

鄂西地区下寒武统牛蹄塘组页岩 层序地层格架及沉积演化*

段 轲^{1,2,3} 文剑航^{1,3} 张焱林^{1,3} 刘早学^{1,3} 宋 腾⁴ 李浩涵⁴

1 湖北省地质调查院, 湖北武汉 430034

2 古生物与地质环境演化湖北省重点实验室, 湖北武汉 430034

3 资源与生态环境地质湖北省重点实验室, 湖北武汉 430074

4 中国地质调查局油气资源调查中心, 北京 100083

摘 要 下寒武统牛蹄塘组页岩是中上扬子地区重要的烃源岩。目前, 对中上扬子地区下寒武统牛蹄塘组层序地层划分和层序地层格架建立等方面还存在较大分歧, 尤其针对牛蹄塘组页岩的层序地层学研究相对较少。综合利用野外露头、钻井岩心、常规和能谱测井以及地球化学参数, 对鄂西地区下寒武统牛蹄塘组页岩的层序地层格架及沉积演化进行了系统分析。研究表明, 鄂西地区牛蹄塘组页岩可识别出 2 个三级层序, 其中牛蹄塘组一段(牛一段)和牛蹄塘组二段(牛二段)分别为 1 个三级层序, 均由海侵体系域(TST)和高位体系域(HST)组成。以体系域为单元, 通过层序地层对比, 分析了牛蹄塘组页岩沉积时的沉积环境演变与海平面变化, 提出了早寒武世海平面变化的 4 个阶段, 即波动上升期、波动下降期、快速上升期和逐步下降期, 最后提出了系统的牛蹄塘组页岩沉积演化模式, 为进一步开展中上扬子地区页岩气勘探的有利储集层评价及预测提供理论依据。

关键词 页岩 层序地层 沉积演化 牛蹄塘组 鄂西地区

第一作者简介 段轲, 男, 1989 年生, 高级工程师, 长期从事页岩气地质调查研究。E-mail: 359597913@qq.com。

通讯作者简介 张焱林, 男, 1984 年生, 高级工程师, 长期从事页岩气地质调查研究。E-mail: hbgsylz@126.com。

中图分类号: P588.21 文献标志码: A

Stratigraphic framework and sedimentary evolution of the Lower Cambrian Niutitang Formation shale in western Hubei Province

DUAN Ke^{1,2,3} WEN Jianhang^{1,3} ZHANG Yanlin^{1,3} LIU Zaoxue^{1,3} SONG Teng⁴ LI Haohan⁴

1 Hubei Geological Survey, Wuhan 430034, China

2 Key Laboratory of Paleontology and Geoenvironment Evolution of Hubei Province, Wuhan 430034, China

3 Key Laboratory of Resources and Environment Geology of Hubei Province, Wuhan 430074, China

4 Oil & Gas Survey of China Geological Survey, Beijing 100083, China

* 古生物与地质环境演化湖北省重点实验室开放研究基金课题(编号: PEL-202005)资助。[Financially supported by the Open Research Fund of the Key Laboratory of Paleontology and Geoenvironmental Evolution of Hubei Province (No. PEL-202005)]

收稿日期: 2024-05-10 改回日期: 2024-09-26

Abstract The shale of the Lower Cambrian Niutitang Formation is an important hydrocarbon source rock in the Middle and Upper Yangtze region. However, significant inconsistencies remain regarding the stratigraphic division and framework establishment of the Niutitang Formation in the Middle and Upper Yangtze region. Moreover, sequence stratigraphic studies focused specifically on the Niutitang shale are still limited. In this study, the stratigraphic framework and sedimentary evolution of the Lower Cambrian Niutitang shale in western Hubei Province were systematically analyzed using an integrated approach incorporating field outcrop observations, drilling core data, conventional and spectral logs, and geochemical proxies. Two third-order sequences are recognized within the Niutitang Formation shale in western Hubei Province. The first (Niu 1 Member) and second (Niu 2 Member) members each constitute a third-order sequence composed of a Transgressive Systems Tract (TST) and a Highstand Systems Tract (HST). Sequence stratigraphic correlation enabled the reconstruction of depositional environments and relative sea-level fluctuations, revealing four evolutionary phases during the Early Cambrian: a fluctuating transgressive stage, a fluctuating regressive stage, a rapid transgression, and a gradual regression. A comprehensive depositional model for the Niutitang shale is established, providing a theoretical foundation for predicting favorable reservoir intervals and guiding future shale gas exploration in the Central and Upper Yangtze region.

Key words shale, sequence stratigraphy, sedimentary evolution, Niutitang Formation, western Hubei Province

About the first author DUAN Ke, born in 1989, is a senior engineer. He is mainly engaged in shale gas geological investigation and research. E-mail: 359597913@qq.com.

About the corresponding author ZHANG Yanlin, born in 1984, is a senior engineer. He is mainly engaged in shale gas geological investigation and research. E-mail: hbgsylz@126.com.

层序地层学研究在油气藏甜点段评价和预测中具有重要作用 (Catuneanu and Zecchin, 2013; Zecchin and Catuneanu, 2013; Hemmesch *et al.*, 2014; Kohl *et al.*, 2014; 郭旭升, 2017)。随着北美页岩气勘探开发取得突破, 层序地层研究逐渐由碎屑岩和碳酸盐岩转向泥岩和页岩 (Wang and Carr, 2012, 2013)。然而, 泥岩和页岩通常形成于较深水的环境中, 通过地震剖面等传统的方法识别其中的不整合面相对较难。国外学者利用 GR 曲线、U、Th、K 等能谱曲线、元素地球化学曲线、岩相组合和 TOC 含量变化等多参数多手段, 综合判断泥岩和页岩等沉积时期的海侵与海退变化、水体氧化与还原的交替, 进而识别层序地层界面, 并开展层序地层学研究 (Abouelresh and Slatt, 2012; Hammes and Frébourg, 2012; Hemmesch *et al.*, 2014; Li and Schieber, 2020)。研究表明, 泥岩和页岩的三级层序通常由海侵体系域和高位体系域组成, 海侵体系域顶部一般发育凝缩段, 具有较高的有机碳含量, 而高位体系域常代表了海退, 一般有

机碳含量开始降低 (郭旭升, 2017; 陆扬博等, 2017)。

目前, 前人对下寒武统牛蹄塘组的层序地层学开展了一定研究。梅冥相等 (2006) 利用多个露头剖面, 将贵州地区的牛蹄塘组划分为 1 个三级层序, 并认为其是 1 个整体向上变浅的沉积序列, 由凝缩段和高位体系域组成; 王传尚等 (2012) 利用典型地层剖面建立了中上扬子地区层序地层格架, 并将牛蹄塘组划分出 2 个三级层序; 王必金等 (2013) 利用大量露头 and 钻井资料开展了寒武系的层序划分和地层对比, 并将牛蹄塘组划分为半个三级层序, 其中高位体系域包含牛蹄塘组上部和石碑组下部地层; 胡忠贵等 (2018) 利用钻井和露头资料, 将湘鄂西地区的下寒武统牛蹄塘组划分为 2 个三级层序, 每个三级层序进一步识别出了海侵体系域和高位体系域; 刘忠宝等 (2018) 利用露头、岩心和钻井综合研究, 将上扬子牛蹄塘组划分为 3 个三级层序; 魏小松等 (2024) 通过鄂西 ND1 井及黔南 HY1 井旋回地层分析识别出下寒武统主要天

文周期,并将牛蹄塘组划分出 2 个三级层序。由此可见,上述学者在对下寒武统牛蹄塘组层序划分等方面还存在较大分歧,而且专门针对牛蹄塘组页岩的层序地层学研究还相对缺乏。

在前人研究的基础上,综合野外露头剖面、岩心和钻井等资料,对鄂西地区下寒武统牛蹄塘组页岩进行系统的层序地层学分析,查明层序地层格架内牛蹄塘组页岩沉积环境的演变和海平面变化,提出较为系统的多因素控制下沉积演化模式,以期为进一步开展中上扬子地区页岩气勘探的有利储集层评价和预测提供一定的理论依据。

1 区域地质概况

埃迪卡拉纪至早寒武世,华北、扬子和华夏地块是独立的克拉通 (Li *et al.*, 2008; Cheng *et al.*, 2016), 均分布于赤道附近 (1-a)。其中, 扬子地块演化为被动大陆边缘盆地, 东南部为南华洋 (图 1-b), 西北部为秦岭洋 (Wang and Li, 2003; Guo *et al.*, 2007; Li *et al.*, 2008)。南华盆地位于扬子板块和华夏板块之间 (Cheng *et al.*, 2016; Niu *et al.*, 2018), 形成于新元古代罗迪尼亚大陆裂解时期, 并在埃迪卡拉纪完全发育而成。早寒武世, 扬子地块发生了 1 次大面积的海侵事件, 导致扬子地区广泛覆盖底层缺氧的海水, 而后牛蹄塘组黑色页岩沉积并覆盖在埃迪卡拉纪碳酸盐岩台地的顶部 (Pi *et al.*, 2013; Liu *et al.*, 2015; Cheng *et al.*, 2016; Li *et al.*, 2018)。这一时期, 受区域构造活动的影响, 扬子地块上形成了若干洼地, 这些洼地主要位于鄂西和渝东以及黔东南, 以深水环境为特征, 主要沉积灰黑色泥岩、富有机质黑色页岩等岩相组合 (Jiang *et al.*, 2011, 2012; Li *et al.*, 2018)。

鄂西地区位于扬子地台中部 (图 1-b), 主要包括黄陵背斜、秭归向斜、当阳向斜和神农架背斜等构造单元 (图 1-c), 区内主要断裂的展布方向均为 NNE 和 NE 向 (Xu *et al.*, 2021), 区内震旦系—寒武系发育齐全, 为本次研究提供了绝佳的地质记录。其中上震旦统灯影组 (碳酸盐岩台地相) 与上覆下寒武统牛蹄塘组 (深水陆棚相) 呈不整合接触, 下寒武统石牌组 (浅水陆棚相) 与下伏牛蹄塘组 (深水陆棚相) 呈整合接触。早寒武世牛蹄塘组沉积时期, 研究区自东向西水体依次加深, 分别沉积了潮坪相、浅水陆棚相和深水陆棚

相。牛蹄塘组可划分为 3 个岩性段 (图 1-d), 即牛一段、牛二段和牛三段。其中, 牛一段主要为灰黑色泥岩与深灰色泥灰岩组合; 牛二段主要为 1 套黑色富有机质页岩 (区内主要的烃源岩), 偶夹灰岩透镜体; 牛三段下部发育 1 套灰白色粉砂岩, 上部为灰色泥晶灰岩。牛蹄塘组页岩主要为牛一段和牛二段, 也是研究的目的层。

2 层序地层格架

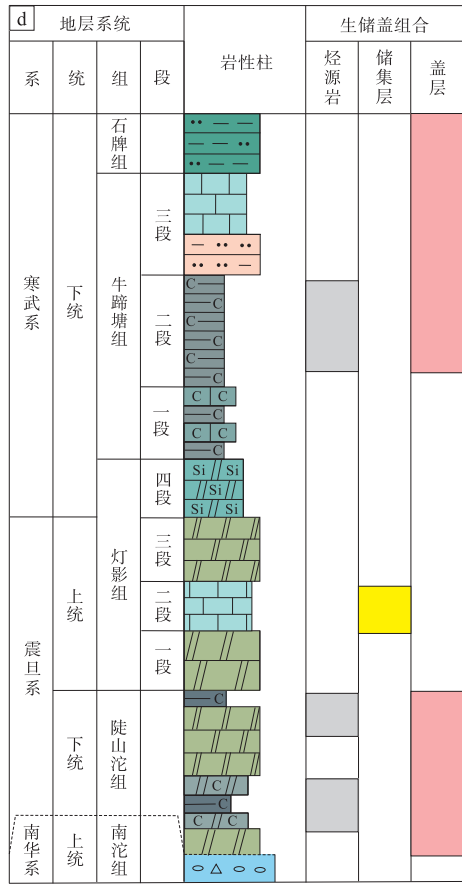
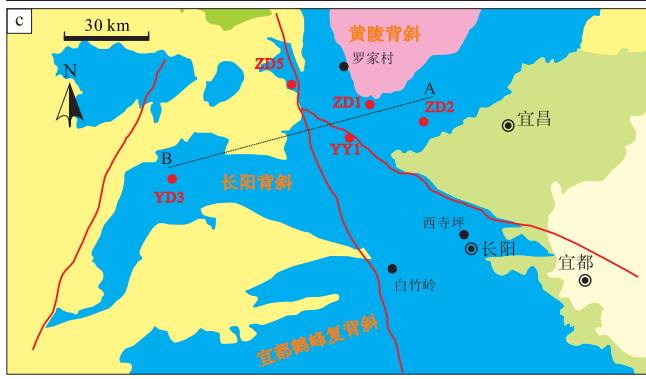
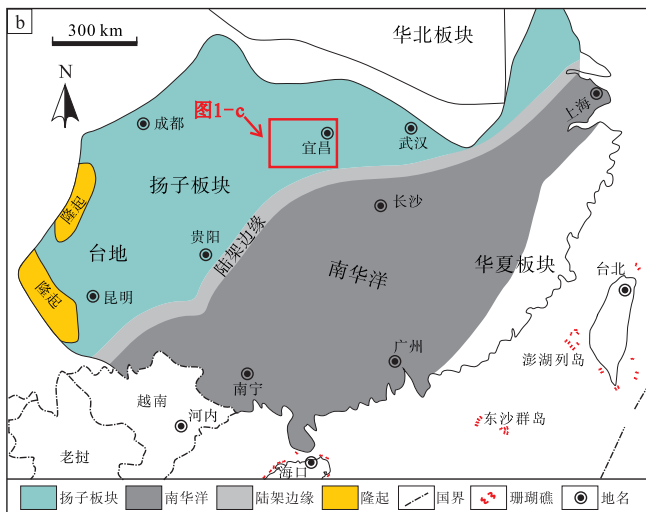
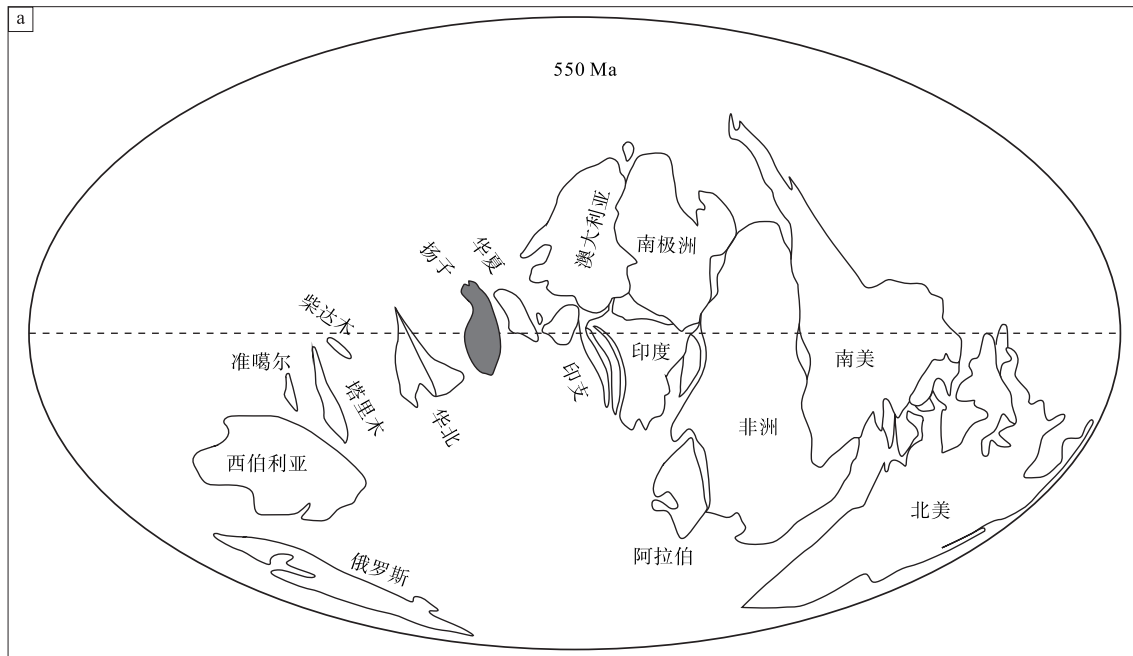
页岩的层序地层学研究主要在地震剖面解释、测井曲线分析、岩心和露头观察描述等资料综合分析的基础上, 进一步开展层序界面识别、层序单元划分、层序发育特征及其演化模式等方面的研究 (林畅松等, 2000; 王传尚等, 2011; 王冠平等, 2019; 胡罗嘉等, 2021; 谢环羽等, 2021)。鄂西地区岩心和露头资料丰富, 地层发育完整, 具有较高的分辨率, 是最直观的研究材料, 限于地震剖面品质, 笔者主要综合测井、岩心和露头等资料建立高分辨率的层序地层格架。

2.1 层序界面识别

层序界面识别是开展层序地层学研究的基础和关键工作 (邓宏文等, 1996; 王鸿祯和史晓颖, 1998; 林畅松等, 2000; 郑荣才等, 2000; 邓宏文, 2009; 姜在兴, 2010)。由于黑色页岩常沉积于水体较深的环境, 例如深水陆棚、盆地等, 通过地震剖面解释来确定不整合面的传统方法在黑色页岩层序地层学研究中较难实现。然而, 岩相特征、测井曲线和地球化学参数在黑色页岩层序地层界面的识别中具有敏感响应 (Abouelresh and Slatt, 2012; Slatt and Rodriguez, 2012)。因此, 在前人研究的基础上, 通过 ZD1 井和 YY1 井 GR 曲线、U、Th、K 能谱曲线和岩性标志对牛一段和牛二段进行层序界面识别 (图 2)。

2.1.1 层序界面 SB1 (牛一段底界)

SB1 为下寒武统牛蹄塘组和上震旦统灯影组的分界。测井曲线的响应特征表明, 该界面处 GR 曲线变化具有突变增大的特点, 由 20 API 突变至 390 API, 与此同时 U、Th、K 能谱曲线与 GR 曲线具有相似的变化特征。该界面上下, 岩相变化明显, 界面之下主要为灯影组的浅灰色粉晶白云岩 (图 3-a, 3-b), 可见鸟眼构造、叠层石及滑塌角



地名
 断裂
 第四系
 新近系-白垩系
 侏罗系-上三叠统
 冰碛砾岩
 泥质粉砂岩
 硅质白云岩
 碳质页岩
 石灰岩
 基底
 中三叠统-泥盆系
 志留系-南华系
 白云岩
 粉砂质泥岩
 含碳白云岩
 含碳灰岩

a—埃迪卡拉纪晚期至寒武纪早期的全球古地理图 (据 Ma *et al.*, 2019); b—华南地区早寒武世岩相古地理图 (据 Steiner *et al.*, 2007; Liu *et al.*, 2015; 有修改); c—钻井及剖面位置图, A-B 代表图 8 的位置; d—鄂西地区南华系一下寒武统柱状图

图 1 鄂西地区区域构造背景及震旦纪一早寒武世地层沉积特征

Fig. 1 Regional tectonic setting and the Sinian-Early Cambrian stratigraphic sedimentary characteristics in western Hubei Province

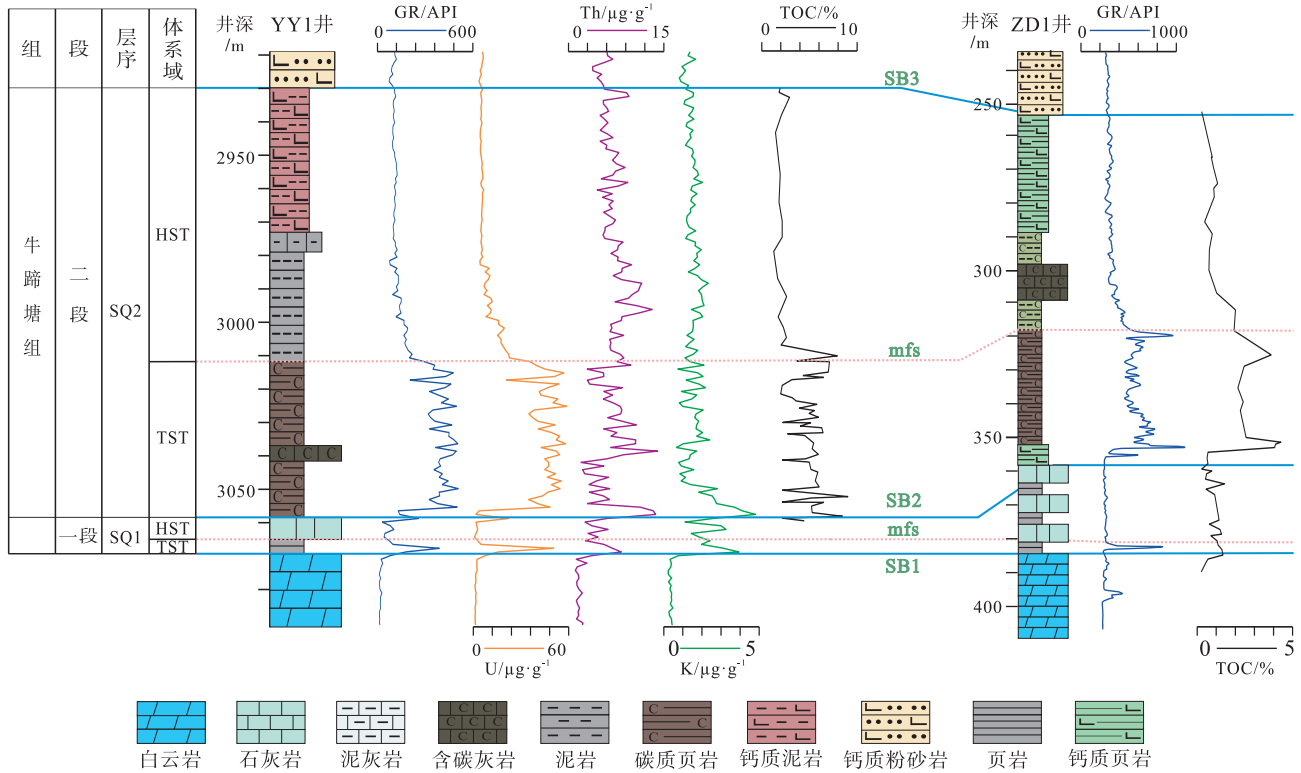


图 2 鄂西地区 ZD1 井和 YY1 井牛蹄塘组层序划分

Fig. 2 Stratigraphic sequence of the Niutitang Formation of Wells ZD1 and YY1 in western Hubei Province

砾等沉积特征，反映该地区在晚震旦世可能为台地相和/或台地边缘相沉积；界面之上为牛一段灰黑色碳质页岩与深灰色泥灰岩互层(图 3-a, 3-b)，该组合超覆于上震旦统灯影组浅水碳酸盐岩台地之上，区域分布稳定。在台地边缘和大陆斜坡带附近，该套深灰色灰质泥岩有机质含量和稀有金属含量较高，见菌藻生物发育，可能是受到了上升洋流影响所造成。总体上，该界面可能代表了晚震旦世至早寒武世华南古海洋海平面的第 1 次快速上升。

2.1.2 层序界面 SB2 (牛二段底界)

SB2 为牛一段和牛二段的分界。测井曲线的响应特征与 SB1 的不同之处在于，界面之下 GR 曲线呈现出逐渐增大的趋势，界面处 GR 曲线陡然增大，由 42 API 突变至 544 API，这次的变化幅度比 SB1 界面处 GR 曲线的变化幅度更大，界面之上 GR 曲线总体表现为在高值附近波动。在岩相变化方面，该界面可作为岩相转换面，界面之下主要为灰黑色碳质页岩与深灰色泥灰岩互层(图 3-d, 3-e)，界面之上为牛二段黑色富有机质页岩(图 3-d, 3-e)，可见硅质纹层、黄铁矿透镜体，指示该

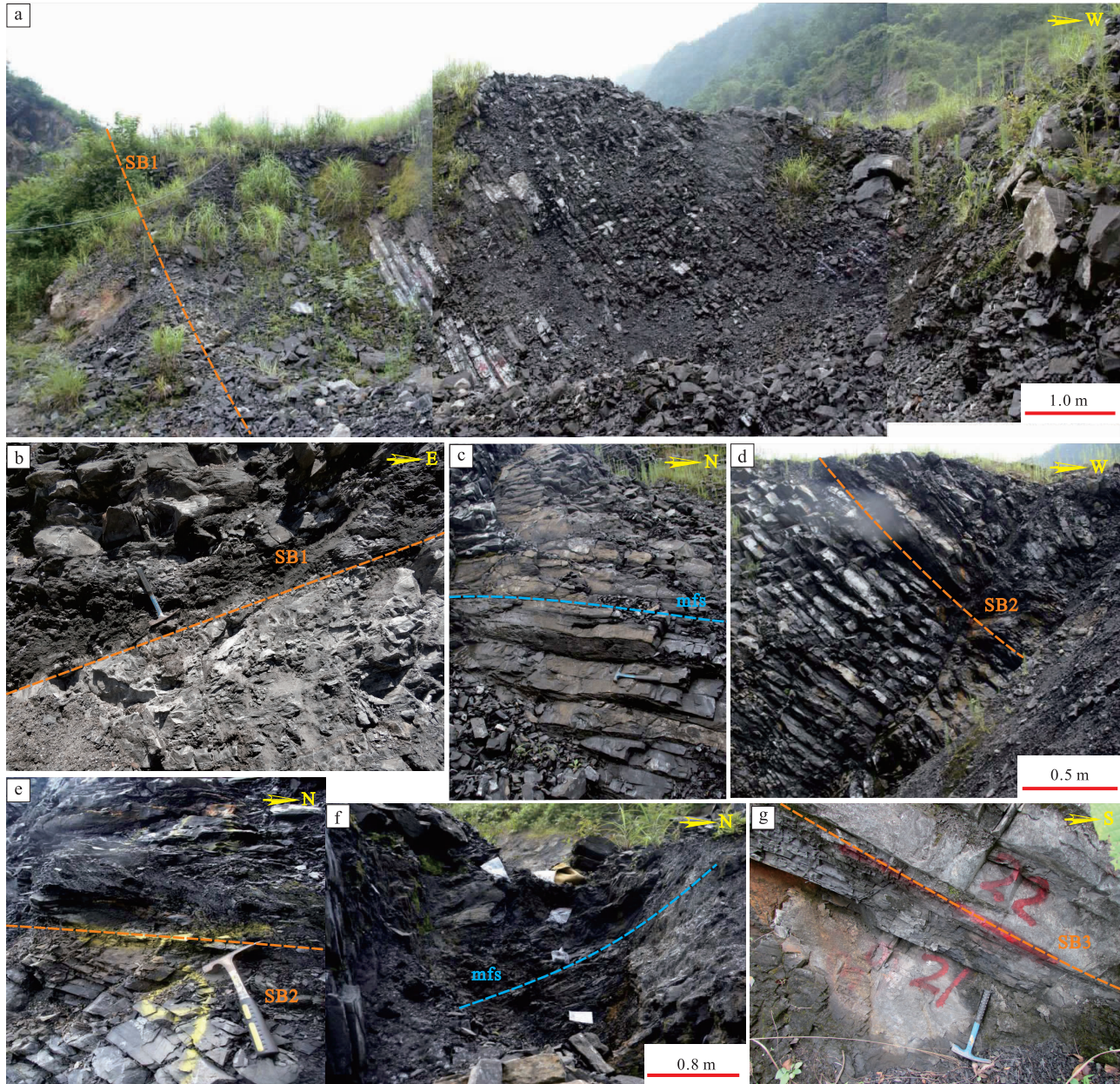
地区在早寒武世可能为安静且较深水的海洋环境。总体上，该界面可能代表了早寒武世华南古海洋海平面的第 2 次快速上升。

2.1.3 层序界面 SB3 (牛三段底界)

SB3 为牛二段和牛三段的分界。该界面处 Th 和 K 能谱曲线发生突变，由高值突变至低值，GR 曲线的变化也具有类似的特征，这种变化趋势与上述 2 个层序界面处 GR 曲线和 U、Th、K 能谱曲线的变化趋势相反，并且曲线的变化幅度相对较小。在岩相变化方面，界面之下主要为牛二段的黑色富有机质页岩，界面之上转变为牛三段的灰白色钙质粉砂岩或灰色泥晶灰岩(图 3-g)。综合界面上下 GR 曲线和 U、Th、K 能谱曲线以及岩相的变化特征，认为该时期海平面处于下降过程。

2.1.4 最大海泛面 (mfs)

牛一段层序和牛二段层序的最大海泛面均分别位于牛一段和牛二段的中部，GR 曲线和 U 能谱曲线在此界面处是一个突变面，变化趋势主要由低值突变为高值，而 Th 和 K 能谱曲线则由高值变为低值。由于 Th 和 K 元素常来源于陆源输入，尤其是



a—灯影组和牛蹄塘组界线，即层序 SQ1 底界面 (SB1)，SB1 之下为灯影组灰白色厚层白云岩，SB1 之上为牛蹄塘组一段灰黑色碳质页岩与深灰色泥灰岩互层，向上泥灰岩含量减少，碳质页岩含量增加，罗家村剖面；b—为 a 的放大照片，层序 SQ1 底界面 (SB1)，罗家村剖面；c—SQ1 的最大海泛面，发育灰黑色中层状钙质泥岩和灰黑色薄层状黑色泥岩 2 种岩性，界面之下为 SQ1 海侵体系域，向上黑色泥岩含量增加，钙质泥岩含量减少，界面之上为 SQ1 高位体系域，钙质泥岩含量增加，罗家村剖面；d—牛一段与牛二段界线，即层序 SQ1 和 SQ2 的界面 (SB2)，界面之下为牛一段灰色中—厚层状泥灰岩与灰黑色薄层状钙质泥岩互层，界面之上为牛二段灰黑色薄层状页岩，罗家村剖面；e—为 d 的放大照片，层序 SQ1 和 SQ2 的界面，罗家村剖面；f—SQ2 的最大海泛面，主要发育黑色碳质页岩，界面之上为 SQ2 高位体系域，钙质泥岩含量逐渐向上增加，罗家村剖面；g—牛二段和牛三段界线，即层序 SQ1 和 SQ2 的界面 (SB3)，SB3 之下为牛二段黑色泥岩，SB3 之上为牛蹄塘组三段灰色泥晶灰岩，白竹岭剖面

图 3 鄂西地区牛蹄塘组页岩野外露头特征

Fig. 3 Sedimentary characteristics of outcrops of the Niutitang shale in western Hubei Province

Th 元素稳定性较强，可作为陆源输入相对变化的良好指标。因此，该界面处 Th 和 K 能谱测井由低值变为高值可能说明，最大海泛面时陆源输入的减

少。牛一段层序和牛二段层序在该界面处的岩相特征也有明显变化，牛一段层序的最大海泛面之下深灰色泥灰岩夹层较薄，在最大海泛面附近几乎全部

为灰黑色泥岩，而在最大海泛面之上逐渐增厚(图 3-c)；牛二段层序的最大海泛面附近主要沉积页理较发育的黑色富有有机质页岩，在该界面之上开始出现灰色钙质泥岩夹层(图 3-f)。同时，TOC 含量在牛一段层序和牛二段层序的最大海泛面附近均表现为高值，为该界面处陆源输入量最少、海水缺氧以及沉积物的沉积速率最低提供了证据。

2.2 层序单元划分

锆石 SHRIMP U-Pb 测年结果显示扬子地区牛一段顶界面年龄为 526.5 ± 1.1 Ma，而牛一段底界面年龄为 539.4 ± 2.9 Ma (Compston *et al.*, 2008)，因此牛一段的沉积延续时间约为 12.9 Ma，四川盆地筇竹寺组(对应鄂西地区牛二段)沉积延续时间约为 9 Ma (Zhang *et al.*, 2022)。因此，牛一段和牛二段沉积延续时间均近似 1 个三级层序 (Miall, 1991)。在上述沉积特征分析和层序界面识别的基础上，结合秭归县罗家村剖面、长阳县西寺坪剖面和长阳白竹岭等野外露头剖面 and 钻井以及测录井资料对牛一段—牛二段层序进行了层序单元划分。基于牛一段—牛二段层序中识别的 3 个三级层序界面，可以将牛一段—牛二段划分为 2 个三级层序 SQ1 和 SQ2。其中，SQ1 层序对应牛一段，SQ2 层

序对应牛二段。这 2 个三级层序均可进一步划分出海侵体系域和高位体系域。SQ1 层序的海侵体系域包含 2 个准层序组，高位体系域包含 2 个准层序组；SQ2 层序的海侵体系域包含 3 个准层序组，高位体系域包含 2 个准层序组。

3 层序发育特征

在野外露头剖面和钻井岩心的沉积特征以及层序构成分析的基础上，建立了牛一段—牛二段层序地层格架，进一步分析层序格架内部的层序构成及其特征。整体上，牛一段—牛二段主要由石英、长石、方解石、白云石和黏土矿物组成，其中石英和黏土矿物的百分含量相对较高，石英含量主要分布于 4.4%~58.2% 之间，平均值 24.2%；黏土矿物含量主要分布于 1.0%~59.2% 之间，平均值 30.2%；长石、方解石和白云石的含量相对较低，平均值小于 18% (图 4；图 5)。以石英为主的脆性矿物含量变化与 TOC 含量变化相似，主要呈现出自下而上逐渐减少的趋势，而黏土矿物含量变化则与之相反，表现为由下向上逐渐增加的趋势。

Mo_{EF} 、 U_{EF} 、 V_{EF} 分别代表 Mo、U 和 V 的富集因子，是较好的氧化还原指标 (Algeo and Maynard, 2004; Tribovillard *et al.*, 2006)。 Mo_{EF} 、 U_{EF} 、

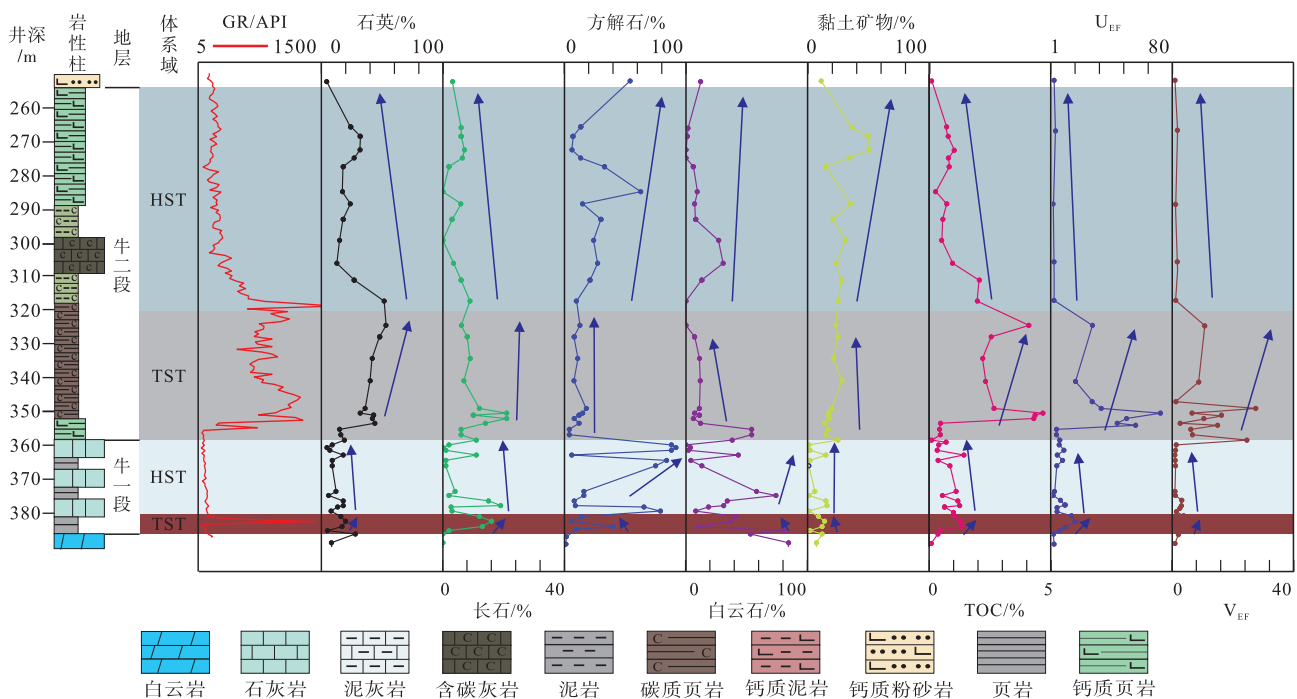


图 4 鄂西地区 ZD1 井牛蹄塘组矿物成分及氧化还原指标垂向变化

Fig. 4 Mineral composition and redox condition proxy variation of the Niutang Formation in Well ZD1 in western Hubei Province

V_{EF} 计算公式如下：

$$X_{EF} = (X/Al)_{\text{sample}} / (X/Al)_{\text{PAAS}}$$

其中 X 是样品中 Mo、U、V 的含量，Al 是样品中 Al 的含量，PAAS 代表了太古宙后平均页岩 (Nance and Taylor, 1976) 的组成。 X_{EF} 值越大代表元素越富集。

3.1 牛一段层序 (SQ1 层序)

该层序包括海侵体系域 (TST) 和高位体系域 (HST)。总体上，该层序在上扬子地区厚度变化较大，厚度主要分布于 1.4~28.1 m 之间。

海侵体系域主要由牛一段下部的灰黑色页岩夹灰色泥灰岩、钙质泥岩夹层组成，向上泥岩含量增加，泥灰岩或钙质泥岩含量减少 (图 3-c; 图 6-a)，2 口井海侵体系域厚度均小于 10 m，GR 曲线具有逐渐升高的趋势，主要为深水陆棚沉积，灰黑色泥岩中可见黄铁矿，常以纹层状和结核状产出 (图 6-b, 6-c)，可能指示了低能贫氧的沉积环境。ZD1 井测试分析结果显示，SQ1 海侵体系域岩石矿物成分中石英含量较高，主要分布于 7%~28% 之间，呈现向上增加的趋势，镜下可见石英颗粒 (图 6-e)，且分布较为零星，岩心可见大量生物碎屑 (图 6-b)；黏土含量较低，介于 2%~12% 之间，平均为 7%；TOC 呈波动上升，向上增大后

又逐渐减小，平均值约为 1.8%； U_{EF} 和 V_{EF} 与 TOC 趋势一致，在牛一段层序底部呈现出局部增大 (图 4)，指示水体可能由氧化突变为还原环境。整体上， U_{EF} 和 V_{EF} 在该层序内呈增大趋势，可能代表了海侵体系域期间，海平面的上升过程。

高位体系域对应牛一段上部的灰黑色泥岩夹中层灰色泥灰岩、钙质泥岩组合，向上泥灰岩或钙质泥岩含量增加，灰黑色泥岩含量减少 (图 3-c, 3-d; 图 6-d)，ZD1 井厚度 26.4 m，明显大于 YY1 井的 5.7 m，GR 曲线较稳定，由下至上略呈减小趋势，主要为浅水陆棚相沉积。ZD1 井测试结果显示，在矿物组成方面，SQ1 高位体系域岩石矿物成分中碳酸盐含量相对较高，石英含量较低，且向上略显降低的趋势，黏土含量变化不大；TOC 含量相比 SQ1 海侵体系域有所降低，平均为 1.4%； U_{EF} 和 V_{EF} 在高位体系域中也具有波动降低的趋势 (图 4)，指示水体含氧量逐渐增大，这一过程可能代表了高位体系域期间海平面的下降过程。

3.2 牛二段层序 (SQ2 层序)

该层序厚度较大，分布于 55.1~176.1 m 之间，在上扬子地区分布稳定，是研究区在早寒武世最主要的烃源岩。该层序由海侵体系域 (TST) 和高位体系域 (HST) 组成。

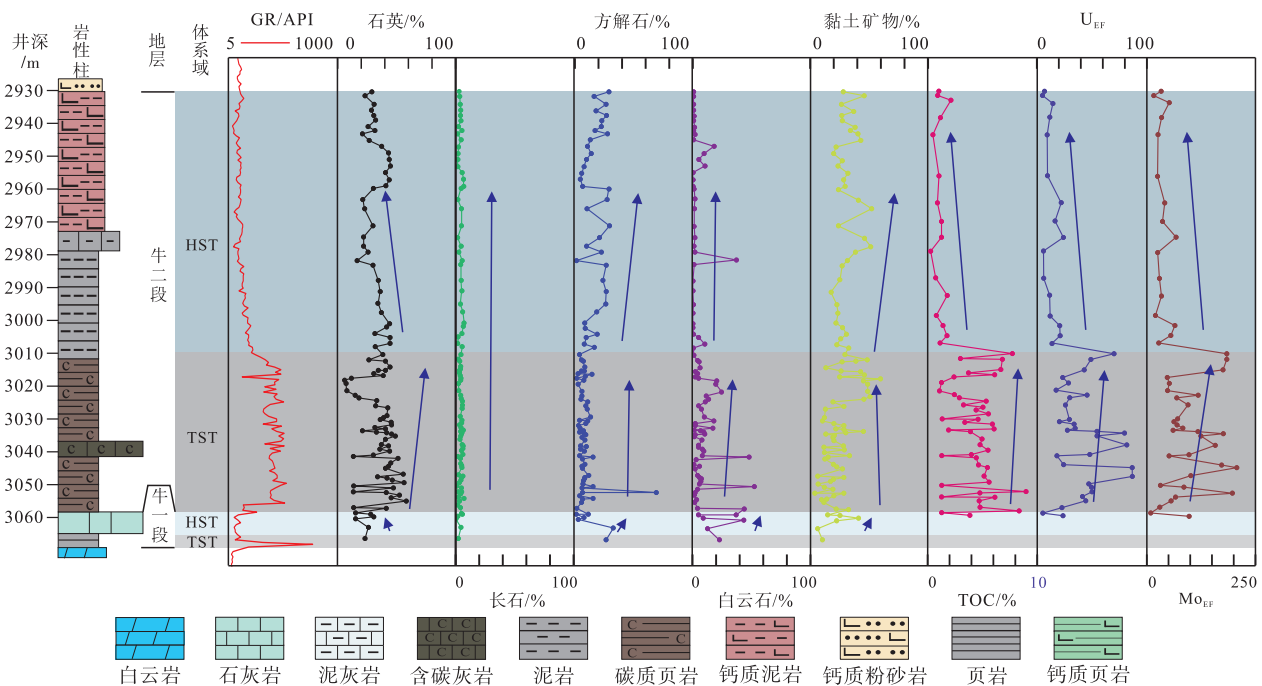
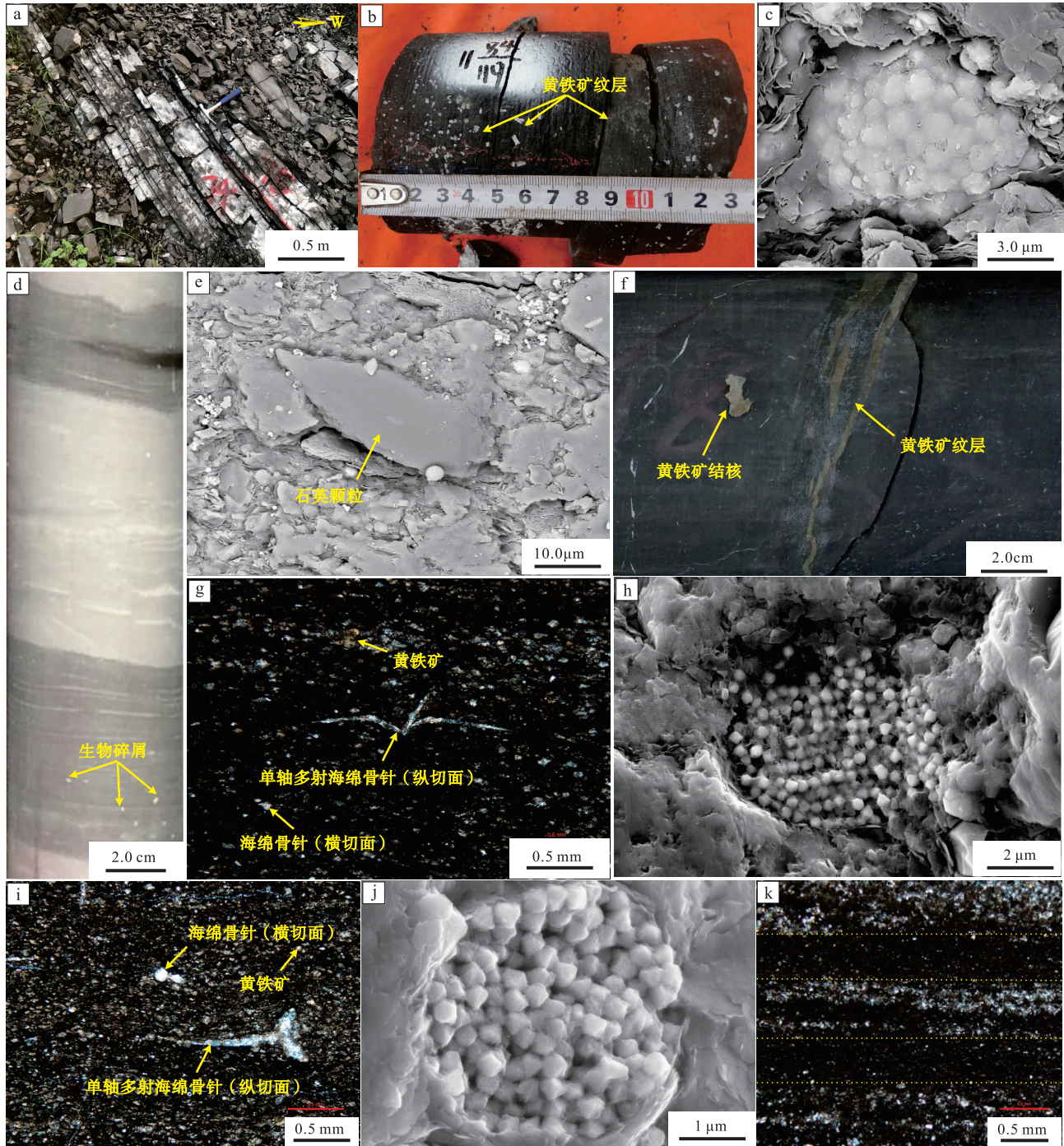


图 5 鄂西地区 YY1 井牛蹄塘组矿物成分垂向变化

Fig. 5 Mineral composition variation of the Niutitang Formation of Well YY1 in western Hubei Province



a—黑色泥岩夹灰色石灰岩，牛一段，罗家村剖面；b—黑色泥岩中生物屑发育，黄铁矿团块发育，牛一段，YY1井，井深3067.60~3067.73 m；c—黑色泥岩中发育草莓状黄铁矿，粒径约7 μm，牛一段，ZD1井，井深825.25 m，扫描电镜；d—灰色石灰岩与深灰色泥岩互层，泥岩中生物屑发育，牛一段，井深380.40~380.60 m；e—石英颗粒，粒径长轴约25 μm，牛一段灰黑色泥岩，ZD2井，井深825.25 m；f—纹层状黄铁矿与团块状黄铁矿，牛二段黑色碳质页岩，ZD1井，井深320.70 m；g—海绵骨针，呈圆形的横切面或单轴单射/单轴多射的纵切面，黄铁矿发育，牛二段黑色含碳钙质页岩，长阳西寺坪剖面；h—草莓状黄铁矿，粒径约6 μm，牛二段黑色碳质页岩，ZD1井，井深351.17 m，扫描电镜；i—海绵骨针，呈圆形的横切面或单轴单射/单轴多射的纵切面，生物屑和黄铁矿发育，牛二段灰黑色含碳含生物屑泥岩，长阳西寺坪剖面；j—草莓状黄铁矿，粒径约4 μm，牛二段，ZD1井，井深269.52 m，扫描电镜；k—泥晶方解石与粉砂、微晶方解石混合物各自集中相间分布形成水平层理，牛二段深灰色含粉砂微晶灰岩，长阳西寺坪剖面

图 6 鄂西地区牛蹄塘组层序格架内各体系域沉积特征

Fig. 6 Sedimentary characteristics of different tract systems of the Niutitang Formation in western Hubei Province

海侵体系域对应牛二段下部, ZD1 井和 YY1 井厚度分别为 38.4 m 和 51.6 m, GR 曲线在高值附近波动, 主要为一套富有机质黑色页岩(图 3-d, 3-e, 3-f), 黑色含碳页岩层面上可见较多的黄铁矿细纹层(图 6-f), 长阳西寺坪剖面牛二段黑色含碳钙质页岩中可见较微弱的水平层理, 可见较多的海绵骨针等硅质生物(图 6-g), 呈圆形的横切面或单轴单射/单轴多射的纵切面, 扫描电镜可见该体系域发育了大量直径小于 10 μm 的草莓状黄铁矿(图 6-h), 表明该时期水体相对较深, 主要以深水还原环境为主。ZD1 井、YY1 井(图 4; 图 5)及西寺坪剖面测试结果显示, 牛蹄塘组 SQ2 海侵体系域岩石矿物成分中石英含量总体较高, 分布于 6.1%~58.2%之间, 平均为 35.5%; 黏土含量具有相反的趋势, 整体分布于 3.7%~59.2%之间, 平均为 19.8%。由于黏土矿物通常来自于陆源输入, 石英含量和黏土矿物含量的镜像变化可能指示石英不是陆源输入来源。TOC 含量较高, 尤其在最大海泛面处, TOC 含量增大至最高值, YY1 井 TOC 平均值为 4.5%。 U_{EF} 、 Mo_{EF} 、 V_{EF} 在牛二段层序底部同样呈现出陡然增大的趋势(图 4; 图 5), 指示水体进一步缺氧的过程, 可能也印证了早寒武世海平面的第 2 次上升。整体上, U_{EF} 、 Mo_{EF} 、 V_{EF} 在该层序内虽有波动, 但均大于牛一段层序的相应值, 说明该时期海平面上升后, 稳定在较高水平。

高位体系域主要为灰黑色页岩夹较多的薄层状石灰岩或钙质页岩夹层, 向上石灰质夹层增多(图 3-f), 长阳西寺坪剖面和白竹岭剖面石灰岩较发育, 岩性为灰色石灰岩夹黑色页岩(图 3-g), 可见较少的海绵骨针等硅质生物, 个体 0.08~0.25 mm, 含微量呈长条形为单轴单射或单轴多射的纵切面, 个体 0.3~1.3 mm, 生物屑有沿微层理面分布的趋势。发育少量黄铁矿, 黄铁矿在反射光下显金黄色, 呈粒状零星分布(图 6-i), 通过扫描电镜亦可观察到少量草莓状黄铁矿发育(图 6-j)。ZD1 井和 YY1 井测试结果显示(图 4; 图 5), 牛蹄塘组 SQ2 高位体系域岩石矿物成分中石英含量有所降低, 主要分布于 12.8%~51.7%之间, 平均值 24.6%, 虽局部发生波动, 但整体呈向上减小的趋势; 黏土含量较高, 主要分布于 11.2%~51.7%之间, 平均为 30.3%, 且显示出向上增大的趋势; TOC 含量明显降低, 多在 2.5%以内, 平均为

1.8%; 该时期海平面开始下降, 主要为深水—浅水陆棚沉积, 黏土矿物含量增大, 说明陆源碎屑输入量开始增大, 该层序顶部深灰色含粉砂微晶灰岩镜下可见含粉砂泥—微晶结构, 粉砂碎屑物成分为石英, 呈次棱角—圆状, 多与微晶方解石混合分布, 说明为近陆环境。泥晶灰岩与粉砂、微晶灰岩混合物各自集中相间分布形成纹层状构造, 即水平层理(图 6-k), 指示了一定的水动力条件。 U_{EF} 、 Mo_{EF} 、 V_{EF} 也表现出明显降低的趋势(图 4; 图 5), 表明了水体由海侵体系域的缺氧环境转变为贫氧—富氧环境。

3.3 层序展布规律

建立高频层序地层格架是进一步开展小层预测的关键环节。通过区域连井层序地层对比, 建立鄂西地区下寒武统牛蹄塘组一段和二段层序地层格架(图 7), 并在该地层格架中揭示目的层页岩多重非均质性的时空展布规律, 最终为牛蹄塘组页岩非均质性和优质岩相预测提供基础。鄂西地区牛蹄塘组一段和二段 2 个三级层序发育齐全, 每个层序均发育海侵体系域和高位体系域, 具有全区可对比性。

牛一段层序(SQ1)厚度较薄, SQ1 厚度最大处位于 ZD1 井, 厚度为 28.11 m, 厚度最小处位于 ZD5 井, 厚度为 1.4 m, 横向上 SQ1 厚度变化较快, 分布不稳定, 厚度由西向东略有增厚的趋势。其中海侵体系域整体厚度略小于高位体系域(图 7)。SQ1 岩性横向变化较小, 在钻井和剖面中表现出相近的岩性特征, 主要岩性包括灰黑色含钙碳质页岩、石灰岩和含碳灰岩等。海侵体系域厚度分布于 0.4~11.6 m, 岩性主要表现为黑色碳质页岩夹钙质泥岩、泥灰岩, 以 ZD2 井厚度最大。ZD1 井、ZD2 井、西寺坪和白竹岭剖面显示 SQ1 海侵体系域 TOC 变化不大, 平均值在 1.3%~2.4%之间, 石英含量以 ZD2 井最大, 最高可达 35.0%。生物碎屑以 YY1 井最为发育。高位体系域厚 1.0~26.4 m, 岩性以灰色石灰岩为主, 夹碳质页岩或与碳质页岩互层, 各钻井和剖面的 TOC 平均值大多在 1.5%以下, 变化较小。

牛二段层序(SQ2)海侵体系域厚度介于 14.8~57.4 m 之间, 以 ZD2 井厚度最小, 最大厚度在 ZD5 井处, 达 57.4 m, 向西的 YD3 井和向东的 ZD2 井已经减薄至 27.7 m 和 14.8 m。SQ2 海侵

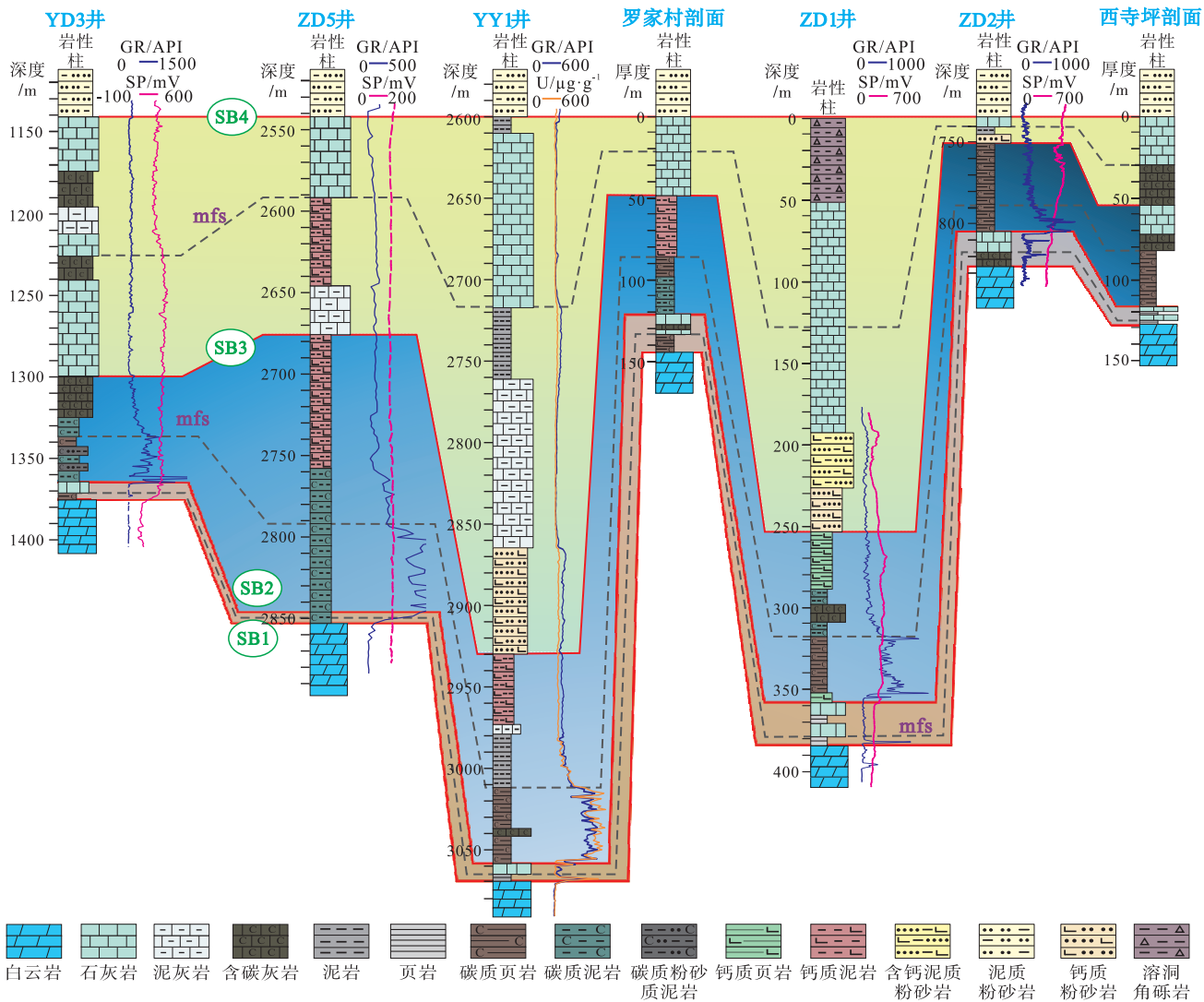


图 7 鄂西地区牛蹄塘组层序地层对比图

Fig. 7 Sequence stratigraphic correlation of the Niutitang Formation in western Hubei Province

体系域岩性横向变化较小，总体表现为一套黑色碳质页岩沉积，发育含钙质泥岩夹层或灰岩透镜体。TOC 在 YY1 井处含量最高，平均为 4.5%，YY1 井、罗家村剖面、ZD1 井 TOC 呈现自西向东减小的趋势，石英含量变化与 TOC 展示出相似的特征，YY1 井石英含量在 8.3%~58.2% 之间，平均值达 35.5%，ZD1 井石英含量在 8.8%~53.1% 之间，平均值为 32.7%。生物屑、海绵骨针和黄铁矿在不同的钻井和剖面 SQ2 海侵体系域中均广泛发育。SQ2 高位体系域的横向变化趋势与海侵体系域类似，ZD5 井处 SQ2 高位体系域厚度达到 118.7 m，西侧 YD3 井减薄至约 36.5 m，东侧西寺坪剖面减薄至 23.0 m。岩性特征方面，西寺坪剖面和 YD3

井以含碳灰岩为主夹钙质泥岩，而在其余剖面和钻井中主要为钙质泥页岩和碳质泥页岩的组合，夹少量的石灰岩夹层。该层序 TOC 总体在 2.5% 以内，除西寺坪剖面和 YD3 井 TOC 较低之外，TOC 横向变化趋势不明显，石英含量以 YY1 井最高，西寺坪剖面和 YD3 井最低，向东略呈减少的趋势。

4 层序演化模式

在对鄂西地区层序界面识别、层序发育特征分析和层序地层格架建立等研究的基础上，认为牛一段—牛二段沉积时期海平面变化对应 4 个演化阶段，由下至上依次为：海平面波动上升阶段（牛一段海侵体系域）、波动下降阶段（牛一段高位体系

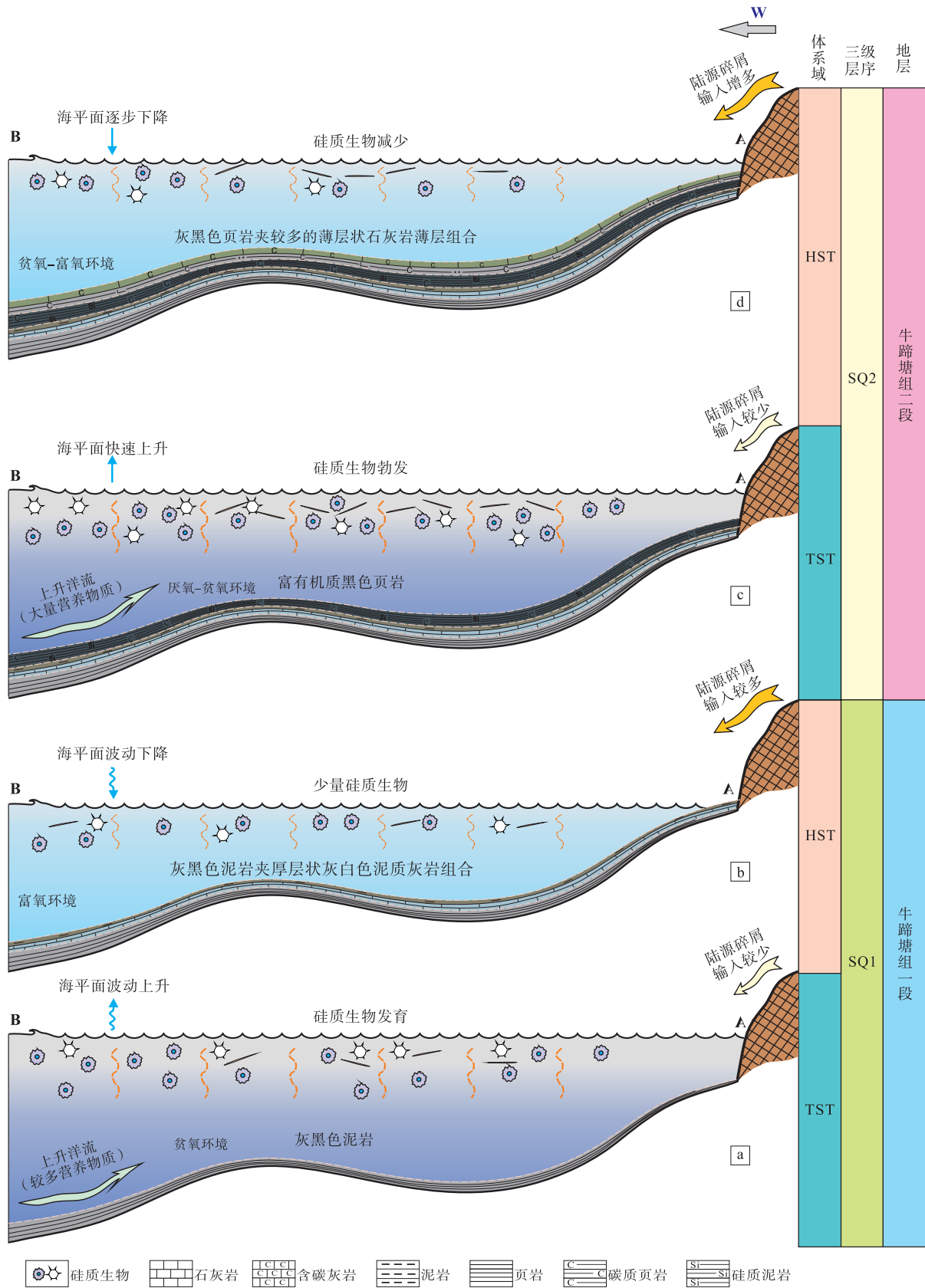


图 8 鄂西地区牛蹄塘组页岩层序地层演化模式

Fig. 8 Sequence stratigraphic evolution model of shale interval of the Niutitang Formation in western Hubei Province

域)、快速上升阶段(牛二段海侵体系域)、逐步下降阶段(牛二段高位体系域),并提出了鄂西地区牛一段层序(SQ1层序)-牛二段层序(SQ2层序)的层序演化模式(图8)。

牛一段层序(SQ1层序)海侵体系域时期,海平面在该层序底部迅速上升,但在该层序内部呈波动上升趋势,沉积环境为受海平面频繁波动引起的深水陆棚相贫氧环境,预示着早寒武世海平面的第1次上升,上升洋流携带了较多的营养物质进入研究区,该时期发育较多的硅质生物(如海绵骨针、放射虫)和藻类(Pi *et al.*, 2013; Liu *et al.*, 2015; Cheng *et al.*, 2016; Li *et al.*, 2018),而藻类与硅质生物具有良好的共生关系,因为藻类是硅质生物的食物来源(Caron *et al.*, 1995; Dennett *et al.*, 2002; Xiang *et al.*, 2013)。这些生物死亡埋藏后,其硅质壳体为灰黑色泥岩中的硅提供了一定的来源(图8-a)。至该层序高位体系域时期,由于海平面呈波动下降趋势,沉积环境从深水陆棚相向浅水陆棚相过渡沉积,海洋的含氧量逐渐增加,可能导致该时期沉积的有机质不能很好地保存下来,造成高位体系域的TOC含量减少,海平面下降也会导致灰色泥质灰岩发育,因此高位体系域以灰黑色泥岩夹厚层状灰白色泥质灰岩组合为主(图8-b)。

牛二段层序(SQ2层序)海侵体系域时期,可能由于全球持续变暖,引起海平面第2次上升,此时底层海水再次转变为缺氧的环境,由于上升洋流作用增强,大量营养物质被输送到研究区海水中,期间大量硅质生物和藻类重现,为该时期黑色页岩中的硅质提供了物质基础,并导致黑色页岩具有较高的硅质含量。该时期海平面既处于相对较高的水平,又处于相对稳定的状态,使底层海水的缺氧状态持续了较长时间,长时期的缺氧环境有利于有机质的保存,为该时期形成大套烃源岩奠定了基础,导致该时期形成厚层的富有机质黑色页岩(图8-c)。进入高位体系域,海平面下降明显,沉积环境逐渐由缺氧环境转变至贫氧-富氧环境,此时依然可见一定的海绵骨针等硅质生物以及藻类,同时受海平面下降的影响,该时期陆源碎屑输入量明显增大,而且还可能伴随一定的碳酸盐沉积,导致该时期以沉积灰黑色页岩夹较多的薄层状石灰岩薄层为主(图8-d)。

5 结论

1) 鄂西地区下寒武统牛蹄塘组一段-二段可识别出3个三级层序界面,分别是牛一段底界(SB1)、牛二段底界(SB2)和牛三段底界(SB3),在牛一段和牛二段内分别识别了最大海泛面(mfs),为层序单元划分奠定了坚实基础。

2) 鄂西地区下寒武统牛蹄塘组一段、二段分别为1个三级层序,均由海侵体系域和高位体系域组成,建立了牛蹄塘组一段、二段的层序地层格架,并阐明了层序地层格架内牛一段和牛二段岩相构成和沉积环境。

3) 建立了较系统的鄂西地区牛蹄塘组一段、二段层序地层垂向演化模式,并以体系域为单元揭示了早寒武世鄂西地区海平面的变化规律,即海平面首先波动上升(牛一段海侵体系域),然后波动下降(牛一段高位体系域),再快速上升(牛二段海侵体系域),最后逐步下降(牛二段高位体系域)的4个演化阶段。

参考文献 (References)

- 邓宏文. 2009. 高分辨率层序地层学应用中的问题探讨. 古地理学报, 11(5): 471-480. [Deng H W. 2009. Discussion on problems of applying high resolution sequence stratigraphy. Journal of Palaeogeography (Chinese Edition), 11(5): 471-480]
- 邓宏文, 王洪亮, 李熙喆. 1996. 层序地层地层基准面的识别、对比技术及应用. 石油与天然气地质, 17(3): 177-184. [Deng H W, Wang H L, Li X Z. 1996. Identification and correlation techniques of sequence stratigraphic base-levels and their application. Oil & Gas Geology, 17(3): 177-184]
- 郭旭升. 2017. 上扬子地区五峰组-龙马溪组页岩层序地层及演化模式. 地球科学, 42(7): 1069-1082. [Guo X S. 2017. Sequence stratigraphy and evolution model of shale strata in Wufeng-Longmaxi Formation, Upper Yangtze region. Earth Science, 42(7): 1069-1082]
- 胡罗嘉, 黄世伟, 谭万仓, 谭秀成, 苏成鹏, 胡笙, 李明隆, 刘菲, 冯亮. 2021. 四川盆地东部二叠系茅口组层序地层特征及地质意义. 海相油气地质, 26(4): 357-366. [Hu L J, Huang S W, Tan W C, Tan X C, Su C P, Hu S, Li M L, Liu F, Feng L. 2021. Sequence stratigraphic characteristics and geological significance of Permian Maokou Formation in eastern Sichuan Basin. Marine Origin Petroleum Geology, 26(4): 357-366]
- 胡忠贵, 秦鹏, 胡明毅, 邱小松, 左滔. 2018. 湘鄂西地区下寒武统水井沱组页岩储层分布及非均质性特征. 中国石油勘探, 23(4): 39-50. [Hu Z G, Qin P, Hu M Y, Qiu X S, Zuo T. 2018. Distribution and heterogeneity characteristics of shale reservoirs in the Lower

- Cambrian Shuijingtuo Formation, Western Hunan and Hubei. *China Petroleum Exploration*, 23(4): 39–50]
- 姜在兴. 2010. 沉积体系及层序地层学研究现状及发展趋势. 石油与天然气地质, 31(5): 535–541, 514. [Jiang Z X. 2010. Studies of depositional systems and sequence stratigraphy: the present and the future. *Oil & Gas Geology*, 31(5): 535–541, 514]
- 林畅松, 张燕梅, 刘景彦, 庞保成. 2000. 高精度层序地层学和储层预测. 地学前缘, 7(3): 111–117. [Lin C S, Zhang Y M, Liu J Y, Pang B C. 2000. High resolution sequence stratigraphy and reservoir prediction. *Earth Science Frontiers*, 7(3): 111–117]
- 刘忠宝, 杜伟, 高波, 胡宗全, 张钰莹, 吴靖, 冯动军. 2018. 层序格架中富有机质页岩发育模式及差异分布: 以上扬子下寒武统为例. 吉林大学学报(地球科学版), 48(1): 1–14. [Liu Z B, Du W, GAO B, Hu Z Q, Zhang Y Y, Wu J, Feng D J. 2018. Development pattern and differential distribution of organic-rich shales in sequence framework: the Upper Yangtze Lower Cambrian Series as an example. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 48(1): 1–14]
- 陆扬博, 马义权, 王雨轩, 陆永潮. 2017. 上扬子地区五峰组—龙马溪组主要地质事件及岩相沉积响应. 地球科学, 42(7): 1169–1184. [Lu Y B, Ma Y Q, Wang Y X, Lu Y C. 2017. Major geological events and lithofacies sedimentary responses of Wufeng–Longmaxi Formation in Upper Yangtze region. *Earth Science*, 42(7): 1169–1184]
- 梅冥相, 张丛, 张海, 孟小庆, 陈永红. 2006. 上扬子区下寒武统的层序地层格架及其形成的古地理背景. 现代地质, 20(2): 195–208. [Mei M X, Zhang C, Zhang H, Meng X Q, Chen Y H. 2006. Sequence stratigraphic framework of the Lower Cambrian in the Upper Yangtze region and its paleogeographic setting. *Geoscience*, 20(2): 195–208]
- 王必金, 包汉勇, 郭战峰, 陈锦琨. 2013. 湘鄂西区寒武系层序划分及其对油气勘探的意义. 石油实验地质, 35(4): 372–377. [Wang B J, Bao H Y, Guo Z F, Chen M K. 2013. Sequence stratigraphic division of Cambrian in western Hunan-Hubei and applications for petroleum exploration. *Petroleum Geology & Experiment*, 35(4): 372–377]
- 王传尚, 李旭兵, 白云山, 刘安. 2011. 湘西北地区震旦系斜坡相区层序地层划分与对比. 地质通报, 30(10): 1538–1546. [Wang C S, Li X B, Bai Y S, Liu A. 2011. The classification and correlation of Sinian sequence stratigraphy on the slope zone in northwestern Hunan Province. *Geological Bulletin of China*, 30(10): 1538–1546]
- 王传尚, 李旭兵, 李志宏, 白云山, 刘安, 曾雄伟, 周鹏, 彭中勤. 2012. 中上扬子区寒武纪层序地层划分与对比. 地层学杂志, 36(4): 773–783. [Wang C S, Li X B, Li Z H, Bai Y S, Liu A, Zeng X W, Zhou P, Peng Z Q. 2012. Cambrian sequence-stratigraphy in the middle and upper Yangtze Platform. *Journal of Stratigraphy*, 36(4): 773–783]
- 王冠平, 朱彤, 王红亮, 吴靖, 杜伟, 冯动军, 王濡岳. 2019. 海相页岩综合层序地层划分及垂向分布特征: 以川东南地区五峰组—龙马溪组为例. 沉积学报, 37(2): 330–344. [Wang G P, Zhu T, Wang H L, Wu J, Du W, Feng D J, Wang R Y. 2019. Integrated sequence stratigraphic division and vertical distribution characteristics of marine shale: a case study of the Wufeng Formation–Longmaxi Formation in southeastern Sichuan Basin. *Acta Sedimentologica Sinica*, 37(2): 330–344]
- 王鸿祯, 史晓颖. 1998. 沉积层序及海平面旋回的分类级别: 旋回周期的成因讨论. 现代地质, 12(1): 2–17. [Wang H Z, Shi X Y. 1998. Hierarchy of depositional sequences and Eustatic cycles: a discussion on the mechanism of sedimentary cycles. *Geoscience*, 12(1): 2–17]
- 魏小松, 严德天, 龚银, 牛杏, 梁万乐, 伏海蛟, 刘紫璇, 杨向荣, 张宝. 2024. 鄂西—黔南地区下寒武统页岩旋回地层学研究. 沉积学报, 42(3): 823–838, 719. [Wei X S, Yan D T, Gong Y, Niu X, Liang W L, Fu H J, Liu Z X, Yang X R, Zhang B. 2024. Cyclostratigraphic analysis of the Lower Cambrian shales in western Hubei and southern Guizhou. *Acta Sedimentologica Sinica*, 42(3): 823–838, 719]
- 谢环羽, 姜在兴, 王培玺, 谢武仁, 杨羽. 2021. 中—上扬子地区寒武系层序地层格架. 石油学报, 42(7): 865–884. [Xie H Y, Jiang Z X, Wang P X, Xie W R, Yang Y. 2021. Sequence stratigraphic framework of Cambrian in Middle–Upper Yangtze region. *Acta Petroleologica Sinica*, 42(7): 865–884]
- 郑荣才, 尹世民, 彭军. 2000. 基准面旋回结构与叠加样式的沉积动力学分析. 沉积学报, 18(3): 369–375. [Zheng R C, Yin S M, Peng J. 2000. Sedimentary dynamic analysis of sequence structure and stacking pattern of base: level cycle. *Acta Sedimentologica Sinica*, 18(3): 369–375]
- Abouelresh M O, Slatt R M. 2012. Lithofacies and sequence stratigraphy of the Barnett shale in east-central Fort Worth Basin, Texas. *AAPG Bulletin*, 96(1): 1–22.
- Algeo T J, Maynard J B. 2004. Trace-element behavior and redox facies in core shales of Upper Pennsylvanian Kansas-type cyclothems. *Chemical Geology*, 206(3–4): 289–318.
- Caron D A, Michaels A F, Swanberg N R, Howse F A. 1995. Primary productivity by symbiont-bearing planktonic sarcodines (Acantharia, Radiolaria, Foraminifera) in surface waters near Bermuda. *Journal of Plankton Research*, 17(1): 103–129.
- Catuneanu O, Zecchin M. 2013. High-resolution sequence stratigraphy of clastic shelves II: controls on sequence development. *Marine and Petroleum Geology*, 39(1): 26–38.
- Cheng M, Li C, Zhou L, Algeo T J, Zhang F F, Romaniello S, Jin C S, Lei L D, Feng L J, Jiang S Y. 2016. Marine Mo biogeochemistry in the context of dynamically euxinic mid-depth waters: a case study of the lower cambrian niutitang shales, South China. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 183: 79–93.
- Compston W, Zhang Z C, Cooper J A, Ma G G, Jenkins R J F. 2008. Further SHRIMP geochronology on the early Cambrian of South China. *American Journal of Science*, 308: 399–420.
- Dennett M R, Caron D A, Michaels A F, Gallager S M, Davis C S. 2002. Video plankton recorder reveals high abundances of colonial Radio-

- laria in surface waters of the central North Pacific. *Journal of Plankton Research*, 24(8): 797–805.
- Guo Q J, Strauss H, Liu C Q, Goldberg T, Zhu M Y, Pi D H, Heubeck C, Vernhet E, Yang X L, Fu P Q. 2007. Carbon isotopic evolution of the terminal Neoproterozoic and early Cambrian: evidence from the Yangtze platform, south China. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 254(1–2): 140–157.
- Hammes U, Frébourg G. 2012. Haynesville and Bossier mudrocks: a facies and sequence stratigraphic investigation, East Texas and Louisiana, USA. *Marine and Petroleum Geology*, 31(1): 8–26.
- Hemmesch N T, Harris N B, Mnich C A, Selby D. 2014. A sequence-stratigraphic framework for the Upper Devonian Woodford Shale, Permian Basin, West Texas. *AAPG Bulletin*, 98(1): 23–47.
- Jiang G Q, Shi X Y, Zhang S H, Wang Y, Xiao S H. 2011. Stratigraphy and paleogeography of the Ediacaran Doushantuo Formation (ca. 635–551 Ma) in South China. *Gondwana Research*, 19(4): 831–849.
- Jiang G Q, Wang X Q, Shi X Y, Xiao S H, Zhang S H, Dong J. 2012. The origin of decoupled carbonate and organic carbon isotope signatures in the early Cambrian (ca. 542–520 Ma) Yangtze Platform. *Earth and Planetary Science Letters*, 317–318: 96–110.
- Kohl D, Slingerland R, Arthur M, Bracht R, Engelder T. 2014. Sequence stratigraphy and depositional environments of the Shamokin (Union Springs) member, Marcellus Formation, and associated strata in the middle Appalachian Basin. *AAPG Bulletin*, 98(3): 609–617.
- Li J, Tang S H, Zhang S H, Xi Z D, Yang N, Yang G Q, Li L, Li Y P. 2018. Paleo-environmental conditions of the Early Cambrian Niutitang Formation in the Fenggang area, the southwestern margin of the Yangtze platform, southern China: evidence from major elements, trace elements and other proxies. *Journal of Asian Earth Sciences*, 159: 81–97.
- Li Z X, Bogdanova S V, Collins A S, Davidson A, Waele B D, Ernst R E, Fitzsimons I C W, Fuck R A, Gladkochub D P, Jacobs J, Karlstrom K E, Lu S, Natapov L M, Pease V, Pisarevsky S A, Thrane K, Vernikovsky V. 2008. Assembly, configuration, and break-up history of Rodinia: a synthesis. *Precambrian Research*, 160(1–2): 179–210.
- Li Z Y, Schieber J. 2020. Application of sequence stratigraphic concepts to the Upper Cretaceous Tununk Shale Member of the Mancos Shale Formation, south-central Utah: parasequence styles in shelfal mudstone strata. *Sedimentology*, 67(1): 118–151.
- Liu Z H, Zhuang X G, Teng G E, Xie X M, Yin L M, Bian L Z, Feng Q L, Algeo T J. 2015. The lower Cambrian Niutitang formation at Yangtiao (Guizhou, SW China): organic matter enrichment, source rock potential, and hydrothermal influences. *Journal of Petroleum Geology*, 38(4): 411–432.
- Ma Y Q, Lu Y C, Liu X F, Zhai G Y, Wang Y F, Zhang C. 2019. Depositional environment and organic matter enrichment of the lower Cambrian Niutitang shale in western Hubei Province, South China. *Marine and Petroleum Geology*, 109: 381–393.
- Miall A D. 1991. Stratigraphic sequences and their chronostratigraphic correlation. *Journal of Sedimentary Research*, 61(4): 497–505.
- Nance W B, Taylor S R. 1976. Rare earth element patterns and crustal evolution-I Australian post-Archean sedimentary rocks. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 40(12): 1539–1551.
- Niu X, Yan D T, Zhuang X G, Liu Z X, Li B Q, Wei X S, Xu H W, Li D W. 2018. Origin of quartz in the lower Cambrian Niutitang formation in south Hubei Province, Upper Yangtze Platform. *Marine and Petroleum Geology*, 96: 271–287.
- Pi D H, Liu C Q, Shields-Zhou G A, Jiang S Y. 2013. Trace and rare earth element geochemistry of black shale and kerogen in the early Cambrian Niutitang formation in Guizhou Province, South China: constraints for redox environments and origin of metal enrichments. *Precambrian Research*, 225: 218–229.
- Slatt R M, Rodriguez N D. 2012. Comparative sequence stratigraphy and organic geochemistry of gas shales: commonality or coincidence? *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 8: 68–84.
- Steiner M, Li G X, Qian Y, Zhu M Y, Erdtmann B D. 2007. Neoproterozoic to Early Cambrian small shelly fossil assemblages and a revised biostratigraphic correlation of the Yangtze Platform (China). *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 254(1–2): 67–99.
- Tribouillard N, Algeo T J, Lyons T, Riboulleau A. 2006. Trace metals as paleoredox and paleoproductivity proxies: an update. *Chemical Geology*, 232(1–2): 12–32.
- Wang G C, Carr T R. 2012. Methodology of organic-rich shale lithofacies identification and prediction: a case study from Marcellus Shale in the Appalachian basin. *Computers & Geosciences*, 49: 151–163.
- Wang G C, Carr T R. 2013. Organic-rich Marcellus Shale lithofacies modeling and distribution pattern analysis in the Appalachian Basin. *AAPG Bulletin*, 97(12): 2173–2205.
- Wang J, Li Z X. 2003. History of Neoproterozoic rift basins in South China: implications for Rodinia break-up. *Precambrian Research*, 122(1–4): 141–158.
- Xiang Y, Feng Q L, Shen J, Zhang N. 2013. Changhsingian radiolarian fauna from Anshun of Guizhou, and its relationship to TOC and paleo-productivity. *Science China Earth Sciences*, 56: 1334–1342.
- Xu L L, Huang S P, Liu Z X, Wen Y R, Zhou X H, Zhang Y L, Li X W, Wang D, Luo F, Chen C. 2021. Geological controls of shale gas accumulation and enrichment mechanism in Lower Cambrian Niutitang Formation of western Hubei, Middle Yangtze, China. *Frontiers of Earth Science*, 15: 310–331.
- Zecchin M, Catuneanu O. 2013. High-resolution sequence stratigraphy of clastic shelves I: units and bounding surfaces. *Marine and Petroleum Geology*, 39(1): 1–25.
- Zhang T, Li Y F, Fan T L, Silva A C D, Shi J Y, Gao Q, Kuang M Z, Liu W W, Gao Z Q, Li M S. 2022. Orbitally-paced climate change in the early Cambrian and its implications for the history of the Solar System. *Earth and Planetary Science Letters*, 583: 117420.

(责任编辑 郑秀娟; 英文审校 龚承林)