TOC含量高,TOC与硅质之间呈现特殊的正相关耦合关系,主要发育沉积成因的自生黄铁矿;早期高位域时期(⑤—⑧小层)发育陆源粉砂,发育小型波纹层理、透镜状层理,粘土质含量较海侵期有所增加,TOC含量中等,兼有沉积成因的自生黄铁矿和后期次生黄铁矿;晚期高位域时期(⑨小层),粘土质含量进一步增加,粉砂质含量减少,TOC含量低,兼有沉积成因的自生黄铁矿和后期次生黄铁矿。

2) 海平面升降、陆源输入量、古生产力、底流沉积作用、底层水体的氧化还原环境共同控制了页岩纵向非均质性的发育特征,海侵期(①—④小层),受海平面上升的影响,陆源输入量减少,沉积速率低,表层水体蓬勃的古生产力使得生物化学沉积作用成为该时期的主导,加上当时底层水体强还原的沉积环境,使得海侵期发育了一套富碳、富硅、富页理、富黄铁矿(沉积成因的自生黄铁矿)的优质页岩。早期高位(⑤—⑧小层)海平面由最高点开始缓慢下降,陆源输入量有所增加,但由于研究区处于深水陆棚沉积区,陆源供给物仍以粘土质为主,该时期表层海水的古生产力有所下降,而底流沉积作用明显,成为了该时期的主导,底流沉积作用的存在导致底层水体的还原性较海侵期弱,同时导致沉积速率加快,因此,早期高位域时期硅质以陆源粉砂为主,发育小型波纹层理和透镜状层理,与海侵期相比,硅质含量有所降低,TOC有所下降,沉积成因的自生黄铁矿含量亦有所降低。晚期高位域时期(⑨小层),海平面进一步下降,陆源输入量进一步增加,但由于所处的深水沉积位置,陆源输入沉积物仍以细粒粘土质为主,该时期表层水体的古生产力进入衰落期,底层水体为弱氧化-还原性沉积环境,因此,该时期为陆源主控沉积阶段,粘土矿物含量在整个含气页岩段中最高,硅质以陆源粉砂为主;在整个含气页岩段中最

低, *TOC* 含量亦为最低, 发育原生和次生成因黄铁矿, 沉积成因的自生黄铁矿发育程度较海侵期有所降低。

参 考 文 献

- [1] 王志刚. 涪陵页岩气勘探开发重大突破与启示[J]. 石油与天然气地质, 2015, 36(1): 1–6.
Wang Zhigang. Breakthrough of Fuling shale gas exploration and development and its inspiration[J]. Oil & Gas Geology, 2015, 36(1): 1–6.
- [2] 张金川, 聂海宽, 徐波, 等. 四川盆地页岩气成藏地质条件[J]. 天然气工业, 2008, 28(2): 151–156.
Zhang Jinchuan, Niehaikuan, Xu Bo, et al. Geological condition of shale gas accumulation in Sichuan basin[J]. Natural Gas Industry, 2008, 28(2): 151–156.
- [3] 朱彤, 王烽, 俞俊杰, 等. 四川盆地页岩气富集控制因素及类型[J]. 石油与天然气地质, 2016, 37(2): 399–407.
Zhu Tong, Wang Feng, Yu Lingjie, et al. Controlling factors and types of shale gas enrichment in the Sichuan Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2016, 37(2): 399–407.
- [4] Wikin R T, Arthur M A, Dean W E. History of water-column anoxia in the Black Sea indicated by pyrite framboid size distributions[J]. Earth and Planetary Science Letters, 1997, 148(3/4): 517–525.
- [5] Wikin R T, Barnes H L, Brantley S L. The size distribution of framboidal pyrite in modern sediments: An indicator of redox conditions[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1996, 60(20): 3897–3912.
- [6] Wignall P B, Newton R, Brookfield M E. Pyrite framboid diameter as a measure of oxygen deficiency in ancient mudrocks[J]. American Journal of Science, 1998, 298(7): 537–552.
- [7] Winkin R T, Arthur M A. Variations in pyrite texture sulfur isotope composition and iron systematics in the Black Sea: Evidence for Late Pleistocene to Holocene excursions of the $O_2 - H_2S$ redox transition[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2001, 65(9): 1399–1416.
- [8] Nielsen J K, Shen Y. Evidence for sulfidic deep water during the Late Permian in East Greenland Basin[J]. Geology, 2004, 32(12): 1037–1040.
- [9] 穆恩之, 李积金, 葛梅钰, 等. 中国笔石[M]. 北京: 科学出版社, 2002, 4–8.
Muenzhi, Lijijin, Gemeiyu, et al. Chinese graptolite[M]. Beijing: The Science Publishing Company, 2002, 4–8.
- [10] Shanmugam G. Deep-marine tidal bottom currents and their reworked sands in modern and ancient submarine canyons[J]. Marine and Petroleum Geology, 2003, 20: 471–491.
- [11] Shanmugam G. 50 years of the turbidite paradigm (1950s ~ 1990s) deep-water processes and facies models—a critical perspective[J]. Marine and Petroleum Geology, 2000, 17: 285–342.
- [12] Huerta-Diaz M A, Morse J W. A quantitative method for determination of trace metal concentrations in sedimentary pyrite[J]. Marine Chemistry, 1990, 29: 119–144.
- [13] Huerta-Diaz M A, Morse J W. Pyritisation of trace metals in anoxic marine sediments[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1992, 56: 2681–2702.
- [14] Morse J W, Luther III G W. Chemical influences on trace metal-sulfide interactions in anoxic sediments[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1999, 63: 3373–3378.
- [15] 苏纪兰, 李炎, 王启. 我国 21 世纪初海洋科学研究中的若干重要问题[J]. 地球科学进展, 2001, 16(5): 658–663.
Su Jilan, Li Yan, Wang Qi. Some important research topics for China sciences in the early 21st century[J]. Advance In Earth Science, 2001, 16(5): 658–663.
- [16] 黄永建, 王成善, 汪云亮. 古海洋生产力指标研究进展[J]. 地学前缘, 2005, 12(2): 163–168.
Huang Yongjian, Wang Chengshan, Wang Yunliang. Progress in the study of proxies of paleocean productivity[J]. Earth Science Frontiers, 2005, 12(2): 163–168.
- [17] Piper D Z, Perkins R B. A modern vs. Permian black shale—the hydrography, primary productivity and water-column chemistry of deposition[J]. Chemical Geology, 2004, 206: 177–197.
- [18] 贾国东, 葛知潜, 彭平安, 等. 南海南部 17962 柱状样生物硅沉积记录及其古海洋意义[J]. 地球化学, 2009, 29(3): 293–296.
Jia Guodong, Jian Zhimin, Peng Pingan, et al. Biogenic silica records in core 17962 from southern south China sea and their relation to paleoenvironmental events[J]. Geochimica, 2009, 29(3): 293–296.
- [19] Dickens G R, Barron J A. A rapidly deposited pennate diatom ooze in Upper Miocene-Lower Pliocene sediment beneath the North Pacific Polar front[J]. Marine Micropaleontology, 1997, 31: 177–182.
- [20] 李建如, 王汝建, 李保华. 南海南部 12Ma 以来的蛋白石堆积速率与古生产力变化[J]. 科学通报, 2002, 47(3): 235–237.
Li Jianru, Wang Rujian, Li Baohua. The opal accumulation and paleo productivity change since 12Ma in southern south China sea[J]. Chinese Science Bulletin, 2002, 47(3): 235–237.
- [21] Barcena M A, Cacho I, Abrabtes F, et al. Palaeoproductivity at the Antarctic continental margin: opal and barium records for the last 400ka[J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 1998, 139: 195–211.
- [22] 胡广, 刘文汇, 腾格尔, 等. 塔里木盆地寒武统泥质烃源岩成烃生物组合的构造-沉积环境控制因素[J]. 石油与天然气地质, 2014, 35(5): 685–695.
Hu Guang, Liu Wenhui, Tengger, et al. Tectonic-sedimentary constraints for hydrocarbon generating organism assemblage in the Lower Cambrian argillaceous source rocks, Tarim Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2014, 35(5): 685–695.
- [23] Hatch J R, Leventhal J S. Relationship between inferred redox potential of the depositional environment and geochemistry of the Upper Pennsylvanian(Missourian) Stark Shale Member of the Dennis Limestone, Wabaunsee County Kansas, USA[J]. Chemical Geology, 1992, 99: 65–82.
- [24] Bryn Jones David A C. Manning Comparison of geochemical indices used for the interpretation of palaeoredox conditions in ancient mudstones[J]. Chemical Geology, 1994, 111: 111–129.

(编辑 张亚雄)