

## 页岩层序划分的界面沉积标志及地球化学指示

魏琳<sup>1,4</sup>, 许文国<sup>2</sup>, 杨仓<sup>3</sup>, 黄一舟<sup>4</sup>, 王乾右<sup>4</sup>, 王兴龙<sup>5</sup>

[1. 中国石油大学(北京)油气资源与探测国家重点实验室, 北京 102249; 2. 中国石化胜利油田分公司西部新区研究院, 山东 东营 257000; 3. 中国石油尼罗河公司, 北京 100034; 4. 中国石油大学(北京)非常规天然气研究院, 北京 102249; 5. 中海油研究院, 北京 100028]

**摘要:**页岩油气勘探需解决的一个基础核心问题是建立富有机质页岩高精度岩相层序, 准确预测页岩甜点段。受页岩沉积相对连续与特征变化难识别等因素控制, 页岩地层层序关键界面识别难度较大。文章通过国内外文献调研, 结合北美和国内部分页岩沉积储层实例特征, 指出在页岩沉积中的相对较浅区域, 小型冲刷面、低角度的页岩层断面、软质沉积物变形、壳质纹层和冲断构造碎屑等沉积特征的出现是层序边界的重要沉积学指示。对应等时地层中未出现以上明显剥蚀面的连续页岩层沉积, 岩相组合转换面、不同类型滞留沉积物、黄铁矿鲕粒层或磷酸盐结核面, 加之配合指示氧化-还原条件(有机地化参数、无机微量/主量元素等)及有机物/矿物富集变化规律(有机质丰度、沉积物密度、矿物成分含量等)的地球化学指标可综合判断层序边界或最大海泛面。文章结合国内外实例, 详细总结梳理了在测井资料辅助下, 使用沉积学特征和地球化学参数分析判断层序界面的关键问题和理论解释, 提倡在页岩层序地层划分中, 利用钻测井曲线和岩相组合划分三级层序, 并结合使用沉积特征和地球化学参数准确搭建四级及以上高频层序格架。

**关键词:**剥蚀面; 沉积特征; 地球化学; 层序地层学; 海相页岩;

**中图分类号:**TE121.1 **文献标识码:**A

## Sedimentary boundary markers and geochemical indexes of shale sequence stratigraphy

Wei Lin<sup>1,4</sup>, Xu Wenguo<sup>2</sup>, Yang Cang<sup>3</sup>, Huang Yizhou<sup>4</sup>, Wang Qianyou<sup>4</sup>, Wang Xinglong<sup>5</sup>

[1. State Key Laboratory of Petroleum Resources and Prospecting, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China; 2. Research Institute of New District in West China, SINOPEC, Shengli Oilfield Company, Dongying, Shandong 257000, China; 3. CNPC International (Nile) Ltd., Beijing 100034, China; 4. Unconventional Natural Gas Institute, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China; 5. CNOOC Research Institute, Beijing 100028, China]

**Abstract:** One of the key issues in shale oil and gas exploration is to establish a high-precision sequence stratigraphy to accurately predict sweet spots. The relative lithological continuousness and subtle character variations of shale sediments have made it difficult to define key boundaries between sequences. This paper, based on a comprehensive investigation of case studies of shale reservoirs both in the North America and China, suggests that occurrences such as relatively shallow water facies, small scour surface, low-angle shale beds truncation, deformed soft sediments, shelly laminae and thrust clastics in shale, can be viewed as important sedimentary markers of sequence boundaries. For formations without the above-mentioned markers but of the same geological timing, the paper suggests that to recognize the sequence boundaries or the maximum flooding surface, the following proxies and methods should be applied: geochemical indexes such as redox conditions (e. g. organic geochemical parameters, inorganic trace/dominant element ratios) and organic matter/mineral accumulation patterns (e. g. organic matter content, sediment density, and mineral content), combined with observations of lithology facies interfaces, different types of lag deposits, pyrite ooids and phosphate nodules. The paper summarizes the commonly acknowledged sedimentary features and geochemical indexes for sequence stratigraphy division with the help of well-logging data analyses, and proposes that, by using well-logging data, lithofacies combinations, sedimentary features and geochemical pa-

收稿日期:2016-11-15; 修订日期:2017-04-20。

第一作者简介:魏琳(1989—),女,博士、助理研究员,非常规油气地质。E-mail:wei.sherry1989@gmail.com

基金项目:中国石油大学(北京)科研基金项目(2462017YJRC009); 国家科技重大专项(2007ZX05035); 国家自然科学基金重大项目(41690133)。

rameters, it is workable to divide third-order sequences and establish higher order of sequence stratigraphy.

**Key words:** erosion surface, sedimentary feature, geochemistry, sequence stratigraphy, marine shale,

页岩沉积物蕴含着丰富的油气资源。自北美页岩油气勘探不断取得突破以来,近年来国内也形成了涪陵、长宁、威远和鄂尔多斯盆地等4个页岩气主产区,总产能已超过  $70 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}^{[1-2]}$ 。全球非常规油气革命使有关页岩的沉积成因、沉积特征、“甜点”区预测及油气开发技术等方面受到国内外相关专家的广泛关注。

页岩层序地层学研究是页岩油气勘探与开发过程中一项重要的基础性工作,目前尚处于起步阶段。在层序地层学经典理论中,沉积层序分为六个级别,每一级别分别对应不同频率的海平面(陆相为基准面)升降旋回,其中三级层序为基本层序,平均周期约3 Ma<sup>[3-4]</sup>。但此前学者们已在碳酸盐岩中发现了更小尺度的类似基本层序的沉积旋回,认为是 Milankovitch 气候旋回引起的全球海平面高频变化的结果<sup>[3]</sup>。随后, Mitchum 和 Van Wagoner 在硅质碎屑岩中也识别出了类似的小尺度沉积旋回,并提出高频层序的概念,特指具备基本层序特征但周期与四级层序相当的层序地层单元<sup>[4]</sup>。自此,地质家们以极大的热情投入到高频层序研究中,内容涉及其构成特征、成因机制、研究方法以及油气地质意义等诸多方面。

传统层序的划分主要依据的钻井和测井资料、地震反射特征反映出的沉积旋回等方法,但由于精度问题不能有效区分页岩三级层序界面。非均质性极强的页岩高频层序划分不仅有助于了解富有机质页岩的烃源品质特征,而且能够为精细刻画页岩内部变化及其影响因素提供重要的技术手段。页岩层内部三级及以上高频层序的划分是近年的研究热点和争议问题。利用古水深反映的页岩中沉积记录趋势变化以及根据水进-水退所产生的地层叠加样式变化、氧化还原条件变化、生物的变革和突发事件的发生进行页岩层序划分和地层层序格局建立是现阶段最为主要的方法<sup>[5-8]</sup>。对于变化微弱、沉积相对连续的大套页岩来说,上述古水深和水进-水退等现象往往是利用岩心描述、露头分析、镜下薄片观察等方法来判断的,这些高精度资料反映的页岩内部多样的沉积特征和变化规律,结合指示氧化/还原环境的地球化学数据,可以相对准确再现页岩沉积的时空演变,同时对于页岩层序界面及层序内部单元界面划分具有很好的指导作用。文章梳理和总结了页岩层序关键界面识别过程中重要的沉积学特征和地球化学指示标志,分析并讨论了不

同的特征可能揭示的页岩沉积序列变化和地层沉积等时信息,为页岩层序地层格架的建立提供了充分的证据解释。

## 1 页岩层序地层研究现状

层序是一套相对整合的、成因上有联系的、以不整合和可以与之对比的整合为界的地层序列<sup>[9]</sup>。层序划分的关键是层序界面的识别,可用于确定层序的界面包括层序的顶、底界面、初始海泛面和最大海泛面<sup>[10]</sup>等。变化微弱、沉积相对连续的大套页岩的层序地层划分是近年来的热点讨论,主要集中在页岩层三级或更高级别的高频层序的划分标准和依据。在所有地层层序中,深水体系构成了与同时期海(湖)岸线最远的一个部分,而正是由于其在盆地中的特殊位置,深水体系也是最难用层序地层学概念解释的沉积体系之一。由于页岩的深水与安静沉积环境的特殊性,传统层序界面划分中“不整合和与之对应的整合”的定义,对于页岩层内部层序划分来说,是寻找传统定义中的“整合面”中的小型剥蚀面和沉积间断面对应的等时地层做为层序边界。另一个是在古水深和氧化/还原条件的变化反映的页岩沉积记录中寻找最大海泛面,结合起来进行页岩层序划分和地层层序格局的建立。

在北美的页岩层序研究中,以 Schieber 对 Chattanooga 页岩<sup>[11]</sup>, Abouelresh 和 Slatt 对 Barnett 页岩<sup>[5-6]</sup>, 以及 Smith 和 Bustin 对 Bakken 页岩<sup>[7]</sup>的三级至四级层序研究为代表,划分主要依据为沉积边界特征分析,辅助地化参数证据,如生物标记化合物、微量元素、稀土元素和孢粉组合等。在国内,近年来黎茂稳及其研究团队对济阳拗陷沙三下和沙四上亚段<sup>[12-13]</sup>页岩,以及陆永潮的研究团队对南方五峰组-龙马溪组的海相页岩<sup>[14-16]</sup>层序划分进行了大量的研究工作。层序划分依据侧重在测井数据结合页岩岩相、有机和无机地化参数分析。

总体来说,页岩层序关键界面在识别过程中应该从岩石整体的相变入手。页岩颗粒对于相对海平面的变化响应并不明显,层序界面的表现通常非常微弱,确立界面的识别标志非常重要。在水深相对浅时,沉积物表现为砂泥比增大,沉积速率变快,生物扰动减少,震荡波痕增多。深水区域速率减慢,有机物在还原条

件下利于保存,会形成生物骨架和外壳的富集层。同时富集自生矿物,例如磷酸盐,黄铁矿和海绿石<sup>[5-6]</sup>,是凝缩层发育的最佳相带,因此有机化石和油页岩的密集发育带被认为是可容纳空间增加的转折点,代表一次洪泛面或者最大洪泛面,但是对于有机化石和油页岩不发育的深水层序,寻找层序界面则成为一道难题。

针对在平静的高水位时期或构造较稳定的深水环境沉积大套的暗色泥岩,精细区分次级层序比较困难,有机物的丰度和保存时的氧气条件随体系域变化特征关系是确立最大海泛面和层序边界的重要依据。在结合以往岩性组合分析手段基础上,研究者多采用沉积岩密度、微量元素、粘土和脆性矿物组合变化特征和有机地球化学参数综合分析等手段用于深水层序研究,取得了不错的效果<sup>[17-20]</sup>。

## 2 页岩层序界面沉积学识别特征

深水泥岩由粘土矿物颗粒组成,泥岩中的有机质和粘土矿物可以有效地富集放射性元素,每期准层序底部、海平面迅速上升至最大海泛面,长期继而沉积形成有机质富集程度较高,对应着伽马值突然增加出现坎值,自然电位和密度测井曲线坎值一般也对应着每期准层序底部。测井特征是目下页岩层序划分最直接、简易的参考依据。当测井曲线由于精度问题不能有效区分页岩三级及以上层序界面时,可依据沉积岩相特征及地球化学指标进行划分判断,这两方面的特征也是本文的讨论重点。

页岩剥蚀面的出现指示了波浪重新改造作用和侵蚀事件的发生,是层序边界的直接沉积学证据。然而,针对在平静的较高水位时期或构造较稳定的深水环境沉积的等时泥岩层,直接的小型剥蚀或改造面证据并不明显,可根据以下特征识别层序边界:①岩相组合转换面<sup>[7,20]</sup>;②砂质、粉砂质或者黄铁矿的滞留沉积物的有机岩石学比对<sup>[11,18-20]</sup>;③黄铁矿鲕粒沉积的出现<sup>[21-23]</sup>;同时,磷酸盐结核的出现也指示着最大洪泛面的出现<sup>[24-30]</sup>。这些沉积学证据与地球物理测井数据的结合使用,可以提供可靠的层序分层依据。

### 2.1 层序边界的沉积学特征

#### 2.1.1 剥蚀面

不同级别的层序剥蚀面规模有所不同。在页岩中三级层序的剥蚀面通常表现为突变的不规则界面,常

伴随砂质-粉砂质的滞留沉积物,规模一般在25~60 mm。四级层序(准层序级别)的剥蚀面代表了海平面升降造成的环境能量和沉积物供给的变化,规模一般在8~20 mm。五级层序(事件级别)的剥蚀面反映了小规模或者短时间的剥蚀事件,规模一般小于5 mm<sup>[31]</sup>。

剥蚀面的沉积学特征包括:①小型的基底冲刷面(图1a)<sup>[31]</sup>;②低角度的页岩层断面(图1b)<sup>[20]</sup>;③在界面的下覆页岩层出现软质沉积物变形<sup>[22]</sup>(图1c);④壳质纹层(图1d),通常指的是富集的、破碎脱落的壳质生物层<sup>[31]</sup>,包括方解石填充的双壳类、苔藓虫、腕足类、软体动物和棘皮动物等;⑤冲断构造碎屑(图1e,f)<sup>[31]</sup>,指的是泥质块状构造。这些块状构造碎屑没有内部结构,被搬运过来悬浮在底流中,当搬运速度降低时沉降下来。这些沉积特征的出现指示着由于海平面的下降,海浪对早期沉积的黑色页岩有重新改造和侵蚀作用,反映了浅水与浪基面以下的沉积环境。

#### 2.1.2 岩相组合转换面

页岩的岩相组合转换面是一种较为实用的判断层序边界的方法。页岩沉积微相在深水陆棚环境中可细分为硅质页岩、富泥硅质页岩、以及泥/硅和富硅泥质页岩<sup>[14-16]</sup>。深水环境下,主要为灰色和深灰色泥岩沉积,部分层段呈现富油页岩层与下部暗色泥岩突变接触,有机化石遗迹或泥质含量忽然增多,说明有机物富集程度增大。可推断原因为水深增大,有机质保存条件变好。因此,富油页岩层底或化石层底界面、岩相从硅质页岩转变为富泥硅质页岩转换面可以作为层序界面<sup>[7,14-15,31]</sup>(图2a—d)。此外,基准面快速上升形成的与黑色泥岩中上下突变接触的砂质或粉砂质条带,或海泛之初物源碎屑供给不足的情况下发育的碳酸盐岩层可以辅助深水层序边界识别<sup>[18]</sup>。

#### 2.1.3 滞留沉积物

滞留沉积物的成因是细粒物质被筛掉后形成的粗粒物的累积<sup>[22]</sup>。这些滞留沉积物的构成包括:石英质的砂和粉砂(图3)、重新改造的黄铁矿物质、磷酸盐质的碎片残骸(鱼骨骼,牙形石,海豆芽)以及海绿石等<sup>[20,22]</sup>。大多数的滞留沉积物由不同含量的以上颗粒组成,有些滞留沉积物可能仅有其中一种颗粒富集,例如砂和粉砂质滞留沉积物。粉砂质滞留沉积物也常常包含毫米到厘米级的植物碎片。在典型的滞留沉积物中,可见高磨圆度的海绿石(直径0.1~0.2 mm)颗粒,或包含百分之一的砂粒物,牙形石在碎屑颗粒物中

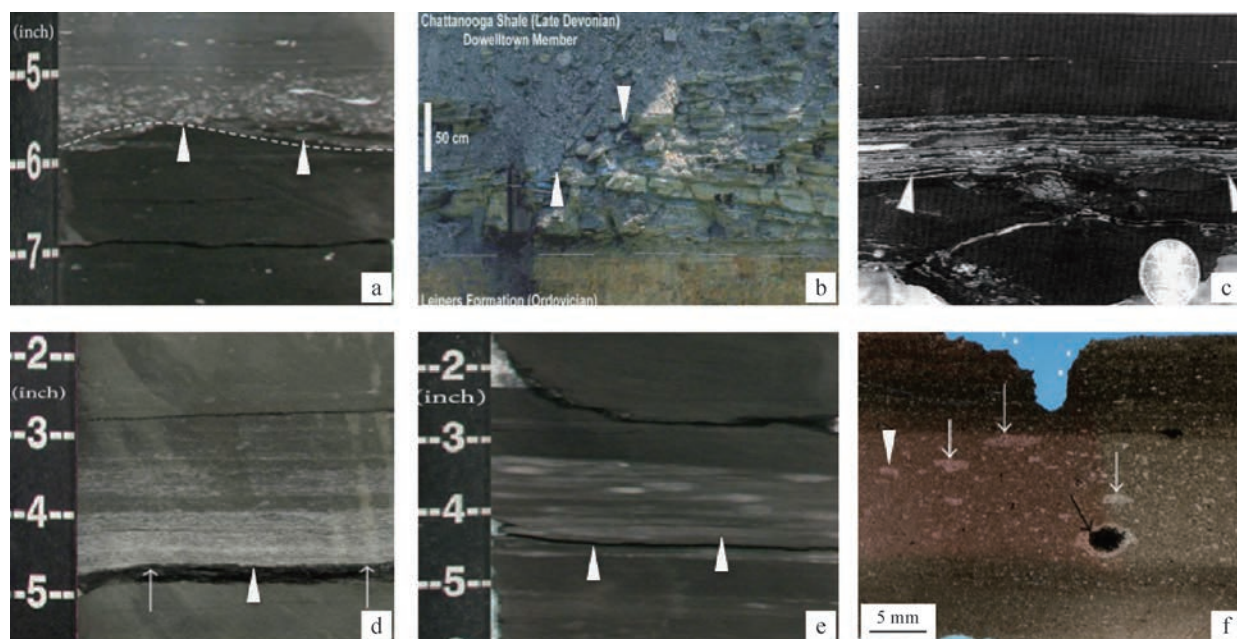


图1 页岩层序边界沉积标志(据文献[20,22,31],有修改)

Fig. 1 Sedimentary features of sequence boundaries in shale (modified after references[20,22,31])

a. 小型的基底冲刷面和剥蚀面;b. 低角度的页岩层截断;c. 下覆页岩层出现软质沉积物变形;d. 壳质纹层;e,f. 冲断构造碎屑

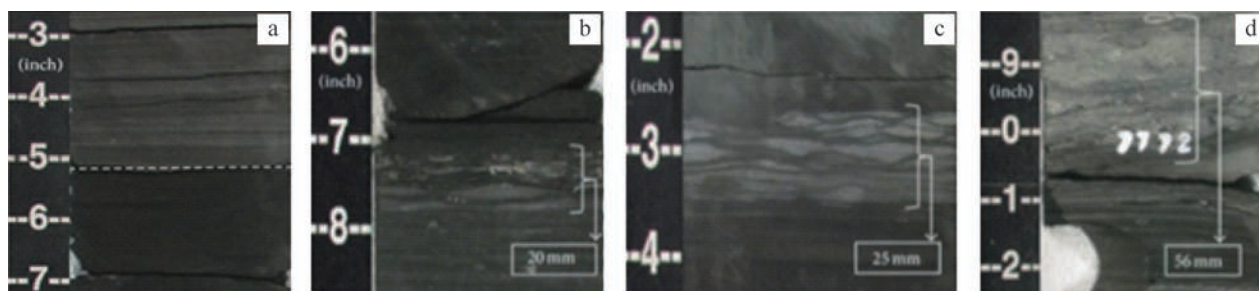


图2 岩石岩性组合为例的层序边界标志(据文献[31],有修改)

Fig. 2 Sequence boundary markers, exemplified by the lithological association (modified from reference[31])

a. 富有页岩层与暗色泥岩突变接触;b,c. 少量有机化石遗迹和波浪状的层理的出现;d. 化石层底界面与暗色泥岩接触

成分比例也可以达到几个百分比<sup>[20]</sup>。海绿石颗粒和砂粒之间可见压缩导致的收缩裂缝和变形。滞留沉积物具有波浪形成特征(图3),反映海平面下降形成的

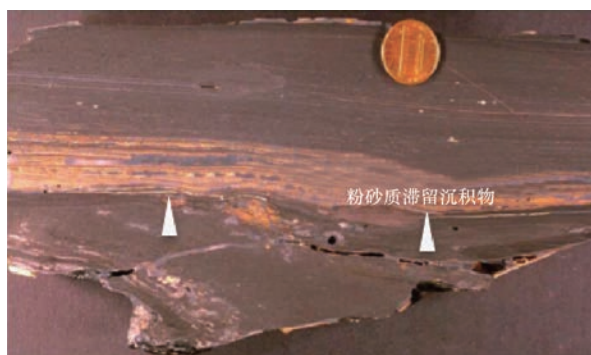


图3 粉砂质的滞留沉积物(据文献[18],有修改)

Fig. 3 Silty lag deposit (modified from reference[18])

剥蚀面,剥蚀面上覆的黑色页岩记录了海平面上升的沉积过程。在北美的 Chattanooga 页岩研究中,不同类型的滞留沉积物也可以指示剥蚀的厚度。以砂质滞留沉积物和生物骨架层为例,砂质滞留沉积物(一般1~20 mm)指示了数百厘米的沉积厚度;硫化铁矿质的滞留沉积物(直径0.005~0.03 cm):数十厘米;粉砂质和牙形石:数厘米;以及海豆芽滞留沉积物:数毫米<sup>[20]</sup>。滞留沉积物是最容易辨认的剥蚀面指示之一<sup>[20]</sup>。

#### 2.1.4 黄铁矿鲕粒

黄铁矿鲕粒在剥蚀面上的出现被认为是层序边界的标志<sup>[23]</sup>。黄铁矿鲕粒起源于海平面处于低位期的鲕绿泥石<sup>[23]</sup>。鲕绿泥石的前体鲕粒的出现预示着水体的富氧状态以及海浪与海底沉积物有相互作用。在

北美东部地区的上泥盆统页岩沉积研究中,黄铁矿鲕粒是指示海平面下降的直接证据。黄铁矿鲕粒层和下覆的黑色页岩过渡明显,黄铁矿鲕粒层中存在于多个冲刷面,指示着长期高能的新改造和筛选过程<sup>[23]</sup>。黑色页岩与黄铁矿鲕粒层之间的强烈能量对比也指示了黄铁矿鲕粒层在浅水中形成。在黄铁矿鲕粒层中(图4),鲕粒的外层是圆滑的椭圆形,中心是黄铁矿薄层,而且有明显的增生结构,这些沉积结构指示了他们并非沉积后的成岩作用<sup>[23]</sup>。这些黄铁矿鲕粒起源于含铁鲕粒泥石,产生于低位体系域的新改造,当海平面上升时被有机物丰富的泥覆盖,继而黄铁矿化。因此,这些黄铁矿鲕粒为海平面的下降,侵蚀面的产生提供了独立的沉积证据。这些黄铁矿鲕粒层在北美东部的上泥盆统沉积,以及 Williston 盆地的泥盆系, Newfoundland 的奥陶系,和 Iowa 的寒武系沉积中都有发现<sup>[23-25]</sup>。黄铁矿鲕粒在风化作用中容易被破坏,有机岩石学的薄片分析可以有助于他们的鉴别。在中国黑色页岩沉积中,含黄铁矿鲕粒的沉积层与海平面的关系也有可能被发现。

## 2.2 最大海泛面的沉积学特征

磷酸盐结核是最大海泛面的沉积特征。在北美的页岩沉积中,位于美国加利福尼亚州白垩系沉积的 Marca 页岩<sup>[26-27]</sup>,以及美国东部地区的泥盆系-密西西比系的 Chattanooga 页岩<sup>[28-34]</sup>,都发现了磷酸盐结核层,这些结核经分析主要出现在一套页岩层中最贫氧层位的上方。磷酸盐结核近圆形至板状,表面光滑至较粗糙,颜色从浅棕色至黑色,平均直径约几厘米左右(图5)。它的颜色是磷酸盐组成物中还原性铁化合物分解的产物所致<sup>[26-28]</sup>。这些磷酸盐结核内部一般无明显结构,主要矿物组成包括磷灰石、海绿石、石英和黄铁矿<sup>[28]</sup>。结核根据组成元素和大小可分为不同类型,其中体积较大的,简单类型的结核一般没有生物生成证据,主要是由无机物的降解和海水中磷灰石降

解形成。然而沉积物中的微生物会对结核产生的物理化学环境有影响,形成生物型结核。页岩的含磷氧化物( $P_2O_5$ )含量范围在1%~5%,而磷酸盐结核中 $P_2O_5$ 含量达到了30%<sup>[32]</sup>。结核边缘由磷酸盐富集组成,而在中心是富集方解石<sup>[29]</sup>。沉积过程中,风化或者生物来源带来了沉积物中 $P_2O_5$ 富集。磷酸盐形成于有限空间内的水与沉积物界面,当孔隙水富集P元素和Ca元素,缺乏Mg元素时,磷酸盐结核开始生长。一个相对还原性的环境利于磷酸盐化。丰富的结核预示着水中富含磷酸盐的缓慢沉积,这样的环境被定义为弱还原环境<sup>[27-32]</sup>,一般出现在最大海泛面上方几厘米的位置,可指示最大海泛面的出现。

## 3 层序划分的地球化学指示

对于在构造较稳定的深水环境沉积的大套暗色泥岩,海平面升降循环形成了有机物保存时差异性的氧化/还原环境。不同水深时,有机物保存程度和保存条件,有机质和矿物组分的来源和含量差异等地球化学指标的差异对页岩层序,尤其是高频层序划分有重要指示作用。

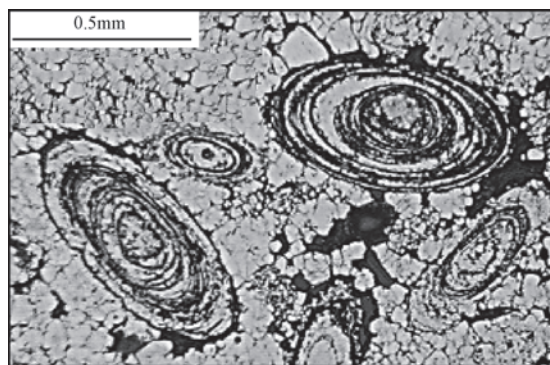


图4 北美 Chattanooga 页岩黄铁矿滞留沉积物中出现的黄铁矿鲕粒(据文献[23])

Fig. 4 Pyrite ooids in lag deposits of the Chattanooga Shale, North America (modified from reference[23])

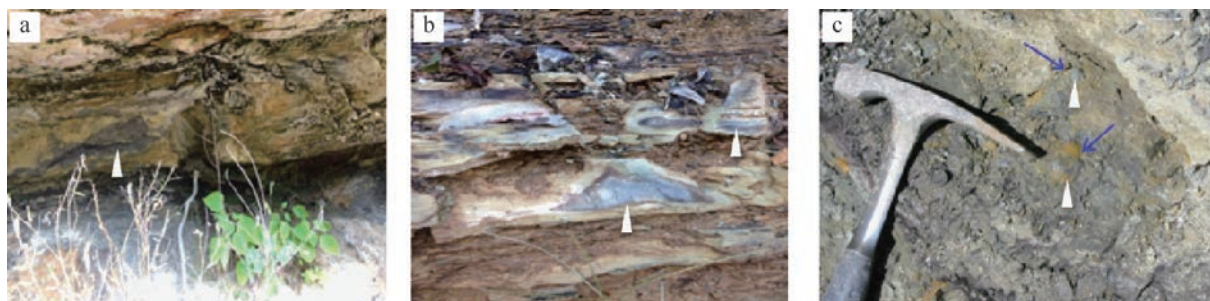


图5 磷酸盐结核的野外露头

Fig. 5 Phosphate nodule in outcrops

### 3.1 有机物保存程度和保存条件

#### 3.1.1 相对生烃潜力(*RHP*)与氢指数(*HI*)值

相对生烃潜力(*RHP*, mg/g)和氢指数(*HI*, mg/g)值是国外广泛应用在页岩层序地层划分的地化参数<sup>[30]</sup>。热解参数是指用岩石快速热解仪对岩石热解分析的结果,可提供可溶烃含量( $S_1$ , mg/g)、热解烃含量( $S_2$ , mg/g)和热解烃峰值温度( $T_{max}$ , °C)3项基本热解参数<sup>[30]</sup>。相对生烃潜力的数学表达式是 $[RHP = (S_1 + S_2)/TOC]$ ,氢指数值的数学表达式是 $[HI = (S_2/TOC) \times 100]$ (*TOC*为有机碳含量,%)。对于成熟度相同的样品, $S_1$ 和 $S_2$ 的变化值反映了有机质的保存程度。*RHP*反映了含氧条件的变化,是一个古环境的指示参数,对于页岩储层的高精度层序地层划分具有重要意义。

研究发现,对于Barnett和Woodford页岩,相对生烃潜力(*RHP*)指示的氧气含量与海平面的上升下降有很好的对应关系<sup>[6,30,33-35]</sup>。有氧条件下, $S_2$ 处于最低值;无氧条件下, $S_2$ 峰值最高,表示有机质保存完好。以Barnett页岩为例<sup>[6,35]</sup>,*RHP*的低值变化范围在1.3~1.5 mg/g,高值变化范围在1.6~2.2 mg/g。当*RHP*值最大时(指示无氧条件)对应着水深最深的最大洪泛面位置,而最小的*RHP*值(指示富氧条件)与层序边界有良好对应。类似的,在北美堪萨斯州Hushpuckney页岩高频层序划分中<sup>[17]</sup>,*HI*值在最大洪泛面位置可达到350~400 mg/g,而水深最低时的层序边界*HI*值下降到250 mg/g。

#### 3.1.2 微量元素、主量(磷、硫)元素及比值

沉积物沉积过程中,氧气含量和 $H_2S$ 相对含量随着沉积过程发生循环变化。微量元素(Co, U和Mo)富集指示着还原环境,即最大海泛面位置<sup>[17,36-37]</sup>;最低点可指示层序边界位置。主量元素(磷、硫)的富集指示着还原环境和较好的有机质保存条件,即最大海泛面位置。在近年来的文献中,比较常用和准确的含氧指示是黄铁矿化程度(*DOP*)和元素含量比值,即 $V/(V + Ni)$ <sup>[35]</sup>。

*DOP*即页岩中硫化铁含量与总还原铁含量的比值,是指示氧化/还原环境的重要指标<sup>[35]</sup>。以Barnett页岩为例,当 $DOP < 0.45$ ,  $= 0.45 \sim 0.75$ ,  $> 0.75$ 分明代表了氧化、贫氧以及无氧3种状态。 $V/(V + Ni)$ 比值在0.6~0.7时代表缺氧环境,0.84~0.89代表无氧环境。然而,一些研究表明,微量元素的富集程度可能与有机物类型有关。因此,在使用微量元素判断沉积

环境时应该考虑不同有机物类型的影响<sup>[38]</sup>。

### 3.2 有机质和矿物组分

#### 3.2.1 总有机碳(*TOC*)含量

总有机碳(*TOC*)含量是代表有机物累积的重要地化参数。*TOC*在页岩中的含量变化范围一般在0.1%~15%。在对泥页岩的定量评价中发现,*TOC*含量在纵向上的分布常有一定的规律性。这种规律性主要与沉积物供给和湖(海)平面的水体深度有关<sup>[39-40]</sup>。

Creaney和Passey详细研究海相烃源岩*TOC*含量随体系域变化的特征,发现*TOC*最大含量往往与最大海泛面有关<sup>[39]</sup>。每期次级层序末基准面突然升高,继而缓慢下降。当湖盆基准面突然上升,可容纳空间增加,深水的还原条件不仅可以有效保存沉积界面有机质,同时突然离盆地边缘距离增加,陆源碎屑和陆源高等植物供给变少,减少有机质稀释,有机质类型变好。随着基准面逐渐下降,陆源碎屑供给增多、有机质保存条件变差,沉积岩中*TOC*含量逐渐变少,有机质类型逐渐变差,因此*TOC*含量最小值一般为层序边界面。

#### 3.2.2 沉积岩密度与粘土矿物含量

沉积岩密度主要由矿物成分及其含量多少、岩石孔隙大小和充填物多少来决定,通常变化范围是1.9~3.5 g/cm<sup>3</sup><sup>[41]</sup>。页岩作为低孔有机质丰富的沉积岩,其密度主要由矿物和有机质含量决定,页岩矿物成分复杂,主要由粘土矿物(如水云母、高岭石与蒙脱石等)组成,其次为碎屑矿物(石英、长石以及云母等)与后生矿物(绿帘石和绿泥石等)等组成<sup>[32]</sup>。

粘土矿物的骨架密度约为2.7 g/cm<sup>3</sup>,有机质密度接近1 g/cm<sup>3</sup>。不同层位页岩的密度变化可以指示有机质丰度和粘土矿物的相互比例关系。暗色泥岩粘土矿物含量最高处与密度突然变小处指示最大海泛面层;粘土矿物含量最低处与密度最高处指示层序边界面。

#### 3.2.3 $Al_2O_3/SiO_2$ 比值

$Al_2O_3/SiO_2$ 的比值代表伊利石和石英的相对含量,指示了泥岩中粘土矿物和陆源硅质碎屑所占比重。在北美堪萨斯州Hushpuckney页岩内部层序中,其比值变化范围在0.02~0.44<sup>[17]</sup>。比值的最高点指示了最大海泛面位置,最低点可指示层序边界面。

## 4 应用实例

### 4.1 北美堪萨斯州 Hushpuckney 页岩

早宾夕法尼亚时期北美堪萨斯州东部 Swope 地层沉积一套 Hushpuckney 页岩(图6)<sup>[17]</sup>。该地区古历史沉积时期海平面的升降主要受冈瓦纳冰期的冰河影响。Algeo 等对此段页岩取心(图6)并进行了厘米级的沉积学、地球化学和有机岩石学分析,分析了沉积组成上的高频变化,并划分出对应的层序关键界面。

页岩垂向上的地球化学特征变化反映了海平面升降主控的层序发育特征(图7)。每一个次级层序单位的顶底界面都分别记录了一次向大陆架的进积退积过程。这段 52 cm 的厚层黑色页岩的次级层序包含 12 个高循环级别,估测是大约 2 000 ~ 9 000 年的沉积时间,指示了次级米兰科维奇循环的气候控制。

根据 HI 指数结果和综合资料分析(图7),该段页岩沉积的氧化还原条件从初始期的富氧环境变为逐渐增强的闭塞环境,氧气含量随后略微增加后最终变为缺氧环境。此段层序缺失低位体系域。从页岩层起始点(0 cm)氧气含量急剧减小(比下覆岩层),在 4 cm 处开始硫化,在 21 cm 处含氧量达到最低;最大海泛面的位置在大约 17 ~ 23 cm 处,沉积特征表现为深色富含有机质层,硫、磷元素和还原金属含量相对最高。在

21 cm 以上,含氧量开始增加,在最大洪泛面上方沉积海平面退积形成的富集层;在大约 28 ~ 34 cm 处,富含大量自生的磷酸盐细砾层(平均直径 3 ~ 4 mm),同时有机物显微组分种类主要为海相起源、还原性金属含量较低,反映了有机质丰富的深水营养物质垂直方向的上涌和产率的提高。在 34 cm 处开始硫化和非硫化层交替沉积,并在 52 cm 处可见黑色与灰色页岩的分

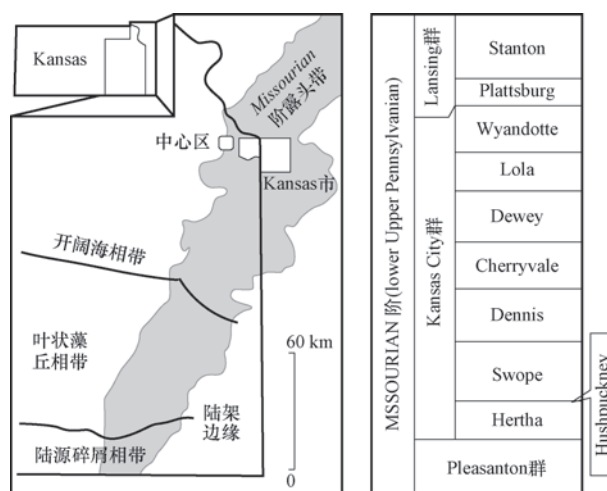


图6 Hushpuckney 页岩沉积于 Kansas 组的 Swope 层(据文献[17])

Fig. 6 Hushpuckney Shale deposit in the Swope layer of the Kansas Formation (modified from reference[17])

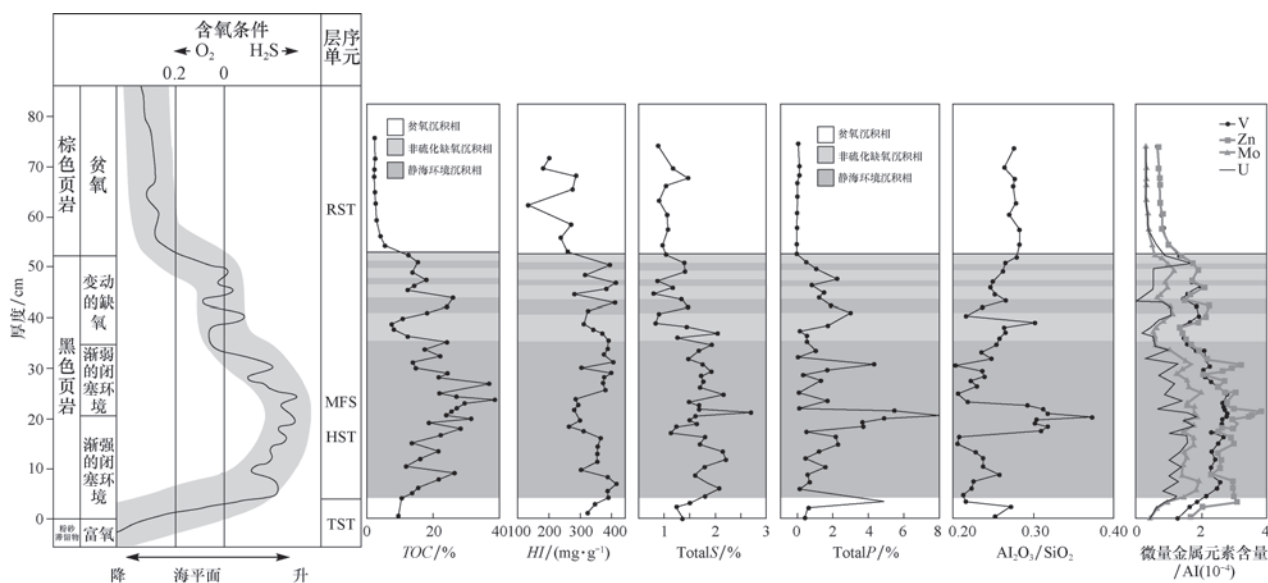


图7 Hushpuckney 页岩层序单元和体系域划分(据文献[17],有修改)

Fig. 7 Division of sequence stratigraphy and system tract of Hushpuckney Shale (modified from reference[17])

SB1. 层序边界; TST. 进积体系域; MFS. 最大洪泛面; HST. 高位体系域; RST. 退积体系域; TOC. 总有机碳含量; HI. 氢指数; TotalS. 总硫元素含量; TotalP. 总磷元素含量

界面,且发现有 *Trichichnus* 的虫孔上下穿越痕迹。在进积体系域和最大海泛面的沉积特征表现为较高含量的伊利石(代表陆源碎屑的输入)、较高的还原性金属含量和较低的  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$  值。在 35 cm 后,页岩的 *TOC*、硫磷元素以及还原金属含量剧减,退积过程开始。同时,贫氧环境的建立使得耐低氧条件的底栖软体有机生物逐渐积累。在 55 cm 处,*Trichichnus* 生物痕迹在同一层面截止,指示了退积作用的发生。在 76 cm 处,可观察到一层细的含微量磷酸盐化的沉积,包含小的、不规则的、深色的粒屑,是有机物被剥蚀后的遗留<sup>[17]</sup>。

#### 4.2 中国四川盆地东南部上奥陶统五峰组-下志留统龙马溪组

近年来,四川盆地及其周缘地区上奥陶统五峰组-下志留统龙马溪组层序与沉积特征也初步被建立起来。下志留统龙马溪组被解释为三级层序,鉴别出三套层序界面(图 8,SB1,SB2 和 SB3)<sup>[14-15]</sup>。不同的体系域和层序边界判断依据来自于不同的岩相组合、总有机碳含量、无机微量元素相对含量和矿物组成。

上奥陶统五峰组-下志留统龙马溪组之间的层序界面 SB2 是进积侵蚀面。五峰组的晚期沉积环境为深灰色生物化石丰富的石灰岩沉积,代表了较浅的水体沉积。下龙马溪组是一套深水环境的泥岩沉积。根据伽马测井曲线,SB2 界面发生伽马值的急剧变化,标志了岩相由硅质页岩变为富泥硅质页岩;同时根据  $\text{Th}/\text{U}$  比例,SB2 转换面代表了氧化还原条件由平均含氧量

较高转变为氧气含量的相对减小。SB3 是龙马溪组上下段的分界面,岩相由灰质泥岩转变为粉砂质泥岩。

龙一段层序中可划分出进积体系域(TST),早期高位体系域(EHST)和晚期高位体系域(LHST),厚度分别在 15~35,30~60,20~60 m<sup>[14-15]</sup>。TST 由粘土矿物含量丰富的硅质泥岩和混合型硅质泥岩组成,*TOC* 含量很高(平均 5.0% 左右),石英含量丰富(39.6%~52.6%,平均为 46.7%)。EHST 下部由粘土矿物含量丰富的硅质泥岩和混合型硅质泥岩组成,石英含量为 31.1%~42%,平均为 36.7%。上部岩相变为层理发育的混合型硅质泥岩,*TOC* 含量中等(平均 2.5% 左右)。LHST 主要由硅质泥岩组成,*TOC* 含量较低(平均 2.0%),石英含量在 20.1%~29.3%,平均为 24.1%。*TOC* 含量相对高值点(3.5%)、 $\text{Th}/\text{U}$  比例相对低值点指示了最大海泛面(MFS)位置。

根据岩相反应的脆性矿物和粘土矿物相对含量,在三级层序内部将页岩岩相划分为 S-2:硅质页岩,S-3 富硅质页岩,M-2:泥/硅混合页岩,CM-1:富硅泥质页岩,进而划分出高频四级层序单元<sup>[14-15]</sup>(图 8)。

综上所述,测井方法、沉积学方法与地球化学方法的结合可为页岩沉积的层序地层划分提供多重有利证据。在沉积层序的划分中,优先选用测井曲线与岩性、岩相结合的方法划分三级层序。以我国四川盆地及其周缘地区上奥陶统五峰组-下志留统龙马溪组为例,对于上奥陶统五峰组-下志留统龙马溪组之间的进积侵蚀面 SB2 的判别,测井曲线指示界面处发生了

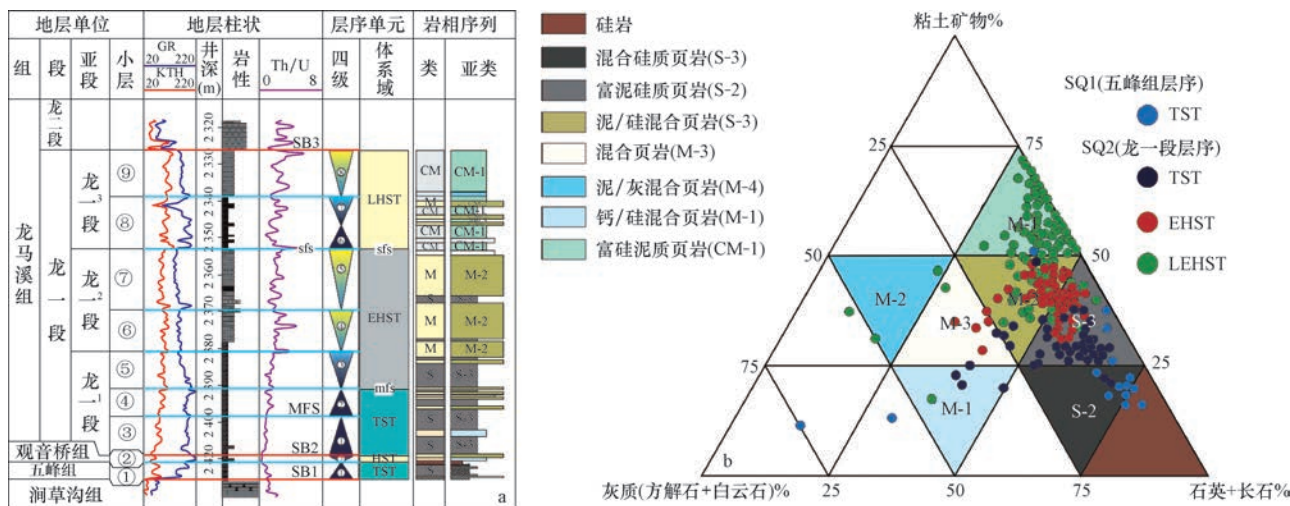


图8 四川盆地东南部上奥陶五峰组-下志留统龙马溪组页岩层序划分

Fig. 8 Sequence division of shale in the Upper Ordovician Wufeng Formation-Lower Devonian Longmaxi Formation, southeastern Sichuan Basin

a. 依据测井数据、地化参数( $\text{Th}/\text{U}$ , *TOC*)、岩相序列划分的层序单元和体系域; b. 不同矿物成分的岩相类型划分

伽马值的急剧变化,岩性岩相证据指示了沉积环境由五峰组晚期沉积的硅质页岩转变为下龙马溪组的深水环境的富泥硅质页岩沉积。对于四级和更高级别的高频层序划分,钻测井曲线的变化较为微弱,优先选用高精度地球化学参数判断更为直观,但地球化学参数的变化除受氧化还原条件的影响外,同时也受到气候、地下热流供给、元素自身迁移和其他环境因素影响,应用时需尽量结合关键界面可能对应的细粒沉积特征,如小型冲刷面、低角度的页岩层断面、冲断构造碎屑、滞留沉积物和黄铁矿鲕粒等,为层序的划分提供多重依据。

## 5 结论

1) 页岩层序地层划分研究的关键问题是层序界面和最大海泛面的识别,目前仍然存在辨识困难、观点不统一和证据不一致的现象。测井特征是页岩层序划分最直接简易的参考依据,建议优选钻测井资料结合岩性、岩相特征搭建三级层序格架,进而将地球化学与沉积特征结合进一步划分四级及以上高频层序地层。

2) 页岩剥蚀面的出现指示了波浪重新改造作用和侵蚀事件的发生,是层序边界的直接沉积学证据。然而,针对在平静的较高水位时期或构造较稳定的深水环境沉积的等时泥岩层,直接的小型剥蚀或改造面证据并不明显,可根据岩相组合转换面,砂质、粉砂质或者黄铁矿的滞留沉积物和黄铁矿鲕粒沉积现象的出现判断层序边界位置,磷酸盐结核的出现指示着最大洪泛面。

3) 层序划分的地球化学参数主要依据不同水深时有机物保存程度、条件和有机质中矿物组分的来源与含量差异。常用参数包括相对生烃潜力值、氢指数值、微量元素和主量元素的含量与比值、黄铁矿化程度、总有机碳含量、沉积岩密度和粘土矿物含量等,均对层序地层界面划分有良好指示作用。

## 参 考 文 献

- [1] 邹才能,董大忠,杨桦,等. 中国页岩气形成条件及勘探实践[J]. 天然气工业,2011,31(12):26-39.  
Zou Caineng, Dong Dazhong, Yang Hua, et al. Conditions of shale gas accumulation and exploration practices in China[J]. Natural Gas Industry, 2011, 31(12): 26-39.
- [2] 董大忠,邹才能,杨桦,等. 中国页岩气勘探开发进展与发展前景[J]. 石油学报,2012,33(S1):107-114.  
Dong Dazhong, Zou Caineng, Yang Hua, et al. Progress and prospects of shale gas exploration and development in China[J]. Acta Petrolei Sinica, 2012, 33(S1): 107-114.
- [3] Read J, Goldhammer R. Use of Fischer plots to define third-order sea-level curves in Ordovician peritidal cyclic carbonates, Appalachians [J]. Geology, 1988, 16(10): 895-899.
- [4] Mitchum R, Van Wagoner J. High-frequency sequences and their stacking patterns: sequence-stratigraphic evidence of high-frequency eustatic cycles [J]. Sedimentary Geology, 1991, 70(2): 131-160.
- [5] Abouelresh M, Slatt R. Lithofacies and sequence stratigraphy of the Barnett Shale in east central Fort Worth Basin, Texas [J]. AAPG Bulletin, 2012, 96(1): 1-22.
- [6] Slatt R, Rodriguez N. Comparative sequence stratigraphy and organic geochemistry of gas shales: commonality or coincidence? [J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2012, 8: 68-84.
- [7] Smith M, Bustin R. Late Devonian and early Mississippian Bakken and Exshaw black shale source rocks, Western Canada Sedimentary Basin: a sequence stratigraphic interpretation [J]. AAPG Bulletin, 2000, 84(7): 940-960.
- [8] Turner B, Tréanton J, Slatt R. The use of chemostratigraphy to refine ambiguous sequence stratigraphic correlations in marine mudrocks. An example from the Woodford Shale, Oklahoma, USA [J]. Journal of the Geological Society, 2016, 173: 854-868.
- [9] Vail P, Jr R, Iii S. Seismic stratigraphy and global changes of sea level: Part 4. global cycles of relative changes of sea level; Section 2. Application of seismic reflection configuration to stratigraphic interpretation [C]//Charles E. seismic Stratigraphy-applications to hydrocarbon exploration. Tulsa: AAPG Memoir 26, 1977: 83-97.
- [10] Van Wagoner J, Mitchum R, Posamentier Jr, et al. Seismic stratigraphy interpretation using sequence stratigraphy: Part 2: key definitions of sequence stratigraphy [C]//Bally A. Atlas of seismic stratigraphy, Tulsa: American Association of Petroleum Geologists Studies in Geology 27(1), 1987: 11-14.
- [11] Wilson R, Schieber J. Sedimentary facies and depositional environment of the Middle Devonian Genesee Formation of New York, U.S.A [J]. Journal of Sediment Resources, 2015, 85(11): 1393-1415.
- [12] Chen D, Pang X, Jiang Z, et al. Reservoir characteristics and their effects on hydrocarbon accumulation in lacustrine turbidites in the Jiyang Super-depression, Bohai Bay Basin, China [J]. Marine and Petroleum Geology, 2009, 26(2): 149-162.
- [13] Zhang S, Zhu G, Liang Y, et al. Geochemical characteristics of the Zhaolanzhuang sour gas accumulation and thermochemical sulfate reduction in the Jixian Sag of Bohai Bay Basin [J]. Organic Geochemistry, 2005, 36(12): 1717-1730.
- [14] Chen L, Lu Y, Jiang S, et al. Heterogeneity of the Lower Silurian Longmaxi marine shale in the southeast Sichuan Basin of China [J]. Marine and Petroleum Geology, 2015, 65: 232-246.
- [15] Chen L, Lu Y, Jiang S, et al. Sequence stratigraphy and its application in marine shale gas exploration: A case study of the Lower Silurian Longmaxi Formation in the Jiaoshiha shale gas field and its adjacent area in southeast Sichuan Basin, SW China [J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2015, 27: 410-423.
- [16] Ma Y, Fan M, Lu Y, et al. Climate-driven paleolimnological change controls lacustrine mudstone depositional process and organic matter accumulation: constraints from lithofacies and geochemical studies in

- the Zhanhua Depression, eastern China [J]. *International Journal of Coal Geology*, 2016, 167: 103 – 118.
- [17] Algeo T, Schwark L, Hower J. High-resolution geochemistry and sequence stratigraphy of the Hushpuckney Shale (Swope Formation, eastern Kansas); implications for climato-environmental dynamics of the Late Pennsylvanian Midcontinent Seaway [J]. *Chemical Geology*, 2004, 206(3–4): 259 – 288.
- [18] Hornung T, Brandner R. Biochronostratigraphy of the Reingraben Turnover (Hallstatt Facies Belt): Local black shale events controlled by regional tectonics, climatic change and plate tectonics [J]. *Facies*, 2005, 51(1): 460 – 479.
- [19] Johansson M, Stow D. A classification scheme for shale clasts in deep water sandstones [C]//Hartley A, Prosser D. Characterization of deep marine clastic systems, Geological Society London Special Publications, London: Geological Society of London 94, 1995: 221 – 241.
- [20] Schieber J. Developing a sequence stratigraphic framework for the late Devonian Chattanooga Shale of the southeastern U. S. A.: relevance for the Bakken Shale [J]. *AAPG Bulletin*, 1998, 13(1): 58 – 68.
- [21] Schieber J, Baird G. On the origin and significance of pyrite spheres in Devonian black shales of North America [J]. *Journal of Sedimentary Research*, 2001, 71(1): 155 – 166.
- [22] Schieber J. Sedimentary features indicating erosion, condensation, and hiatuses in the Chattanooga Shale of Central Tennessee: relevance for sedimentary and stratigraphic evolution [C]//Schieber J, Zimmerle W, Sethi P. Shales and mudstones (vol. 1), Stuttgart: Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung D – 70176, 1998: 187 – 215.
- [23] Schieber J, Riciputi L. Pyrite ooids in Devonian black shales record intermittent sea-level drop and shallow-water conditions [J]. *Geology*, 2004, 32(4): 305 – 308.
- [24] Hallam A, Bradshaw M. Bituminous shales and oolitic ironstones as indicators of transgressions and regressions [J]. *Journal of the Geological Society*, 1979, 136(2): 157 – 164.
- [25] Hemmesch N, Harris N, Mnich C, et al. A sequence-stratigraphic framework for the Upper Devonian Woodford Shale, Permian Basin, west Texas [J]. *AAPG Bulletin*, 2014, 98(1): 23 – 47.
- [26] Beier J, Hayes J. Geochemical and isotopic evidence for paleoredox conditions during deposition of the Devonian-Mississippian New Albany Shale, southern Indiana [J]. *Geological Society of America Bulletin*, 1989, 101(6): 774 – 782.
- [27] Etensohn F, Miller M, Dillman S, et al. Characterization and implications of the Devonian-Mississippian black shale sequence, eastern and central Kentucky, U. S. A.: Pycnoclines, transgression, regression, and tectonism [C]//McMillan N, Embry A, Glass D. Sedimentation. Devonian of the World, II, Sedimentation, Calgary: Canadian Society of Petroleum Geologists Memoir 14, 1988: 323 – 345.
- [28] Heckel P. Origin of phosphatic black shale facies in Pennsylvanian cyclothems of mid-continent North America [J]. *AAPG Bulletin*, 1977, 61(7): 1045 – 1068.
- [29] Kidder D. Petrology and origin of phosphate nodules from the Midcontinent Pennsylvanian epicontinental sea [J]. *Journal of Sedimentary Petrology*, 1985, 55(6): 809 – 816.
- [30] Miceli Romero, Philp R. Organic geochemistry of the Woodford Shale, southeastern Oklahoma: how variable can shales be? [J]. *AAPG Bulletin*, 2012, 96(3): 493 – 517.
- [31] Abouelresh M. Multiscale erosion surfaces of the organic-rich Barnett Shale, Fort Worth Basin, USA [J]. *Journal of Geological Research*, 2013(759395): 1 – 16.
- [32] Runnels R, Schleicher J, Van Northwick H. Composition of some uranium-bearing phosphate nodules from Kansas shales [J]. *Kansas Geological Survey Bulletin*, 1953, 102(3): 93 – 104.
- [33] Ingle J. Paleo-oceanographic significance of Cretaceous and Cenozoic diatomites along eastern Pacific margin [J]: *AAPG Bulletin*, 1982, 66(5): 584.
- [34] Conant L, Swanson V. Chattanooga shale and related rocks of central Tennessee and nearby areas [J]. *U. S. Geological Survey Professional Papers*, 1961, 357: 91.
- [35] Hatch J, Leventhal J. 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, U. S. A [J]. *Chemical Geology*, 1992, 99(1): 65 – 82.
- [36] Brumsack H. The trace metal content of recent organic carbon-rich sediments: implications for Cretaceous black shale formation [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2006, 232(2): 344 – 361.
- [37] Partin C, Bekker A, Planavsky N, et al. Large-scale fluctuations in Precambrian atmospheric and oceanic oxygen levels from the record of U in shales [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2013, 369 – 370: 284 – 293.
- [38] Li Y, Schieber J. On the origin of a phosphate enriched interval in the Chattanooga Shale (Upper Devonian) of Tennessee-A combined sedimentologic, petrographic, and geochemical study [J]. *Sedimentary Geology*, 2015, 329: 40 – 61.
- [39] Creaney S, Passey Q. Recurring patterns of total organic carbon and source rock quality within a sequence stratigraphic framework [J]. *AAPG Bulletin*, 1993, 77(3): 386 – 401.
- [40] Röhl H, Schmid-Röhl A, Oschmann W. The Posidonia Shale (Lower Toarcian) of SW-Germany: an oxygen-depleted ecosystem controlled by sea level [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2001, 169(3): 273 – 299.
- [41] Ross D, Bustin R. Characterizing the shale gas resource potential of Devonian-Mississippian strata in the Western Canada sedimentary basin: Application of an integrated formation evaluation [J]. *AAPG Bulletin*, 2008, 92(1): 87 – 125.