

引用格式:赵威,蔡全升,胡忠贵,等. 2026. 川东—鄂西地区五峰组—龙马溪组黑色岩系沉积特征差异与成因机制[J]. 沉积学报, 44(4): 1552-1569.

ZHAO Wei, CAI QuanSheng, HU ZhongGui, et al. 2026. Sedimentary Differences and Formation Mechanism of the Wufeng Formation - Longmaxi Formation Black Rock Series in Eastern Sichuan and Western Hubei[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 44(4): 1552-1569.

DOI: 10.14027/j.issn.1000-0550.2024.103

CSTR: 32268.14/j.cjxb.62-1038.2024.103

川东—鄂西地区五峰组—龙马溪组黑色岩系沉积特征差异与成因机制

赵威¹, 蔡全升^{1,2}, 胡忠贵¹, 吕品扬¹, 杨智³, 李孟骁¹, 温雅茹², 张宸瑜¹

1. 长江大学地球科学学院, 武汉 430100

2. 资源与生态环境地质湖北省重点实验室, 湖北省地质局, 武汉 430034

3. 中国石油勘探开发研究院, 北京 100083

摘要 【目的】川东与鄂西地区五峰组—龙马溪组黑色岩系是我国南海相页岩气勘探的重点地区,明确两地黑色岩系差异沉积特征及形成机制对于深化奥陶纪—志留纪之交扬子地区古环境与古气候认识,促进鄂西地区页岩气勘探评价具有重要意义。【方法】选取川东焦石坝与鄂西宜昌地区五峰组—龙马溪组典型地质剖面,通过开展岩石学、沉积学与地球化学分析,对两地黑色岩系差异发育特征、主控因素及差异沉积模式进行了综合研究。【结果】川东与鄂西地区五峰组黑色岩系发育特征基本相似,但两地龙马溪组黑色岩系沉积特征差异明显。川东地区龙马溪组黑色富有机质页岩不仅厚度大,笔石序列完整,同时在鲁丹阶—埃隆阶之交发育一套厚层粉砂质页岩,其上被厚层黑色富有机质泥页岩再次覆盖,但川东地区富有机质页岩中石英含量略低。鄂西地区龙马溪组黑色富有机质页岩厚度不仅薄,鲁丹阶—埃隆阶之交也未见粉砂质页岩,而是发育了一套薄层的含灰云质泥岩,且缺失了 *Coronograptus cyphus* 笔石带与 *Demirastrites triangulatus* 笔石带,含灰云质泥岩之上仅见薄层富有机质页岩。【结论】古构造与古气候变化是控制川东焦石坝与鄂西宜昌地区五峰组—龙马溪组黑色岩系差异发育的主要原因。晚奥陶世,川东焦石坝与鄂西宜昌地区整体以构造沉降为主,两地黑色岩系沉积环境基本相似。志留纪初期,川东地区表现为持续性沉降,而鄂西地区表现为相对隆升,导致两地沉积环境出现明显不同,而鲁丹阶—埃隆阶之交全球性冰川活动增强导致的全球海平面快速下降,进一步扩大了两地黑色岩系的沉积差异,导致鄂西宜昌地区在鲁丹阶—埃隆阶之交出现了沉积间断。至埃隆期,两地地貌的差别进一步使得川东地区黑色岩系的发育终止期晚于鄂西地区,最终导致了两地黑色岩系的显著不同。

关键词 五峰组;龙马溪组;沉积差异;川东地区;鄂西地区

第一作者 赵威,男,2003年出生,本科,资源勘查工程,E-mail: 13647199133@163.com

通信作者 蔡全升,男,副教授,储层沉积学与非常规油气地质,E-mail: cqsh0713@163.com

中图分类号:P618.13 文献标志码:A 文章编号:1000-0550(2026)04-1552-18

0 引言

四川盆地上奥陶统五峰组—下志留统龙马溪组黑色岩系作为我国南海相页岩气勘探的主要目标层系,显示出了巨大的勘探潜力(邹才能等,2015; Dong *et al.*, 2018; 杨平等,2019)。事实上,五峰组—龙马溪组黑色岩系除在四川盆地发育外,在我国南方鄂、湘、黔等地区也广泛分布,同样具有良好的勘

探前景(蔡全升等,2021,2024;王兴等,2024)。近年来,中石油、中石化以及多家地勘单位先后围绕盆外五峰组—龙马溪组黑色岩系开展了大量页岩气地质调查工作,并取得了积极进展,其中鄂西地区页岩气勘探成果较为显著。然而,与川东焦石坝地区动辄数十万立方米的页岩气日产能相比,鄂西地区五峰组—龙马溪组黑色岩系单井产能与含气性明显偏低(蔡全升等,2021)。导致这一差异的原因除了构造

收稿日期:2024-06-26;修回日期:2024-09-02;录用日期:2024-10-08;网络出版日期:2024-10-08

基金项目:中石油科技创新基金项目(2021DQ02-0101);资源与生态环境地质湖北省重点实验室开放基金项目(HBREGKFJJ-202305);大学生创新创业训练计划项目(Yz2022011)

保存条件不同之外,富有机质页岩的发育规模与品质也被认为是一个关键因素。

前人研究表明,受晚奥陶世—早志留世板块运动与全球气候巨变的影响,上扬子川东—中扬子鄂西地区的古地貌与海平面在奥陶纪—志留纪之交发生了显著变化(Chen *et al.*, 2004; Yan *et al.*, 2010),广西运动或由此推动的“宜昌上升”使得湘西石门—鄂西五峰一带形成了隆起构造,并将当时的整个扬子地区划分为前渊和隆后两个主要沉积区(张琳娜等, 2016; 肖斌等, 2021; Cai *et al.*, 2022)。川东(焦石坝)与鄂西(宜昌地区)作为隆后沉积区的一部分,在全球海平面升降的影响下,均沉积了包括观音桥段在内的五峰组—龙马溪组黑色岩系(Chen *et al.*, 2004; Fan *et al.*, 2011; 李琪琪等, 2021; 卢贤志等, 2021; Maletz *et al.*, 2021)。然而,地质综合研究显示两地黑色岩系沉积厚度与岩性序列具有明显差别,特别是龙马溪组黑色页岩层段,川东地区沉积厚度显著大于鄂西宜昌地区(翟刚毅等, 2017; 陈孝红等, 2018; 聂海宽等, 2020),并且最新的研究表明,鄂西宜昌地区龙马溪组黑色页岩存在沉积间断(Maletz *et al.*, 2021; Cai *et al.*, 2022)。然而,目前对于川东与鄂西地区五峰组—龙马溪组黑色岩系还缺乏系统的对比研究,两地黑色岩系沉积差异特征及形成机制尚不清楚,这不仅阻碍了对奥陶纪—志留纪之交扬子地区沉积古环境的认识,同时也制约了鄂西地区五峰组—龙马溪组黑色岩系页岩气勘探潜力的评价。

为此,本文在前人研究的基础上,选择具有代表性的钻井与关键地质剖面,对川东(焦石坝)及鄂西(宜昌)地区五峰组—龙马溪组黑色岩系开展系统的岩石学、沉积学与地球化学等多学科精细解剖与对比研究,明确两地黑色岩系发育特征及差异,探讨川东与鄂西地区五峰组—龙马溪组黑色岩系差异发育成因机制,建立差异沉积演化模式,以期深化奥陶纪—志留纪之交扬子地区沉积古地理认识与促进鄂西地区页岩气勘探与精细评价提供参考。

1 区域地质概况

1.1 构造—沉积背景

晚奥陶世至早志留世,受加里东造山运动的影响,整个华南地区沉积古地理背景发生了显著变化(Chen *et al.*, 2004; Yan *et al.*, 2010)。华夏地块向扬

子地块的汇聚挤压导致扬子海盆基底发生了不均一沉降,并在扬子周缘及内部形成了多个隆起(王悻等, 2013; Li *et al.*, 2019; Wang *et al.*, 2019),使得奥陶纪—志留纪之交扬子地区的沉积环境由碳酸盐岩台地过渡为隆凹相间的半局限陆棚环境(Chen *et al.*, 2004; 苏文博等, 2006; Melchin *et al.*, 2013; 陈旭等, 2015; Lu *et al.*, 2019; Huang *et al.*, 2020)(图1)。与此同时,受全球冰川型海平面上升的显著影响,整个扬子地区沉积水体在奥陶纪—志留纪之交处于低能、缺氧的欠补偿状态(牟传龙等, 2011; Yan *et al.*, 2019),区域上形成了一套富含有机质的五峰组—龙马溪组黑色岩系(图1c),但不同地区黑色岩系的厚度与沉积序列具有明显差别。

本研究主要对比研究区为川东焦石坝与鄂西宜昌地区。川东焦石坝地区作为我国首个实现商业化开采的页岩气田所在地,该区上奥陶统五峰组一下志留统龙马溪组黑色岩系厚度普遍较大,以JY1井为例,TOC含量大于1%的黑色岩系厚度可达70 m。鄂西宜昌斜坡区作为近年来盆外页岩气勘探的热点地区,五峰组—龙马溪组黑色岩系厚度与之相比明显偏薄,以YY2井为例,黑色岩系厚度仅20 m。

1.2 地层特征

上奥陶统五峰组一下志留统龙马溪组作为扬子地区奥陶纪—志留纪之交的主要沉积产物,分布广泛。其中五峰组底界以灰黑色泥页岩与临湘组灰岩分界,顶界以薄层富含赫南特贝的观音桥层介壳灰岩与龙马溪组黑色页岩为界(Liu *et al.*, 2001; Fan *et al.*, 2011; Gorjan *et al.*, 2012; Huang *et al.*, 2018),五峰组整个厚度普遍小于10 m。龙马溪组黑色岩系主要集中在底部,向上过渡为灰色或灰绿色粉砂质泥页岩或粉砂岩,厚度区域变化较大(Chen *et al.*, 2004; Fan *et al.*, 2011; Gorjan *et al.*, 2012)(图1c、图2)。根据Fan *et al.*(2011)和Chen *et al.*(2015)提出的笔石生物地层划分方案,扬子地区五峰组可主要划分为*Dicellograptus complexus*, *Paraorthograptus pacificus*和*Normalograptus extraordinarius*三个笔石带,龙马溪组黑色岩系主要划分为赫南特阶的*Normalograptus persculptus*笔石带,鲁丹阶*Akidograptus ascensus*、*Parakidograptus acuminatus*、*Cystograptus vesiculosus*和*Coronograptus cyphus*笔石带,以及埃隆阶的*Demirastrites triangulatus*、*Lituigraptus convolutus*和*Stimulograptus sedgwickii*笔石带。但由于不同地区构

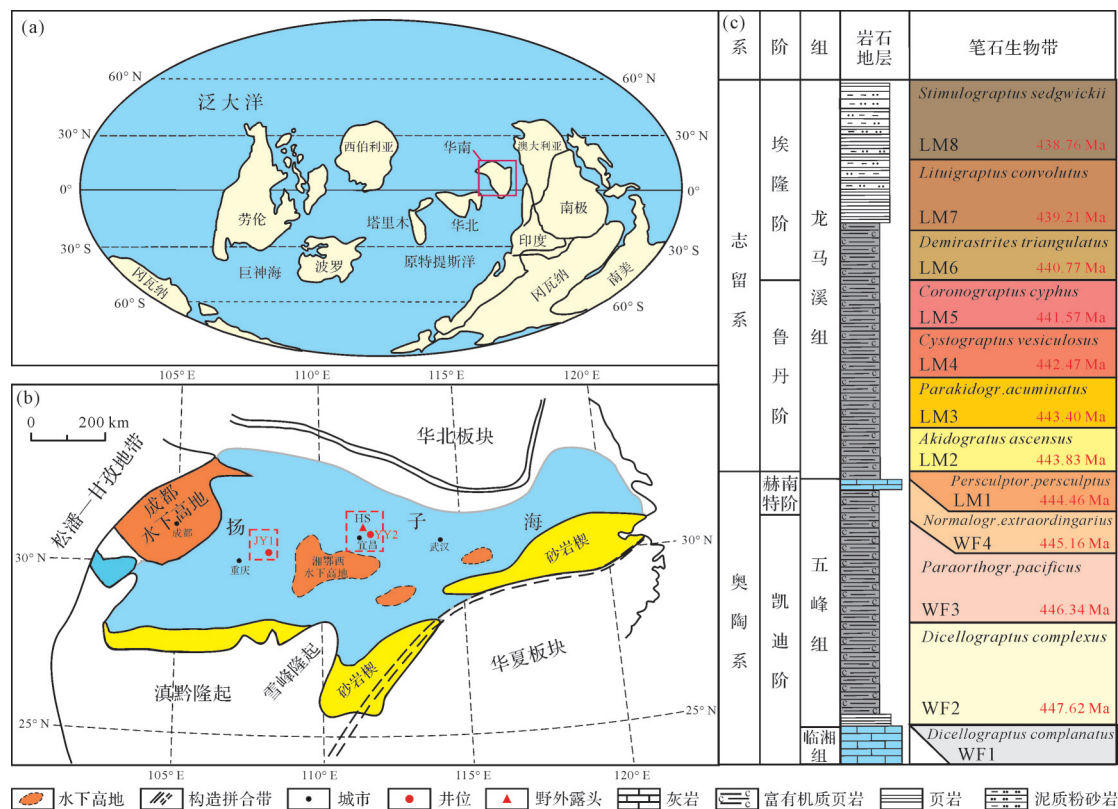


图1 (a)奥陶纪—志留纪之交扬子地区古构造位置(据 Melchin *et al.*, 2013; Lu *et al.*, 2019 修改)、(b)沉积古地理格局(据 Chen *et al.*, 2004 修改)及(c)同期黑色岩系沉积序列(据 Fan *et al.*, 2011; 陈旭等, 2015; Wang *et al.*, 2021 修改)

Fig.1 (a) Global paleogeography showing the position of the South China Plate during the Ordovician-Silurian transition period (modified from Melchin *et al.*, 2013; Lu *et al.*, 2019); (b) Ordovician-Silurian paleogeography of the Yangtze Block (modified from Chen *et al.*, 2004); (c) stratigraphy of the Wufeng Formation-Longmaxi Formation black rock series in the Yangtze area (modified from Fan *et al.*, 2011; Chen *et al.*, 2015; Wang *et al.*, 2021)

造古地貌存在差异,部分地区五峰组—龙马溪组笔石序列并不完整,如湘鄂西隆起区湘鄂渝交界处常缺 *Normalograptus extraordinarius*、*Normalograptus persculptus*、*Akidograptus ascensus* 笔石带。

根据前人研究成果,本次研究的川东地区五峰组—龙马溪组黑色岩系笔石序列发育完整,以 JY1 井为例,黑色富有机质页岩层厚度约 70 m,只是在鲁丹阶—埃隆阶之交的 *Coronograptus cyphus* 笔石带与 *Demirastrites triangulatus* 笔石带发育厚层粉砂质泥页岩(Fan *et al.*, 2011; Chen *et al.*, 2015)。与川东地区相比,本次研究的鄂西宜昌斜坡区五峰组—龙马溪组黑色岩系厚度明显减薄,以 YY2 井为例,黑色岩系仅 20 m。由于不在湘鄂西古隆起范围内(图 1b),该区五峰组—龙马溪组赫南特阶上下地层笔石序列完整,剖面上可见观音桥段介壳灰岩,但最新的研究成果显示其缺失了鲁丹阶—埃隆阶之交的

Coronograptus cyphus 笔石带与 *Demirastrites triangulatus* 笔石带(Maletz *et al.*, 2021; Cai *et al.*, 2022)。

对比关键剖面分析可以发现(图2),川东与鄂西宜昌地区五峰组笔石序列完整, *Dicellograptus complexus* 和 *Paraorthograptus pacificus* 笔石带均发育,以黑色富有机质页岩为主,川东地区厚约 4.5 m,鄂西宜昌地区厚约 5.6 m。 *Normalograptus extraordinarius* 笔石带对应的观音桥段介壳灰岩在川东与鄂西宜昌地区皆可见到,只是厚度普遍较薄。川东地区龙马溪组黑色岩系笔石序列完整,整体厚约 65 m,最高层位上延至 *Stimulograptus sedgwickii* 笔石带,其中在鲁丹阶—埃隆阶之交的 *Coronograptus cyphus* 笔石带与 *Demirastrites triangulatus* 笔石带沉积了约 24 m 厚的粉砂质泥页岩段;而鄂西宜昌地区,黑色岩系仅上延至 *Lituigraptus convolutus* 笔石带,厚度约 14 m,并且

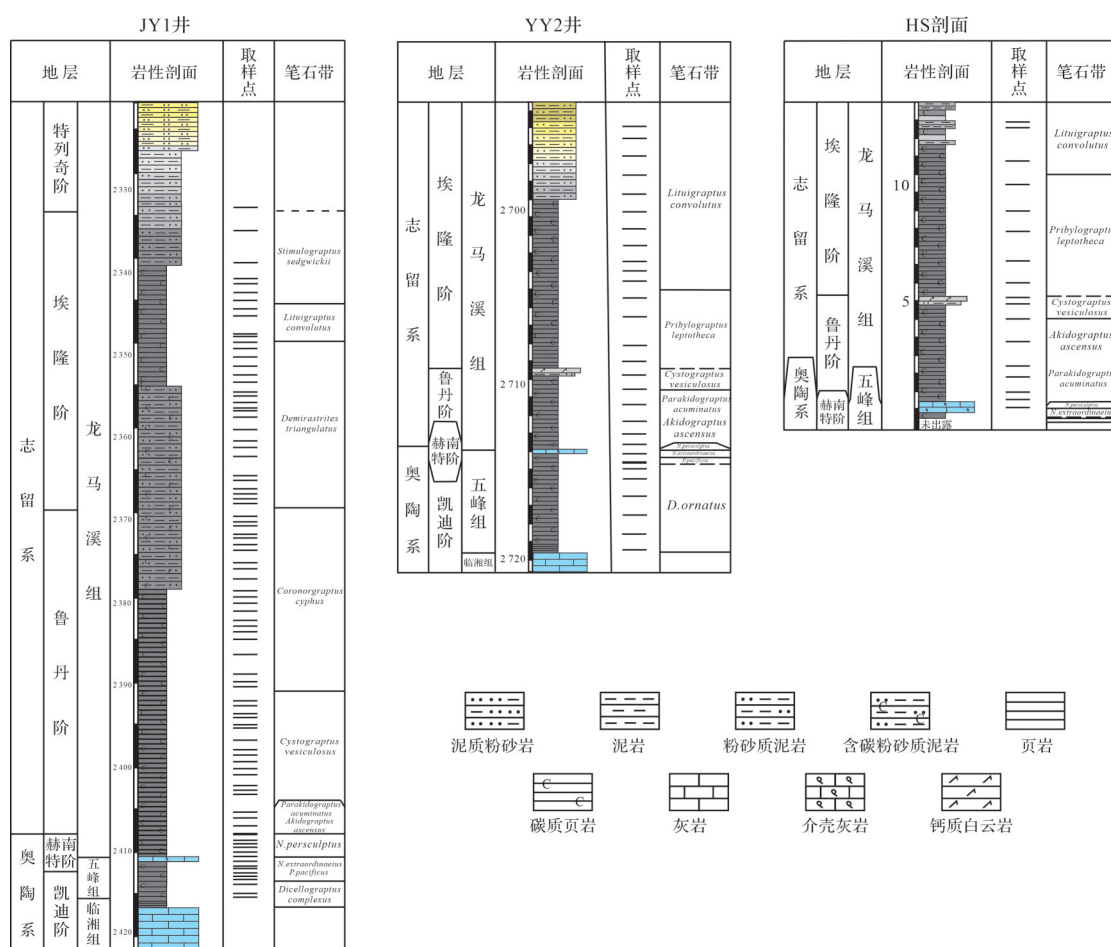


图2 川东与鄂西地区研究剖面五峰组—龙马溪组地层序列与样品位置

Fig.2 Profiles from eastern Sichuan and western Hubei showing stratigraphic successions and sample locations in the Wufeng Formation-Longmaxi Formation

缺失了 *Coronagraptus cyphus* 笔石带与 *Demirastrites triangulatus* 笔石带 (Maletz *et al.*, 2021)。这些现象表明川东与鄂西宜昌地区五峰组—龙马溪组黑色岩系存在明显差异。

2 样品与分析方法

选取川东 JY1 井、鄂西 YY2 井以及 HS 剖面作为本次研究的关键地质剖面,进而对两地五峰组—龙马溪组黑色岩系进行详细解剖。其中 YY2 井五峰组—龙马溪组黑色岩系采集样品 31 个,HS 剖面五峰组—龙马溪组黑色岩系采集样品 17 个。上述样品在中国地质调查局中南矿产资源监督测试中心完成了 TOC 以及主、微量元素分析测试,TOC 分析测试采用的是 LECO CS-600 碳硫分析仪,主量元素分析采用的是 Epsilon 5 X 射线荧光光谱仪,微量元素分析采用的是 X Series 2 质谱仪。岩矿分析在数岩科技采用

Bruker D8 Advance 粉末 X 射线衍射仪完成。川东 JY1 井样品岩石学及地球化学分析测试数据分别来自文献 (Ma *et al.*, 2016; Liu *et al.*, 2017)。

在数据处理中,采用富集系数表征古海洋的氧化还原条件以及古生产力 (Algeo and Liu, 2020)。其中富集系数计算方式为 $X_{EF} = (X/Al)_{\text{样品}} / (X/Al)_{\text{PAAS}}$, $(X/Al)_{\text{样品}}$ 代表样品中分析元素与 Al 元素的浓度比值, $(X/Al)_{\text{PAAS}}$ 为后太古宙澳大利亚页岩中的分析元素与 Al 元素的浓度比值 (Taylor and McLennan, 1985)。 $X_{EF} > 1$ 代表元素富集, $X_{EF} < 1$ 代表贫乏。同时,对黑色岩系中的化学风化指数 (CIA) 进行了估算 (Nesbitt and Young, 1982; McLennan, 1993; Price and Velbel, 2003; Wang *et al.*, 2020), 估算公式为: $CIA = Al_2O_3 / (Al_2O_3 + CaO^* + Na_2O + K_2O)$, 其中 CaO^* 可以通过 P_2O_5 与 Na_2O 进行校正 (McLennan, 1993)。此外,研究过程中采用过量硅 (剔除正常陆源沉积硅之外的硅含量) 来表征古环境变化,其含量计算公式为: $Si_{\text{过量}} =$

$Si_{\text{样品}} - [(Si/Al)_{\text{PAAS}} \times Al_{\text{样品}}]$, 其中 $Si_{\text{样品}}$ 表示样品中的总硅元素含量, $Al_{\text{样品}}$ 表示样品中的总 Al 元素含量, $(Si/Al)_{\text{PAAS}}$ 表示后太古宙澳大利亚页岩中的 Si/Al 比值 (Taylor and McLennan, 1985; McLennan, 1993)。

3 黑色岩系发育特征

3.1 岩石类型及特征

岩心及野外剖面观察显示,川东与鄂西地区五峰组—龙马溪组黑色岩系的岩石类型及垂向组合基本相似,总体来看下部以黑色富有机质页岩或硅质页岩为主,向上过渡为粉砂质页岩,有机质含量逐渐减少,颜色逐渐变浅(图2、图3a~c)。其中,两地五峰组均以黑色碳质页岩或者硅质页岩为特征,厚度差异较小(JY1井约4.5 m,YY2井约5.6 m),五峰组顶部皆可见到薄层的观音桥层介壳灰岩(图3d)。然而,两地龙马溪组黑色岩系厚度及岩性特征差异明显增大。川东JY1井龙马溪组黑色岩系厚度约65 m,其中在鲁丹阶—埃隆阶之交的 *C. cyphus* 笔石带和 *D. triangulatus* 笔石带可见约24 m厚的粉砂质泥页岩

(图3e);而在鄂西宜昌地区,无论是露头剖面还是钻井资料显示的龙马溪组黑色岩系厚度仅14 m左右,在鲁丹阶—埃隆阶并未见到厚层粉砂质页岩,而是发育薄层的含灰云质泥岩(图3f),并且最新的生物地层研究结果显示宜昌斜坡区缺失了 *C. cyphus* 和 *D. triangulatus* 笔石带 (Maletz *et al.*, 2021; Cai *et al.*, 2022)。

3.2 矿物组成

通过对川东JY1井、鄂西YY2井及HS剖面五峰组—龙马溪组黑色岩系进行岩矿分析发现,川东与鄂西地区五峰组—龙马溪组页岩矿物均以黏土矿物和石英为主,其次为长石、碳酸盐矿物、黄铁矿等(图4)。各剖面五峰组—龙马溪组黑色岩系自下而上均表现为石英矿物含量逐渐减少,黏土矿物逐渐增多的特征。其中JY1井石英含量介于18.0%~70.0%(平均为38.56%),黏土矿物含量介于17.0%~63.0%(平均为39.37%);YY2井石英含量介于17.8%~88.8%(平均为46.5%);黏土矿物含量介于8.5%~53.9%(平均为34.1%)。在显微镜下,两井黑色岩系底部均可见到大量硅质放射虫,向上含量逐渐减少,而具有棱

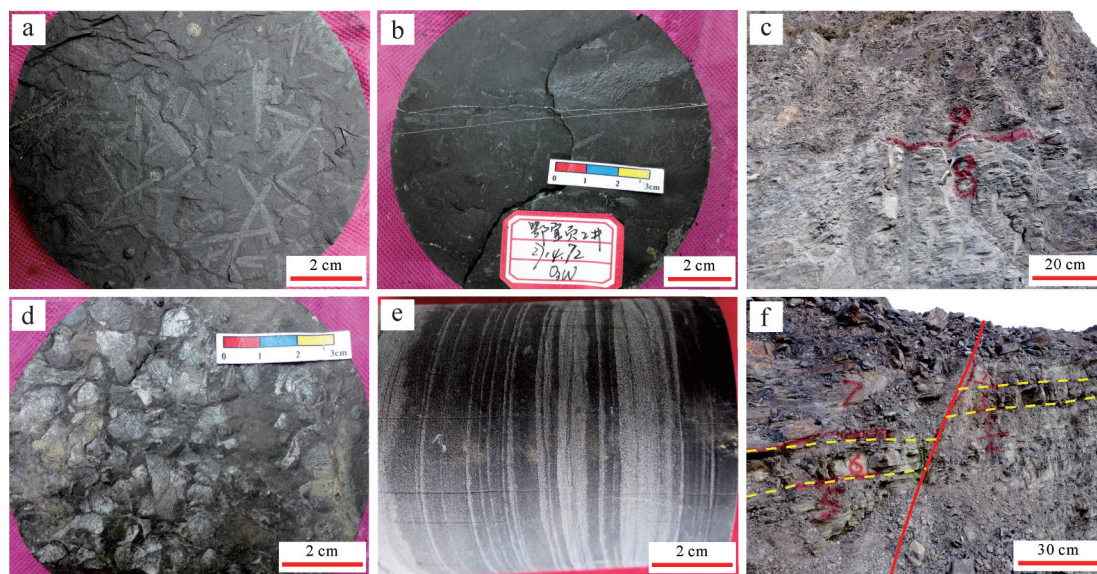


图3 川东—鄂西地区五峰组—龙马溪组黑色岩系典型岩石照片

(a)黑色富有机质笔石页岩,五峰组,YY2井;(b)硅质页岩,笔石少见,五峰组,YY2井;(c)黑色富有机质页岩向灰绿色或灰黄色泥页岩过渡,龙马溪组,HS剖面;(d)观音桥层介壳灰岩,五峰组顶部,YY2井;(e)灰黑色泥页岩与粉砂岩互层,龙马溪组,对应于 *L. convolutus* 笔石带,HS剖面;(f)龙马溪组鲁丹阶—埃隆阶之交黑色岩系中夹含灰云质泥岩,风化后呈土黄色,对应于缺失的 *C. cyphus* 和 *D. triangulatus*,HS剖面

Fig.3 Typical petrological photographs of Wufeng Formation-Longmaxi Formation, black rock series in eastern Sichuan and western Hubei

(a) black organic-rich shale with quantities of graptolites, Wufeng Formation, well YY2; (b) siliceous shale with occasional graptolites, Wufeng Formation, well YY2; (c) transition of black organic-rich shale to greyish-green or greyish-yellow shale, Longmaxi Formation, HS section; (d) Guanyinqiao bed, thin limestone with quantities of Hirnantian shells, at top of the Wufeng Formation, well YY2; (e) dark grey shale with siltstone intercalation, Longmaxi Formation, in *L. convolutus* graptolite zone, HS section; (f) black shale with grey dolomitic mudstone weathered to earthy yellow color in *C. cyphus* and *D. triangulatus* graptolite zone, HS section, Rhuddanian-Aeronian transition in Longmaxi Formation

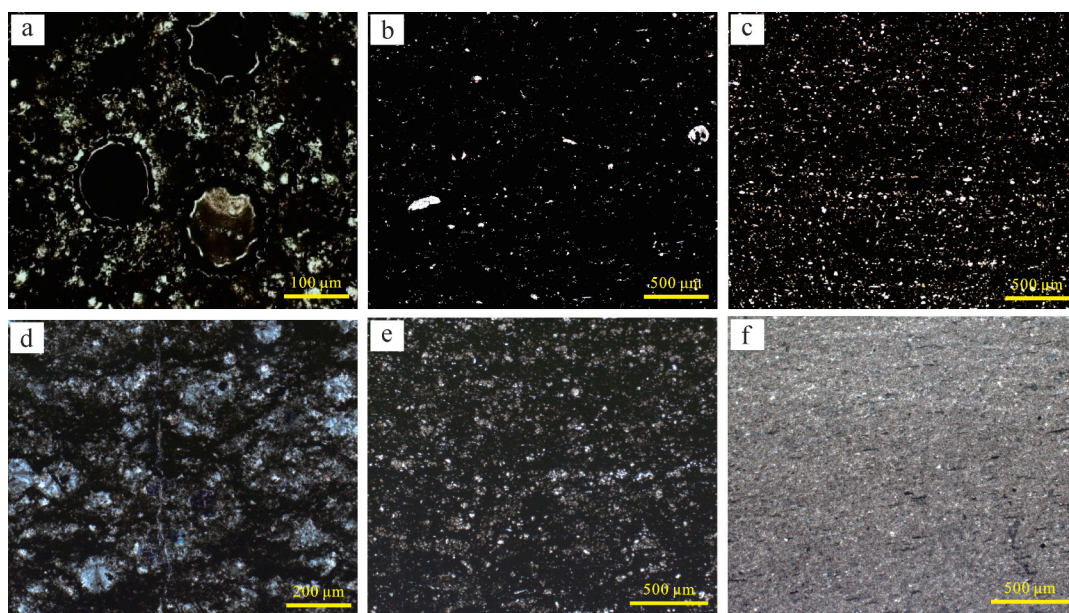


图4 川东—鄂西地区五峰组—龙马溪组黑色岩系镜下照片

(a)黑色硅质岩,见放射虫化石,五峰组,JY1井;(b)黑色富有机质页岩,陆源碎屑含量少,龙马溪组底部,JY1井;(c)灰黑色粉砂质页岩,含有机质,见大量陆源碎屑,龙马溪组,对应于*C. cyphus*笔石带,JY1井;(d)黑色硅质岩,见大量放射虫化石,五峰组,YY2井;(e)黑色富有机质页岩,含陆源碎屑,龙马溪组,YY2井;(f)粉砂质泥岩,有机质含量低,龙马溪组,YY2井

Fig.4 Photomicrographs of Wufeng Formation-Longmaxi Formation black rock series in eastern Sichuan and western Hubei

(a) black siliceous shale, quantities of radiolarian fossils, Wufeng Formation, well JY1; (b) black organic-rich shale, less terrigenous material, bottom of the Longmaxi Formation, well JY1; (c) dark grey silty shale with organic matter and large amount of terrigenous materials in *C. cyphus* graptolite zone, Longmaxi Formation, well JY1; (d) black siliceous rock with numerous radiolarian fossils, Wufeng Formation, well YY2; (e) black organic-rich shale with terrigenous materials, Longmaxi Formation, well YY2; (f) silty mudstone with low organic matter content, Longmaxi Formation, well YY2

角状的陆源碎屑逐渐增多(图4),其中JY1井龙马溪组黑色岩系中陆源碎屑颗粒更为常见(图4c)。长石含量与黏土矿物含量变化趋势一致,在两个地区垂向上均逐渐增多,但碳酸盐矿物含量垂向上表现为逐渐减少的特征。

根据主要矿物的差异,两地五峰组—龙马溪组黑色岩系均可划分为硅质岩、硅质页岩、混合质页岩和黏土质页岩4种主要岩石类型(王超等,2018;蔡全升等,2021;黄梓桑等,2021),其中硅质页岩与混合质页岩最为常见(图5)。尽管总体上向上均逐渐由硅质页岩向混合质页岩转变,但同时期黑色岩系的岩相类型略有差异。赫南阶及凯迪阶上部在川东与鄂西地区均以硅质页岩和混合质页岩为主;鲁丹阶在鄂西地区以硅质页岩为主,而在川东地区以硅质页岩和混合质页岩为主;埃隆阶鄂西地区以硅质页岩、混合质页岩和黏土质页岩为主,而川东地区以混合质页岩和黏土质页岩为主,表明川东地区受陆源碎屑影响更为明显。

3.3 TOC含量

有机碳分析结果显示,川东JY1井五峰组—龙马

溪组黑色岩系TOC含量介于0.6%~5.2%,平均为2.7%;鄂西地区YY2井五峰组—龙马溪组黑色岩系TOC含量介于0.4%~5.5%,平均为2.5%;鄂西地区HS剖面TOC含量介于0.8%~6.4%,平均为2.9%。其中,五峰组黑色岩系JY1井TOC含量介于3.8%~5.2%(平均为4.5%),YY2井TOC含量介于2.1%~5.5%(平均为3.2%);龙马溪组下段(鲁丹阶)黑色岩系JY1井TOC含量介于1.3%~4.6%(平均为2.9%),YY2井TOC含量介于0.8%~5.5%(平均为3.9%);龙马溪组上段(埃隆阶)黑色岩系JY1井TOC含量介于0.6%~2.8%(平均为1.8%),YY2井为0.4%~2.9%(平均为1.5%)。总体上,川东—鄂西地区五峰组—龙马溪组黑色富有机质页岩层段(TOC含量大于2%)主要发育于凯迪阶与鲁丹阶(图6),TOC含量自下而上具有逐渐减少的特征。但TOC含量大于2%的富有机质页岩层段在川东JY1井达38 m,其中主要分布于鲁丹阶(约30 m),而在鄂西地区TOC含量大于2%的富有机质页岩层段厚度仅15 m左右,分布于鲁丹阶的厚度仅6 m(图6,7),显示同一时期两地黑色富有机质页岩发育规模存在明显差异。

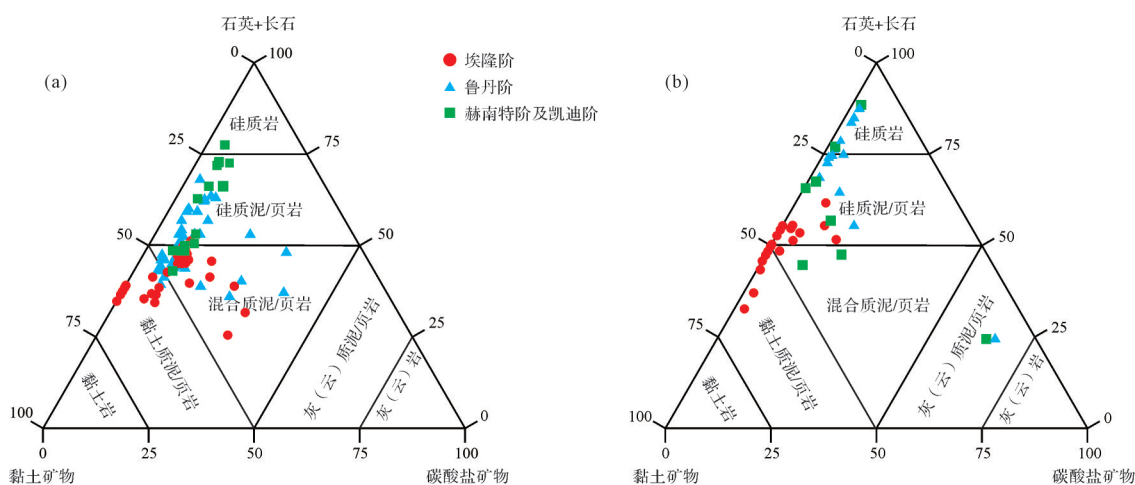


图5 川东(a)与鄂西(b)地区五峰组—龙马溪组黑色岩系岩石类型特征

Fig.5 Lithofacies types of Wufeng Formation-Longmaxi Formation black rock series in (a) eastern Sichuan; and (b) western Hubei

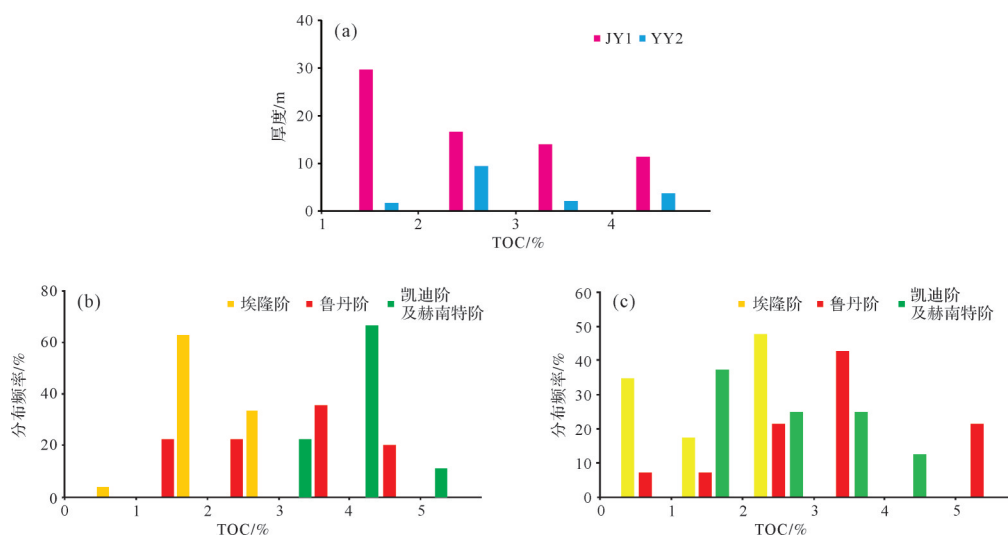


图6 川东与鄂西地区五峰组—龙马溪组黑色岩系 TOC 发育特征

(a) 两地不同 TOC 含量黑色岩系厚度; (b) 川东 JY1 井黑色岩系 TOC 含量特征; (c) 鄂西 YY2 井及 HS 剖面黑色岩系 TOC 含量特征

Fig.6 Total organic content (TOC) of Wufeng Formation-Longmaxi Formation black rock series in eastern Sichuan and western Hubei

(a) thickness vs. TOC in the two study areas; (b) TOC in well JY1, eastern Sichuan; and (c) TOC in well YY2 and HS section, western Hubei

3.4 沉积序列

基于岩性特征及有机碳含量旋回性变化,可将川东—鄂西地区五峰组—龙马溪组黑色岩系划分为四个沉积旋回(C1~C4)(图7)。其中,五峰组对应于C1旋回,底部为低有机质富集的灰色或灰黑色泥页岩,向上过渡为富有机质硅质页岩,顶部为观音桥段介壳灰岩,TOC含量具有先逐渐增加后快速减少的特征,显示了区内海平面逐渐升高后快速降低的变化过程,两地黑色岩系富有机质页岩厚度及岩性差异较小。C2旋回对应于鲁丹阶中下部,在鄂西与川东地区均发育,黑色岩系表现为由赫南特阶灰岩快速转变为硅质页岩,随后转变为混合质页岩,

有机质含量具有早期快速升高后逐渐降低的趋势,但川东富有机质页岩厚度显著大于鄂西地区,陆源碎屑也更常见。C3旋回位于鲁丹阶上部—埃隆阶下部,在川东地区表现为下部黑色富有机质页岩向上过渡为粉砂质页岩夹薄层砂岩,有机质含量从早期的高值逐渐降低。而在鄂西地区,该旋回对应于一套薄层含灰云质泥岩,风化后呈土黄色(图3f),其层位与前人研究中的笔石带缺失层位基本一致(Chen *et al.*, 2015; Cai *et al.*, 2022),对应于鲁丹阶—埃隆阶之交全球性冰川海平面下降阶段(Chen *et al.*, 2015; Cai *et al.*, 2022),表明该区下志留统鲁丹阶—埃隆阶之交可能存在沉积间断。C4旋回对应

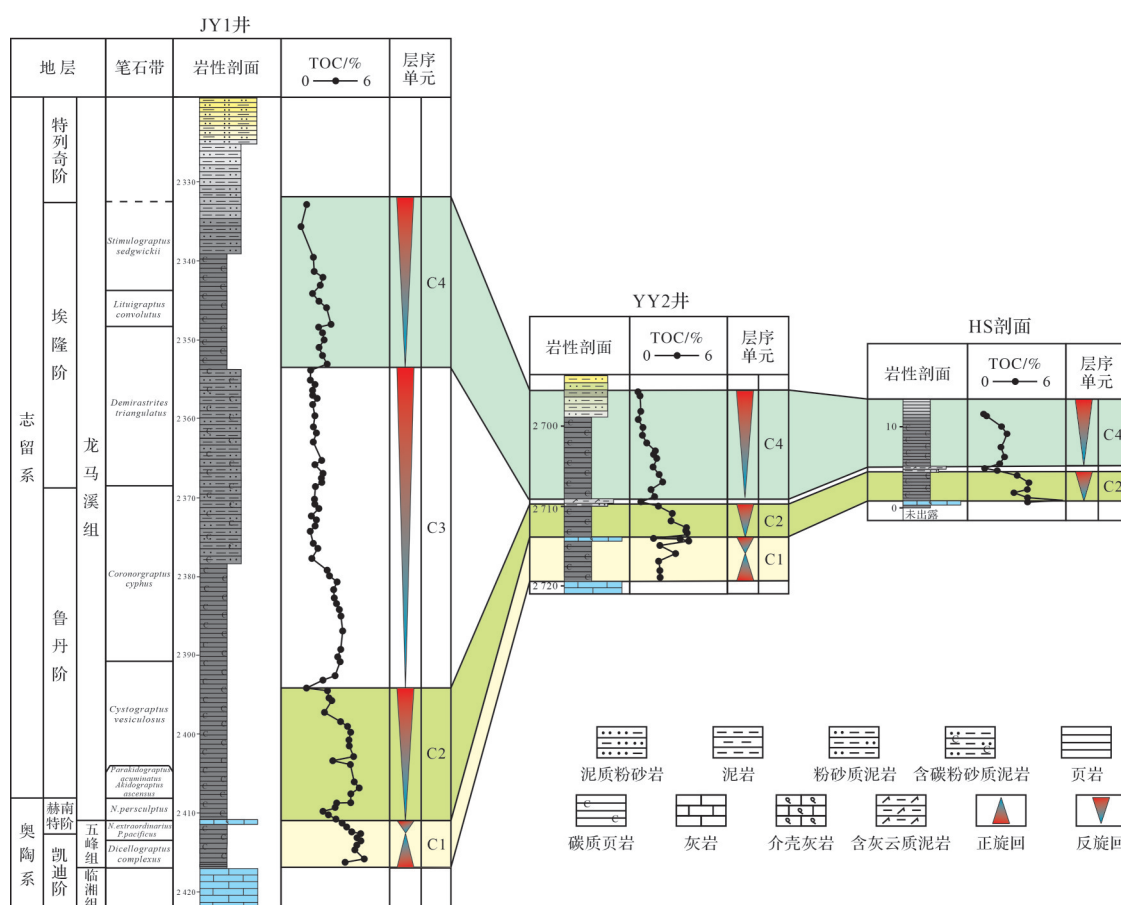


图7 川东—鄂西地区五峰组—龙马溪组黑色岩系沉积序列及旋回特征

Fig.7 Sedimentary succession and cyclic variation of Wufeng Formation-Longmaxi Formation black rock series in eastern Sichuan and western Hubei

于埃隆阶中下部,表现为富有机质页岩直接覆盖于川东地区粉砂质泥页岩或者鄂西地区含灰云质泥岩之上,TOC含量具有迅速增高而后逐渐降低的趋势,岩性向上也整体过渡为灰绿色泥页岩,粉砂含量逐渐增加,最终使得黑色岩系发育终止(图7),但该旋回中川东地区黑色岩系厚度及TOC含量明显高于鄂西地区。由此可见,川东与鄂西地区五峰组—龙马溪组黑色岩系沉积特征虽然总体变化趋势一致,但在早志留世,两地黑色岩系沉积特征具有明显差异。

4 黑色岩系沉积环境

4.1 氧化还原条件

前人研究表明,页岩中的一些元素富集系数如 Mo_{EF} 和 U_{EF} 等被认为是评价沉积环境氧化还原条件的有效参数(Rimmer, 2004; Tribouillard *et al.*, 2006; Algeo and Liu, 2020),它们与有机质富集之间具有良

好的匹配关系,并且对于不同的氧化还原环境,这些氧化还原敏感元素通常表现出不同的富集速率(Algeo and Liu, 2020)。因此,明确有效的判别参数及其门限阈值是判断不同地区氧化还原条件的关键。川东—鄂西地区五峰组—龙马溪组黑色岩系元素富集系数分析结果显示,两地黑色岩系中的 Mo_{EF} 、 U_{EF} 与 Ni_{EF} 与TOC含量之间均具有良好的相关性(图8),并且呈现出一定的阶段性差异。例如,随着Mo元素的早期富集,TOC含量在早期也快速增加,而后随着Mo元素的持续增加,有机质的相对富集速率呈现逐渐减少的趋势,表明Mo元素与有机质之间的差异协变关系能够反映沉积环境的变化。与此同时,不同元素之间的富集速率也具有明显差异,如当 Mo_{EF} 大于40时,U与Ni元素富集速率呈现一定程度的降低,这与前人提出的不同氧化还原环境下Mo、U、Ni等元素的差异富集规律相一致(Taylor and McLennan, 1985; Algeo and Liu, 2020)。因此,基于上

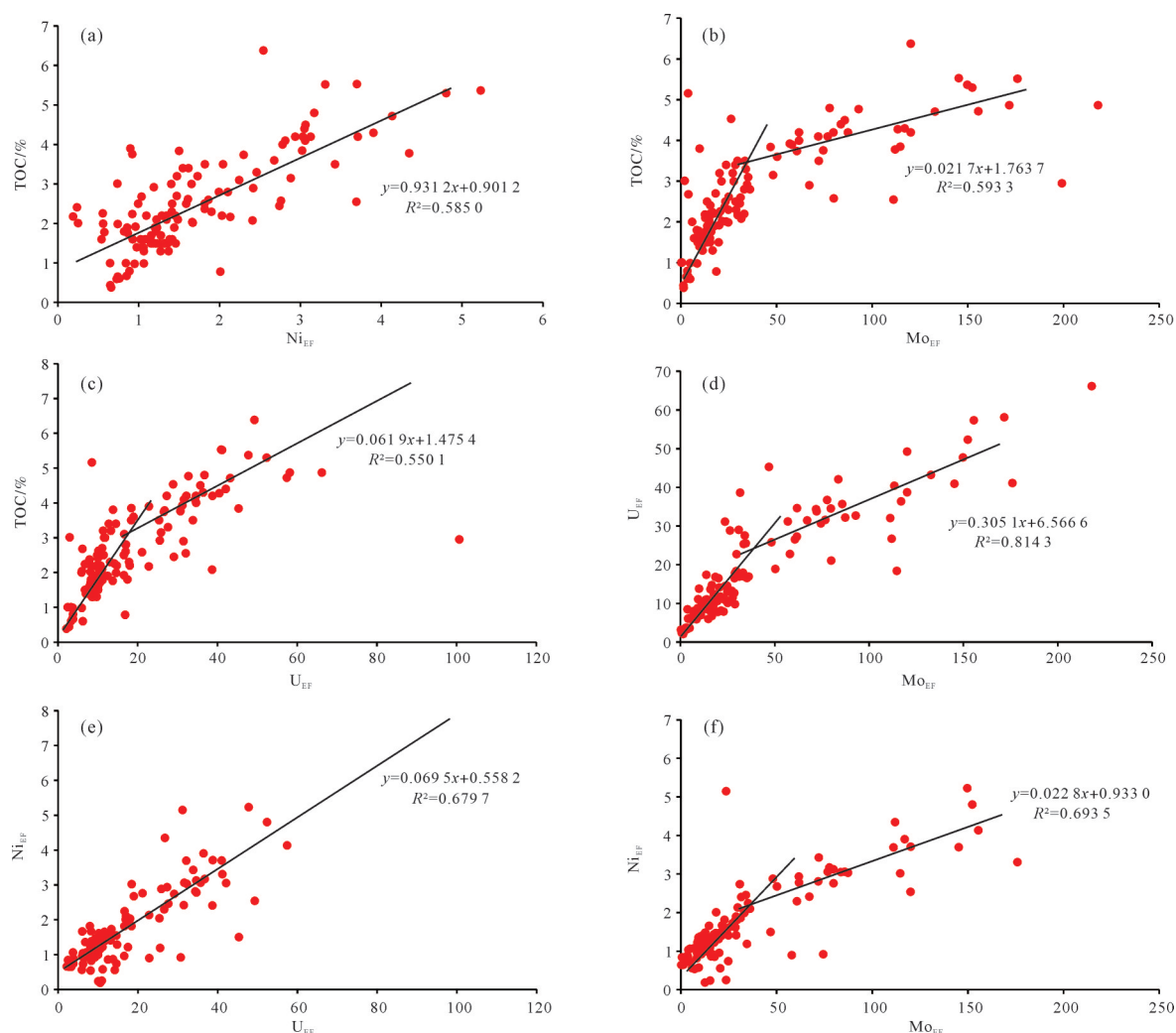


图8 川东—鄂西地区五峰组—龙马溪组黑色岩系元素富集系数与TOC含量相关性特征及不同元素富集系数之间相关性特征

Fig.8 Correlation characteristics between element enrichment factors and TOC content as well as among different element enrichment factors of Wufeng Formation-Longmaxi Formation black rock series, eastern Sichuan and western Hubei

述特征,认为 Mo_{EF} 、 U_{EF} 是分析黑色岩系氧化还原条件的有效参数,其中 $Mo_{EF} > 40$ 、 $U_{EF} > 20$ 可以作为强还原环境的判别指标。

川东—鄂西地区的黑色岩系氧化还原剖面显示, Mo_{EF} 与 U_{EF} 高值区主要集中在C1与C2旋回,垂向上由下至上,三个剖面相关元素富集特征均呈现相类似变化规律,富集程度逐渐减弱(图9~11),这一趋势与前人研究认识基本相似(Liu *et al.*, 2017; Lu *et al.*, 2019; Huang *et al.*, 2020)。值得注意的是,尽管每个界面附近 Mo_{EF} 与 U_{EF} 数值均较低,但不同旋回的变化样式存在差异。C1旋回表现为 Mo_{EF} 与 U_{EF} 数值的逐渐增高,随后在赫南特阶快速降低,反映了区域沉积环境由早期的氧化状态逐渐转为还原条件,但在末期又快速转化为氧化状态(图9,10)。与五

峰组C1沉积旋回不同,龙马溪组沉积旋回均表现为早期的快速升高与随后的缓慢下降,反映的是各沉积旋回快速转为还原状态,随后向氧化状态过渡,表明两地五峰组与龙马溪组的氧化还原条件变化成因存在差异。

尽管鄂西地区缺失了C3沉积序列(图10,11),但川东地区JY1井C3沉积序列中 Mo_{EF} 与 U_{EF} 数值也均较低(图9),平均分别为12.8与3.8,反映了相对浅水的弱氧化环境,显示该时期两地可能均经历了相对海平面的下降。与此同时,在两地的C4沉积序列底部,均可见到 Mo_{EF} 与 U_{EF} 数值突然增大(图9~11),尽管增加幅度相对较小,表明该时期区域沉积环境可能发生了一次重大改变,相对海平面存在一次快速上升事件。

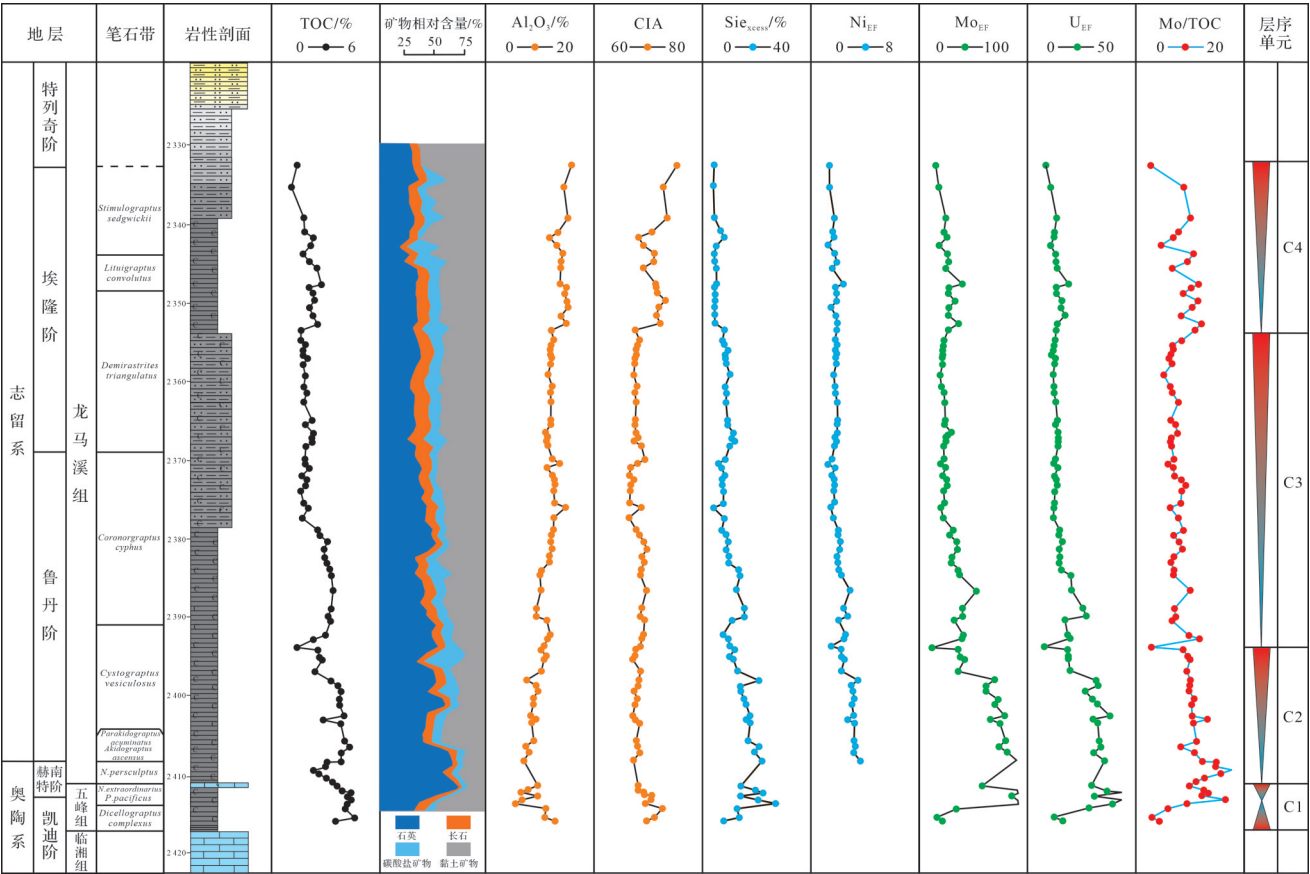


图9 川东JY1井五峰组—龙马溪组黑色岩系岩矿及地化参数特征

Fig.9 Petrological and geochemical profiles of Wufeng Formation-Longmaxi Formation black rock series, well JY1, eastern Sichuan

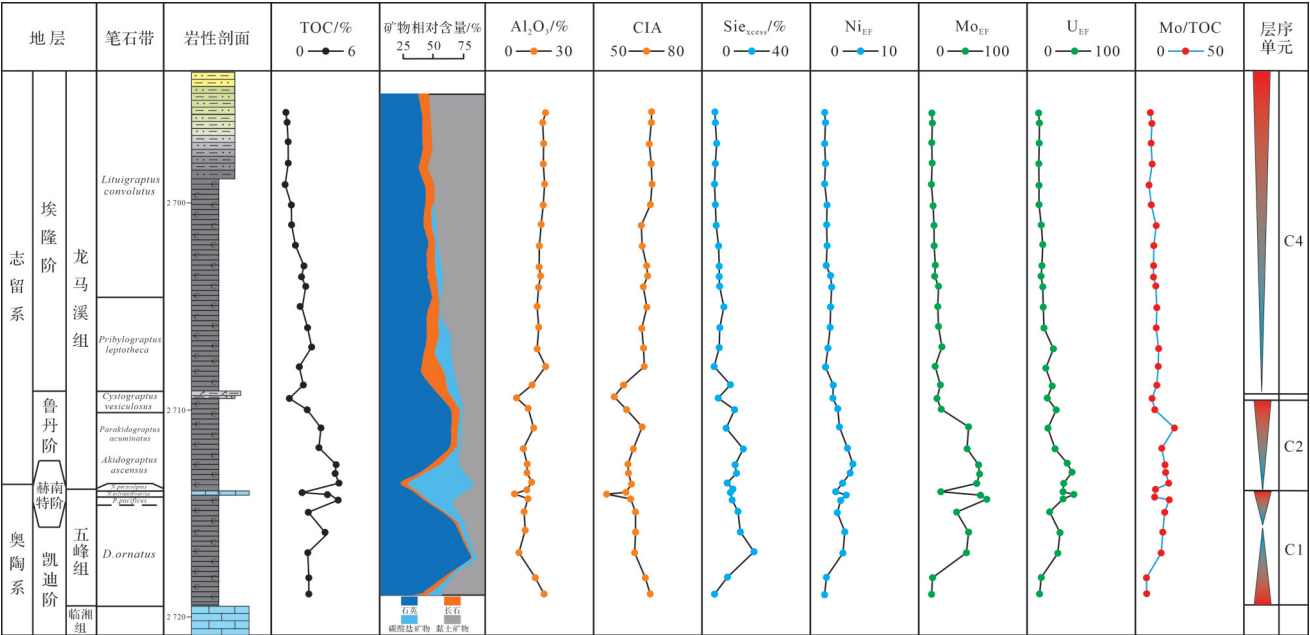


图10 鄂西YY2井五峰组—龙马溪组黑色岩系地化参数特征

Fig.10 Petrological and geochemical profiles of Wufeng Formation-Longmaxi Formation black rock series, well YY2, western Hubei

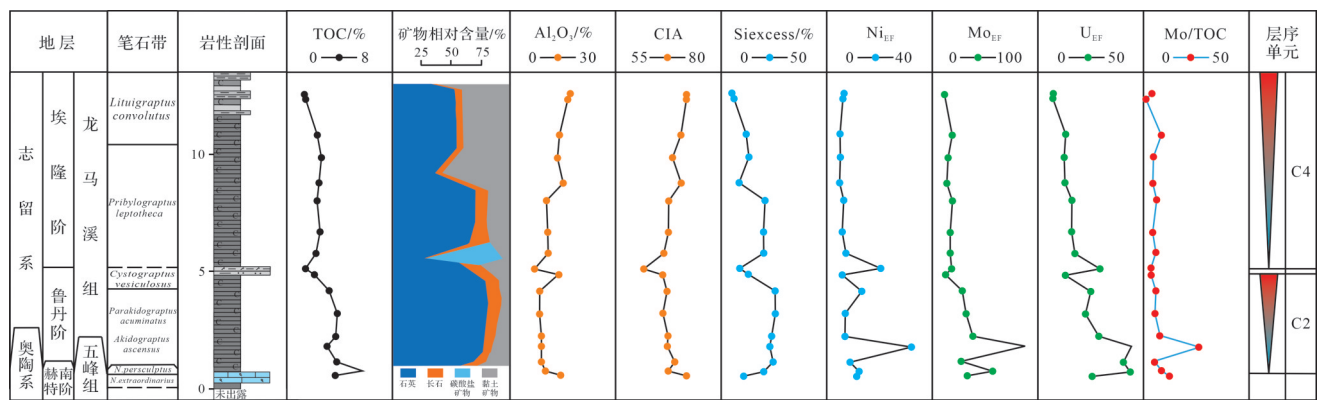


图11 鄂西HS剖面五峰组—龙马溪组黑色岩系岩矿及地化参数特征

Fig.11 Petrological and geochemical profiles of Wufeng Formation-Longmaxi Formation black rock series, HS section, western Hubei

4.2 陆源物质供给与古气候

岩石学特征显示,川东与鄂西地区五峰组—龙马溪组黑色岩系自下而上由硅质岩或硅质页岩向黏土质页岩转变,页岩中的粉砂含量垂向上逐渐增多,镜下也可见大量棱角状石英颗粒,表明五峰组—龙马溪组黑色岩系沉积期陆源碎屑物质供给在逐渐增加(图2,4)。除了岩相变化, TiO_2 与 Al_2O_3 也能够直观地反映陆源物质的输入情况(Rimmer, 2004; Tribovillard *et al.*, 2006)。地化剖面中,川东JY1井与鄂西YY2井黑色岩系的 Al_2O_3 垂向上均可见到逐渐增加的趋势(图9~11),低数值区主要分布在凯迪阶上部—鲁丹阶中下部(C1与C2沉积旋回),并在三个剖面C4旋回底界面均可见到 Al_2O_3 含量明显的跃升。与此同时,JY1井C3沉积旋回对应的 Al_2O_3 含量普遍较高,反映川东地区鲁丹阶—埃隆阶之交黑色岩系陆源物质含量较多(图9)。

化学风化指数(CIA)同样是反映陆源物质供给状况的有效参数(Zou *et al.*, 2018; Wang *et al.*, 2020)。一般来说,化学风化指数越大,代表源区风化作用越强,意味着物源区能够为沉积区提供足够的陆源物质。在三个地球化学剖面中,CIA与 Al_2O_3 表现出一致的变化趋势,纵向上CIA数值在凯迪阶上部—鲁丹阶中下部普遍较低,在每个旋回界面处表现为极低值,而在C4底部可见CIA数值的明显跃升,显示了埃隆阶沉积早期存在风化作用的显著增强事件(图9~11)。值得注意的是,CIA指数与气候环境相关性明显,温暖潮湿的气候条件下,风化作用最强,CIA数值往往偏高,而气候寒冷干燥的条件下,风化作用最弱,CIA指数往往偏低,因此CIA指数的变化趋势也常被用于分析古气候变化(Wang *et al.*, 2020)。三个剖面五峰组—龙马溪组CIA指数自下而上均显示逐渐增

加的趋势,反映了区域上气候条件逐渐变暖的总体趋势。但值得注意的是,三个剖面除了在赫南特阶可见明显的CIA低值外,在鲁丹阶—埃隆阶之交同样可见CIA指数的显著降低(图9~11),显示鲁丹阶—埃隆阶之交可能存在明显的气候变冷事件,这与前人提出的早志留世第一个冰川事件活动时期相对应(Munnecke *et al.*, 2010; Barrera *et al.*, 2020; Cai *et al.*, 2022),同时表明鲁丹阶—埃隆阶之交全球性冰川事件在扬子地区也有沉积响应。C4底部CIA数值的明显跃升与黑色岩系直接覆盖在粉砂质泥页岩或含灰云质泥岩之上,显示该时期区域气候条件发生了重大改变,气候变暖导致冰川再次消融,全球海平面上升,促进了志留纪黑色页岩的二次发育。但气候持续变暖背景下的风化作用持续加强使得陆源物质迅速增多,最终导致了龙马溪组黑色岩系的发育终止。

4.3 沉积水体局限性

晚奥陶世—早志留世,中—上扬子地区为受川中隆起、康滇隆起、雪峰隆起、华夏古陆以及湘鄂西隆起等所围限的区域(Chen *et al.*, 2004; Li *et al.*, 2019; Wang *et al.*, 2019),沉积水体相对局限。但受海平面和构造地貌差异的影响,不同时期的水体局限性程度有所差别。为了明确川东—鄂西地区黑色岩系沉积期水体局限性特征,本文采用Algeo and Tribovillard(2009)提出Mo-TOC协变模式图分析沉积水体的滞留程度。当沉积盆地越局限,Mo/TOC数值往往越小,而环境越开放,Mo/TOC数值通常越高。从鄂西与川东地区五峰组—龙马溪组黑色岩系Mo-TOC散点图来看,两地五峰组均经历了早期的强局限环境以及随后的半局限环境(图12),反映了区域海平面的上升降低了区域的局限程度,而两地的C2沉积旋回样品均处于半局限环境,应该是和早志留

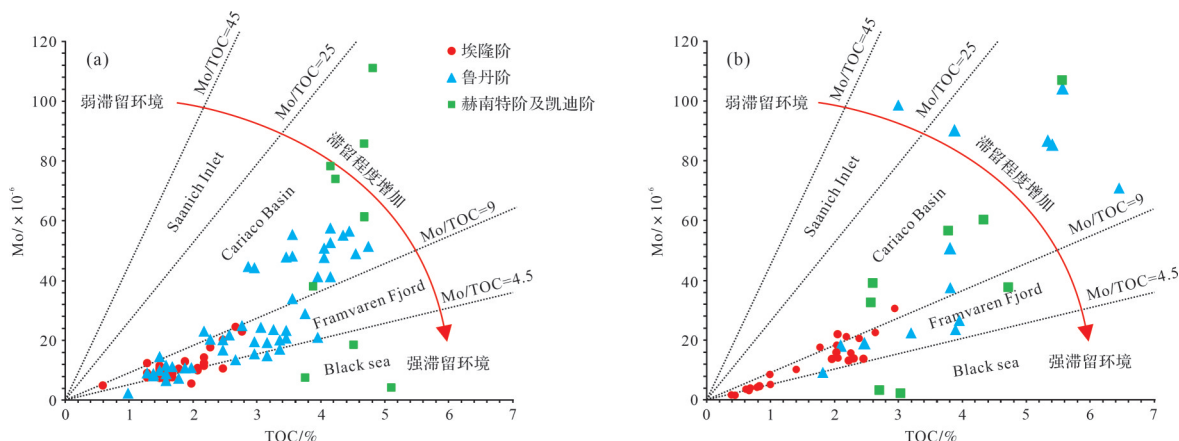


图 12 (a)川东与(b)鄂西地区奥陶纪—志留纪之交沉积水体局限性特征(据 Algeo *et al.*, 2009 修改)

Fig.12 Hydrographic restriction during the Ordovician-Silurian transition of (a) eastern Sichuan; and (b) western Hubei (modified from Algeo *et al.*, 2009)

世全球冰川消融导致的海平面上升有关。但 C3 和 C4 旋回整体的沉积水体局限程度与 C2 相比又明显增加(图 9~11),考虑全球海平面的持续上升背景下,局限性增加应该是和构造隆升增强导致的区域相对海平面下降有关(Huang *et al.*, 2018; Cai *et al.*, 2022)。总体而言,川东与鄂西地区五峰组—龙马溪组黑色岩系沉积水体局限性自下而上具有强局限—弱局限—强局限的变化特征,且具有区域一致性,反映两地受到了相似的海平面变化的影响。

4.4 古生产力

作为反映海洋生物繁盛程度的指标,古生产力与沉积物中的有机质富集关系密切。在海相泥页岩中,沉积物中的有机碳(TOC)含量、过量硅含量(Si_{excess})以及 Cu、Ni、P 等元素常被用来表征恢复古海洋生产力(Tribovillard *et al.*, 2006; Qiu *et al.*, 2022)。分析测试结果显示,川东—鄂西地区五峰组—龙马溪组黑色岩系中的 TOC 含量与 Si_{excess} 、 Ni_{EF} 具有良好的正相关关系(图 8, 13),表明它们可以作为表征古海洋生产力的有效参数。纵向上,鄂西与川东地区五峰组—龙马溪组黑色岩系 Si_{excess} 与 Ni_{EF} 均表现为早期快速升高,而后逐渐下降的特征,高古生产力层段主要集中在 C1 与 C2 沉积旋回,川东地区 C3 旋回粉砂质泥岩段对应的古生产力较低,并且在每个沉积旋回分界面处古生产力明显降低(图 9~11),这一特征与 TOC 含量、氧化还原条件变化基本保持一致,显示海平面变化可能是影响古生产力与有机质富集的关键因素。总体来说,五峰组 C1 与龙马溪组 C2 沉积期,海平面升高,促进了营养物质的供给与生物的繁盛,提高了古生产力,而龙马溪组 C3 与 C4 沉积期,相

对海平面总体上处于下降阶段,川东 C3 旋回有机质碳含量明显降低,尽管 C4 早期的全球海平面再次快速上升带来了古生产力的提高,但持续的构造抬升与陆源物质输入,制约了有机质的不断富集,古生产力的变化趋势总体上与前人的研究结果基本一致(黄梓桑等, 2021; 王兴等, 2024)。由于两个研究区处于同一连通性海盆,两地同沉积期内古海洋生产力变化具有相似性。

5 黑色岩系差异发育控制因素与沉积模式

5.1 黑色岩系发育主控因素

海相富有机质页岩的形成发育主要受古地貌、海平面升降、陆源物质供给、氧化还原条件及古生产力等诸多因素的控制(Chen *et al.*, 2004; Liu *et al.*, 2017; Huang *et al.*, 2018, 2020; Li *et al.*, 2019; Wang *et al.*, 2019; Cai *et al.*, 2022; 蔡全升等, 2024; 张茜等, 2024; 沈均均等, 2025),但这些因素本质上应该是古构造与古气候变化耦合作用的结果(Haq and Schutter, 2008; Huang *et al.*, 2018; Cai *et al.*, 2022)。只是在不同的沉积盆地和不同沉积阶段,构造与气候因素所表现出的控制作用强度及机制不尽相同。

晚奥陶世,受加里东运动的影响,整个扬子地区构造古地貌发生了显著变化,具体表现为区域性的构造差异沉降使得扬子海盆成为了相对局限的沉积盆地(Chen *et al.*, 2004; Huang *et al.*, 2018)。在川东—鄂西地区,持续性的构造沉降不仅导致了沉积水体的不断加深,同时也限制了海水的循环流动(图

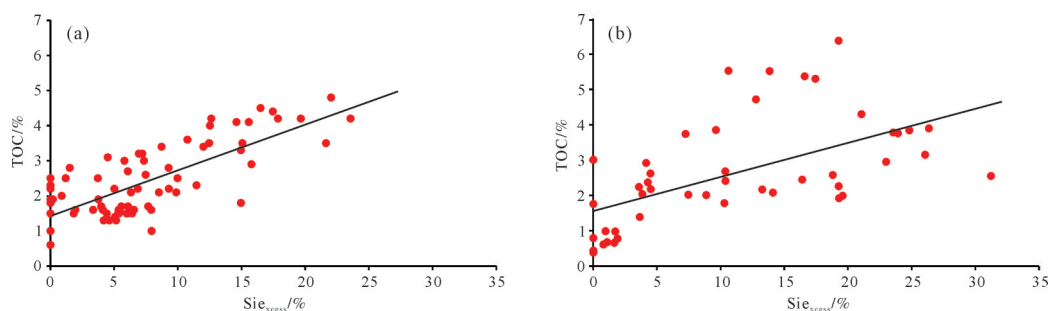


图13 (a)川东与(b)鄂西地区五峰组—龙马溪组黑色岩系过量硅与有机质富集关系

Fig.13 Correlation of TOC with Si_{excess} in Wufeng Formation-Longmaxi Formation black shale for (a) eastern Sichuan; and (b) western Hubei

12),从而形成了有利于有机质富集的缺氧环境。在川东与鄂西地区五峰组黑色岩系的地化剖面中,可以看到TOC含量的逐渐增加以及还原条件的逐渐增强(图9~11),这与构造沉降引起的相对海平面变化过程相一致,因此区域性沉降是五峰组黑色岩系发育的关键。但在五峰组顶部,黑色岩系的突然终止、薄层介壳灰岩的出现以及极低的CIA数值,表明由气候变化引起的冰川型海平面的快速下降是五峰组黑色岩系终止发育的主要因素。

早志留世,随着构造挤压作用的增强,区域性的构造活动表现为由差异沉降转为差异隆升(Chen *et al.*, 2004; Huang *et al.*, 2020; 牟传龙等, 2021; 肖斌等, 2021)。与五峰组黑色岩系所显示的地化参数变化趋势不同,川东与鄂西地区龙马溪组黑色岩系TOC含量在纵向上呈现多期次的快速上升和缓慢下降,而整体呈现逐渐降低的趋势。沉积水体的氧化还原环境也表现出相似的变化特征,氧化还原敏感参数 Mo_{EF} 及 U_{EF} 表现为底部的快速增加,而后逐渐减小,显示水体由氧化状态快速转化为还原状态,随后又逐渐过渡为氧化状态的过程(图9~11)。除此之外,陆源物质供给也呈波动式增加。这表明早志留世扬子海盆的水体呈现波动式变浅的特征:早期快速加深,后期缓慢下降。基于构造与气候引起的局限性盆地海平面变化样式差异以及区域地质环境背景,认为短期的海平面快速加深应该是全球性冰川消融的结果,而长期的海平面变浅应该是区域构造持续隆升的表现。所以,对于龙马溪组而言,构造隆升导致的区域海平面下降是黑色岩系终止发育的主要原因,而冰川消融引起的全球海平面上升则是促进黑色岩系多期发育的关键因素。

因此,在五峰组—龙马溪组黑色富有机质页岩沉积过程中,古构造与古气候是控制黑色岩系发育

的最根本因素,只是它们对黑色岩系的发育影响机制不同,即川东与鄂西地区五峰组—龙马溪组黑色岩系的差异发育应该是古构造与古气候变化在两地差异叠加的结果。

5.2 川东—鄂西地区黑色岩系差异沉积模式

为了明确川东—鄂西地区五峰组—龙马溪组黑色岩系差异沉积过程,基于川东—鄂西地区五峰组—龙马溪组黑色岩系岩性序列、地化特征及沉积主控因素等,建立了川东—鄂西地区奥陶纪—志留纪之交黑色岩系差异沉积演化模式(图14)。

五峰组沉积初期,受华夏地块向扬子地块汇聚挤压的影响,整个扬子海盆发生了不同程度的沉降,区域上由碳酸盐岩台地向浅海陆棚过渡(Chen *et al.*, 2004; 苏文博等, 2006; Huang *et al.*, 2020),沉积水体逐渐加深,导致区域上的沉积物由临湘组瘤状灰岩转为富有机质页岩沉积,并且有机质含量逐渐增加,与此同时沉积水体缺氧环境逐步形成。五峰组赫南特阶沉积期,全球气温显著下降,冰川作用增强,相对海平面快速下降(Haq and Schutter, 2008; Munnecke *et al.*, 2010; Yan *et al.*, 2010),导致五峰组由富有机质页岩过渡为含赫南特贝化石的页岩和灰岩。在整个C1沉积期,川东与鄂西地区沉积差异并不明显,无论是黑色富有机质页岩的厚度、岩性还是顶部发育的观音桥层均相类似,表明至少在该时期两地的构造古地貌与沉积环境尚未发生显著的差异(图14)。

然而,在志留纪初期,川东JY1井鲁丹阶C2沉积旋回富有机质页岩沉积厚度明显增加,显著大于鄂西地区,且川东地区更多的见到陆源碎屑,这表明两地沉积环境自此开始出现不同。志留纪初期全球气候变暖导致的冰川消融和海平面上升是全球性的,因此该时期两地黑色岩系的沉积差异应该是两地构造差异沉降与隆升的结果,表现为川东地区相对于

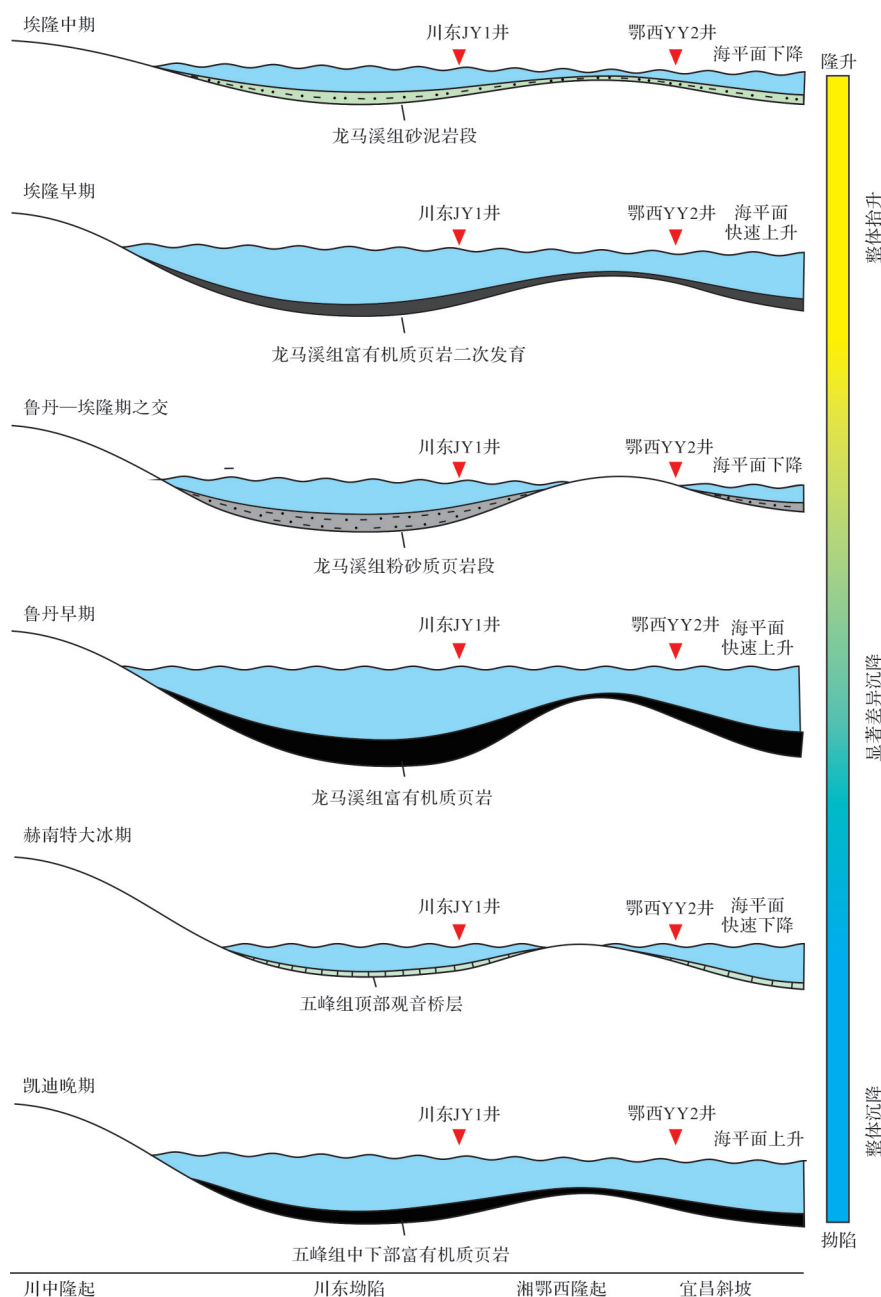


图 14 川东—鄂西地区五峰组—龙马溪组黑色岩系差异沉积模式

Fig.14 Sedimentary model of Wufeng Formation-Longmaxi Formation black rock series in eastern Sichuan and western Hubei

鄂西地区持续下拗,导致川东地区成为区域性的沉积沉降中心,古隆起周缘的大量细粒沉积物在此汇聚,而鄂西宜昌地区构造地貌相对较高并且受到湘鄂西古隆起的遮挡,南部碎屑物源无法大量搬运至宜昌斜坡区,导致宜昌地区黑色岩系沉积厚度相对较薄。这一构造地貌差异在鲁丹阶—埃隆阶之交表现得更为明显,如川东地区C3沉积序列以粉砂质泥页岩为主,局部夹薄砂层,为贫氧环境,有机碳含量明显降低,而在鄂西地区则直接表现为该时期笔石带与对应地层

的缺失,这与前人提出的全球性冰川活动及海平面下降时间相吻合(Haq and Schutter, 2008; Munnecke *et al.*, 2010; Barrera *et al.*, 2020; Cai *et al.*, 2022),表明此时华南地区记录了这一次的全球性冰川活动增强事件。海平面的下降导致川东拗陷区形成了富陆源物质的贫有机质粉砂质页岩夹薄层砂岩,而鄂西地区由于构造地貌相对过高形成了沉积间断(图2)。这一差异在埃隆阶C4沉积旋回中仍有体现,尽管CIA指数的跃升和强还原条件的再次形成显示两地均受到

全球冰川型海平面上升的影响,但川东地区黑色岩系的规模与有机碳含量明显高于鄂西地区,表明在埃隆阶沉积初期,两地的构造地貌仍旧存在差异(图9~11)。但随着区域构造挤压作用的持续增强和川东地区的补偿沉积,两地地貌差异也逐渐减小,而以抬升为主的构造活动和持续增强的风化作用最终导致黑色岩系发育的终止。

由此可见,川东—鄂西地区黑色岩系沉积差异主要形成于早志留世,区域构造地貌差异沉降是导致两地黑色岩系差异发育的关键,而鲁丹阶—埃隆阶之交冰川活动的加强则进一步凸显了两地黑色岩系差异发育特征。因此,在页岩气勘探中寻找优质页岩发育有利区必须加强古地貌恢复工作,明确海平面快速上升期盆地拗陷区的分布范围。对于鄂西地区五峰组—龙马溪组,远离隆起区的当阳盆地与保康一带应该是厚层富有机质页岩的发育区,可作为后续深层页岩气勘探的潜在有利目标。

6 结论

(1) 川东—鄂西地区五峰组—龙马溪组黑色岩系具有旋回性发育的特征。其中五峰组沉积旋回表现为有机质含量的逐渐增高,硅质矿物增多,而在五峰组顶部快速下降;龙马溪组黑色岩系则表现为每期沉积旋回底部有机质含量快速增加,而后缓慢下降。五峰组与龙马溪组差异沉积旋回样式表明晚奥陶世与早志留世区域黑色岩系沉积主控因素有所不同。

(2) 川东与鄂西地区五峰组—龙马溪组黑色岩系发育特征具有明显差异。尽管两地五峰组黑色岩系岩性、厚度及旋回样式基本相似,但自龙马溪组开始川东地区黑色富有机质页岩厚度明显增大,并且陆源碎屑供给增多,在鲁丹阶—埃隆阶之交沉积了一套厚层粉砂质泥岩夹薄层砂岩,而在鄂西地区表现为地层缺失,显示两地黑色岩系的沉积环境差异在志留纪初期开始明显扩大。

(3) 构造古地貌与全球冰川型海平面升降变化是导致川东—鄂西地区龙马溪组黑色岩系差异发育的关键。志留纪初期川东地区构造地貌的持续下拗为龙马溪组厚层黑色岩系的形成奠定了基础,而鄂西地区的相对抬升则制约了富有机质页岩的发育。与此同时,鲁丹阶—埃隆阶之交的全球性冰川型海平面下降导致了鄂西地区发育沉积间断,进一步扩大了川东与鄂西地区黑色岩系沉积差异。

致谢 感谢审稿专家及编辑部老师对本文提出的宝贵建议和意见。

参考文献(References)

- 蔡全升,陈孝红,张国涛,等. 2021. 鄂西宜昌地区下古生界五峰组—龙马溪组页岩气储层发育特征与勘探潜力[J]. 石油与天然气地质, 42(1): 107-123. [Cai Quansheng, Chen Xiaohong, Zhang Guotao, et al. 2021. Characteristics and exploration potential of the Wufeng-Longmaxi shale gas reservoirs of Lower Paleozoic in Yichang area, western Hubei province, China[J]. Oil & Gas Geology, 42(1): 107-123.]
- 蔡全升,胡明毅,杨智,等. 2024. 湘西前陆拗陷区五峰-龙马溪组黑色岩系沉积环境与有机质富集机制:以TD2井为例[J]. 地球科学, 49(07): 2330-2345. [Cai Quansheng, Hu Mingyi, Yang Zhi, et al. 2024. Sedimentary environment and organic matter accumulation of black rock series of Wufeng-Longmaxi Formations in foreland depression, western Hunan province: An example from well TD2 in Changde area[J]. Earth Science, 49(07): 2330-2345.]
- 陈孝红,张保民,陈林,等. 2018. 鄂西宜昌地区晚奥陶世—早志留世页岩气藏的主控地质因素与富集模式[J]. 地球学报, 39(3): 257-268. [Chen Xiaohong, Zhang Baomin, Chen Lin, et al. 2018. Main geological controlling factors and enrichment pattern of shale gas reservoirs in the Late Ordovician-Early Silurian strata of Yichang, western Hubei province[J]. Acta Geoscientica Sinica, 39(3): 257-268.]
- 陈旭,樊隽轩,张元动,等. 2015. 五峰组及龙马溪组黑色页岩在扬子覆盖区内的划分与圈定[J]. 地层学杂志, 39(4): 351-358. [Chen Xu, Fan Junxuan, Zhang Yuandong, et al. 2015. Subdivision and delineation of the Wufeng and Lungmachi black shales in the sub-surface areas of the Yangtze Platform[J]. Journal of Stratigraphy, 39(4): 351-358.]
- 黄梓桑,王兴志,杨西燕,等. 2021. 沉积环境对页岩中有机质富集的约束:以蜀南地区五峰组—龙马溪组为例[J]. 沉积学报, 39(3): 631-644. [Huang Zisang, Wang Xingzhi, Yang Xiyan, et al. 2021. Constraints of sedimentary environment on organic matter accumulation in shale: A case study of the Wufeng-Longmaxi Formations in the southern Sichuan Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 39(3): 631-644.]
- 李琪琪,蓝宝锋,李刚权,等. 2021. 黔中隆起北缘五峰—龙马溪组页岩元素地球化学特征及其地质意义[J]. 地球科学, 46(9): 3172-3188. [Li Qiqi, Lan Baofeng, Li Gangquan, et al. 2021. Element geochemical characteristics and their geological significance of Wufeng-Longmaxi Formation shales in north margin of the central Guizhou uplift[J]. Earth Science, 46(9): 3172-3188.]
- 卢贤志,沈俊,郭伟,等. 2021. 中上扬子地区奥陶纪—志留纪之交火山作用对有机质富集的影响[J]. 地球科学, 46(7): 2329-2340. [Lu Xianzhi, Shen Jun, Guo Wei, et al. 2021. Influence of mercury geochemistry and volcanism on the enrichment of organic matter near the Ordovician Silurian transition in the Middle and Upper

- Yangtze[J]. *Earth Science*, 46(7): 2329-2340.]
- 牟传龙,周恩恩,梁薇,等. 2011. 中上扬子地区早古生代烃源岩沉积环境与油气勘探[J]. *地质学报*, 85(4): 526-532. [Mu Chuanlong, Zhou Kenken, Liang Wei, et al. 2011. Early Paleozoic sedimentary environment of hydrocarbon source rocks in the Middle-Upper Yangtze region and petroleum and gas exploration[J]. *Acta Geologica Sinica*, 85(4): 526-532.]
- 聂海宽,张柏桥,刘光祥,等. 2020. 四川盆地五峰组—龙马溪组页岩气高产地质原因及启示:以涪陵页岩气田JY6-2HF为例[J]. *石油与天然气地质*, 41(3): 463-473. [Nie Haikuan, Zhang Baiqiao, Liu Guangxiang, et al. 2020. Geological factors contributing to high shale gas yield in the Wufeng-Longmaxi Fms of Sichuan Basin: A case study of well JY6-2HF in Fuling shale gas field[J]. *Oil & Gas Geology*, 41(3): 463-473.]
- 沈均均,杨丽亚,王玉满,等. 2025. 中扬子西部下古生界页岩沉积古环境[J]. *沉积学报*, 43(01): 314-334. [Shen Junjun, Yang Liya, Wang Yuman, et al. 2025. Sedimentary paleoenvironment of the Lower Paleozoic shale in the western Middle Yangtze[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 43(01): 314-334.]
- 苏文博,李志明,史晓颖,等. 2006. 华南五峰组—龙马溪组与华北下马岭组的钾质斑脱岩及黑色岩系:两个地史转折期板块构造运动的沉积响应[J]. *地学前缘*, 13(6): 82-95. [Su Wenbo, Li Zhiming, Shi Xiaoying, et al. 2006. K-bentonites and black shales from the Wufeng-Longmaxi Formations (Early Paleozoic, South China) and Xiamaling Formation (Early Neoproterozoic, North China): Implications for tectonic processes during two important transitions[J]. *Earth Science Frontiers*, 13(6): 82-95.]
- 王超,张柏桥,舒志国,等. 2018. 四川盆地涪陵地区五峰组—龙马溪组海相页岩岩相类型及储层特征[J]. *石油与天然气地质*, 39(3): 485-497. [Wang Chao, Zhang Boqiao, Shu Zhiguo, et al. 2018. Lithofacies types and reservoir characteristics of marine shales of the Wufeng Formation-Longmaxi Formation in Fuling area, the Sichuan Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 39(3): 485-497.]
- 王兴,田景春,林小兵,等. 2024. 渝东地区五峰组—龙马溪组沉积环境及有机质主控因素分析:以接龙剖面为例[J]. *沉积学报*, 42(1): 309-323. [Wang Xing, Tian Jingchun, Lin Xiaobing, et al. 2024. Sedimentary environment and controlling factors of organic matter accumulation in Wufeng Formation-Longmaxi Formation: A case study of Jielong section in eastern Chongqing[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 42(1): 309-323.]
- 王恽,戎嘉余,詹仁斌,等. 2013. 鄂西南奥陶系—志留系交界地层研究兼论宜昌上升[J]. *地层学杂志*, 37(3): 264-274. [Wang Yi, Rong Jiayu, Zhan Renbin, et al. 2013. On the Ordovician-Silurian boundary strata in southwestern Hubei, and the Yichang uplift[J]. *Journal of Stratigraphy*, 37(3): 264-274.]
- 肖斌,刘树根,冉波,等. 2021. 四川盆地北缘五峰组和龙马溪组沉积构造格局研究[J]. *地球科学*, 46(7): 2449-2465. [Xiao Bin, Liu Shugen, Ran Bo, et al. 2021. Study on sedimentary tectonic pattern of Wufeng Formation and Longmaxi Formation in the northern margin of Sichuan Basin, South China[J]. *Earth Science*, 46(7): 2449-2465.]
- 杨平,汪正江,余谦,等. 2019. 四川盆地西南缘五峰—龙马溪组页岩气资源潜力分析[J]. *中国地质*, 46(3): 601-614. [Yang Ping, Wang Zhengjiang, Yu Qian, et al. 2019. An resources potential analysis of Wufeng-Longmaxi Formation shale gas in the southwestern margin of Sichuan Basin[J]. *Geology in China*, 46(3): 601-614.]
- 翟刚毅,王玉芳,包书景,等. 2017. 我国南方海相页岩气富集高产主控因素及前景预测[J]. *地球科学*, 42(7): 1057-1068. [Zhai Gangyi, Wang Yufang, Bao Shujing, et al. 2017. Major factors controlling the accumulation and high productivity of marine shale gas and prospect forecast in southern China[J]. *Earth Science*, 42(7): 1057-1068.]
- 张琳娜,樊隽轩,陈清. 2016. 华南上奥陶统观音桥层的空间分布和古地理重建[J]. *科学通报*, 61(18): 2053-2063. [Zhang Linna, Fan Junxuan, Chen Qing. 2016. Geographic distribution and palaeogeographic reconstruction of the Upper Ordovician Kuanyinchiao bed in South China[J]. *Chinese Science Bulletin*, 61(18): 2053-2063.]
- 张茜,张海全,王剑,等. 2024. 康滇古陆两侧五峰组—龙马溪组沉积演化差异[J]. *沉积学报*, 42(06): 2144-2158. [Zhang Qian, Zhang Haiquan, Wang Jian, et al. 2024. Sedimentary evolution difference in the black mudstone of Wufeng Formation-Longmaxi Formation on both sides of Kangdian ancient land[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 42(06): 2144-2158.]
- 邹才能,董大忠,王玉满,等. 2015. 中国页岩气特征、挑战及前景(一)[J]. *石油勘探与开发*, 42(6): 689-701. [Zou Caineng, Dong Dazhong, Wang Yuman, et al. 2015. Shale gas in China: Characteristics, challenges and prospects (I) [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 42(6): 689-701.]
- Algeo T J, Liu J S. 2020. A re-assessment of elemental proxies for paleoredox analysis[J]. *Chemical Geology*, 540: 119549.
- Algeo T J, Tribouillard N. 2009. Environmental analysis of paleoceanographic systems based on molybdenum-uranium covariation[J]. *Chemical Geology*, 268(3/4): 211-225.
- Barrera I A R, Nogueira A C R, Bandeira J. 2020. The Silurian glaciation in the eastern Parnaíba Basin, Brazil: Paleoenvironment, sequence stratigraphy and insights for the evolution and paleogeography of West Gondwana[J]. *Sedimentary Geology*, 406: 105714.
- Cai Q S, Hu M Y, Kane O I, et al. 2022. Cyclic variations in paleoenvironment and organic matter accumulation of the Upper Ordovician – Lower Silurian black shale in the Middle Yangtze region, South China: Implications for tectonic setting, paleoclimate, and sea-level change[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 136: 105477.
- Chen L, Lu Y C, Jiang S, et al. 2015. Sequence stratigraphy and its application in marine shale gas exploration: A case study of the Lower Silurian Longmaxi Formation in the Jiaoshiba shale gas field and its adjacent area in southeast Sichuan Basin, SW China [J]. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 27: 410-423.

- Chen X, Rong J Y, Li Y, et al. 2004. Facies patterns and geography of the Yangtze region, South China, through the Ordovician and Silurian transition[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 204(3/4): 353-372.
- Dong D Z, Shi Z S, Guan Q Z, et al. 2018. Progress, challenges and prospects of shale gas exploration in the Wufeng-Longmaxi reservoirs in the Sichuan Basin[J]. *Natural Gas Industry B*, 5(5): 415-424.
- Fan J X, Melchin M J, Chen X, et al. 2011. Biostratigraphy and geography of the Ordovician-Silurian Lungmachi black shales in South China[J]. *Science China Earth Sciences*, 54(12): 1854-1863.
- Gorjan P, Kaiho K, Fike D A, et al. 2012. Carbon- and sulfur-isotope geochemistry of the Hirnantian (Late Ordovician) Wangjiawan (Riverside) section, South China: Global correlation and environmental event interpretation[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 337-338: 14-22.
- Haq B U, Schutter S R. 2008. A chronology of Paleozoic sea-level changes[J]. *Science*, 322(5898): 64-68.
- Huang H Y, He D F, Li D, et al. 2020. Geochemical characteristics of organic-rich shale, Upper Yangtze basin: Implications for the Late Ordovician-Early Silurian orogeny in South China[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 554: 109822.
- Huang H Y, He D F, Li Y Q, et al. 2018. Silurian tectonic-sedimentary setting and basin evolution in the Sichuan area, Southwest China: Implications for palaeogeographic reconstructions[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 92: 403-423.
- Li N, Li C, Fan J X, et al. 2019. Sulfate-controlled marine euxinia in the semi-restricted inner Yangtze Sea (South China) during the Ordovician-Silurian transition[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 534: 109281.
- Liu J B, Rong J Y, Chen X. 2001. How the Gondwana glaciation induced the deposition of Hirnantian carbonates (Latest Ordovician) in South China[J]. *Gondwana Research*, 4(4): 688-689.
- Liu Z H, Algeo T J, Guo X S, et al. 2017. Paleo-environmental cyclicity in the Early Silurian Yangtze Sea (South China): Tectonic or glacio-eustatic control? [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 466: 59-76.
- Lu Y B, Huang C J, Jiang S, et al. 2019. Cyclic Late Katian through Hirnantian glacioeustasy and its control of the development of the organic-rich Wufeng and Longmaxi shales, South China[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 526: 96-109.
- Ma Y Q, Fan M J, Lu Y C, et al. 2016. Geochemistry and sedimentology of the Lower Silurian Longmaxi mudstone in southwestern China: Implications for depositional controls on organic matter accumulation[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 75: 291-309.
- Maletz J, Wang C S, Wang X F. 2021. Katian (Ordovician) to Aeronian (Silurian, Llandovery) graptolite biostratigraphy of the YD-1 drill core, Yuanan county, Hubei province, China[J]. *Papers in Palaeontology*, 7(1): 163-194.
- McLennan S M. 1993. Weathering and global denudation[J]. *The Journal of Geology*, 101(2): 295-303.
- Melchin M J, Mitchell C E, Holmden C, et al. 2013. Environmental changes in the Late Ordovician-Early Silurian: Review and new insights from black shales and nitrogen isotopes[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 125(11/12): 1635-1670.
- Munnecke A, Calner M, Harper D A T, et al. 2010. Ordovician and Silurian sea-water chemistry, sea level, and climate: A synopsis[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 296(3/4): 389-413.
- Nesbitt H W, Young G M. 1982. Early Proterozoic climates and plate motions inferred from major element chemistry of lutites[J]. *Nature*, 299(5885): 715-717.
- Price J R, Velbel M A. 2003. Chemical weathering indices applied to weathering profiles developed on heterogeneous felsic metamorphic parent rocks[J]. *Chemical Geology*, 202(3/4): 397-416.
- Qiu Z, Zou C N, Mills B J W, et al. 2022. A nutrient control on expanded anoxia and global cooling during the Late Ordovician mass extinction[J]. *Communications Earth & Environment*, 3(1): 82.
- Rimmer S M. 2004. Geochemical paleoredox indicators in Devonian-Mississippian black shales, Central Appalachian Basin (USA)[J]. *Chemical Geology*, 206(3/4): 373-391.
- Taylor S R, McLennan S M. 1985. The continental crust: Its composition and evolution[M]. Oxford: Blackwell Scientific Publications: 1-312.
- Tribouillard N, Algeo T J, Lyons T, et al. 2006. Trace metals as paleoredox and paleoproductivity proxies: An update[J]. *Chemical Geology*, 232(1/2): 12-32.
- Wang H Y, Shi Z S, Sun S S. 2021. Biostratigraphy and reservoir characteristics of the Ordovician Wufeng Formation-Silurian Longmaxi Formation shale in the Sichuan Basin and its surrounding areas, China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 48(5): 1019-1032.
- Wang P, Du Y S, Yu W C, et al. 2020. The Chemical Index of Alteration (CIA) as a proxy for climate change during glacial-interglacial transitions in Earth history[J]. *Earth-Science Reviews*, 201: 103032.
- Wang Y X, Xu S, Hao F, et al. 2019. Geochemical and petrographic characteristics of Wufeng-Longmaxi shales, Jiaoshiba area, Southwest China: Implications for organic matter differential accumulation[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 102: 138-154.
- Yan D T, Chen D Z, Wang Q C, et al. 2010. Large-scale climatic fluctuations in the latest Ordovician on the Yangtze Block, South China [J]. *Geology*, 38(7): 599-602.
- Yan D T, Chen D Z, Wang Z Z. 2019. Climatic and oceanic controlled deposition of Late Ordovician-Early Silurian black shales on the north Yangtze Platform, South China[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 110: 112-121.
- Zou C N, Qiu Z, Poulton S W, et al. 2018. Ocean euxinia and climate change "double whammy" drove the Late Ordovician mass extinction[J]. *Geology*, 46(6): 535-538.

Sedimentary Differences and Formation Mechanism of the Wufeng Formation-Longmaxi Formation Black Rock Series in Eastern Sichuan and Western Hubei

ZHAO Wei¹, CAI QuanSheng^{1,2}, HU ZhongGui¹, LÜ PinYang¹, YANG Zhi³, LI MengXiao¹,
WEN YaRu², ZHANG ChenYu¹

1. School of Geosciences, Yangtze University, Wuhan 430100, China

2. Hubei Key Laboratory of Resources and Eco-environment Geology, Hubei Geological Bureau, Wuhan 430034, China

3. Research Institute of Petroleum Exploration & Development, PetroChina, Beijing 100083, China

Abstract: [Objective] The Wufeng Formation-Longmaxi Formation black rock series in eastern Sichuan and western Hubei is a focus for marine shale gas exploration in South China. These show great differences in sedimentary characteristics, which record major geological events during the Ordovician – Silurian transition. Further knowledge of these differences is of benefit to exploration for shale gas in western Hubei, and helps to understand global paleoclimate and sea-level changes during that time. [Methods] The sedimentary properties, main influencing factors and sedimentary processes of the black rock series in the Wufeng Formation and Longmaxi Formation were studied in detail by petrological, sedimentological and geochemical analysis. [Results] The sedimentary attributes of the Wufeng Formation are similar in both study areas, but in the Longmaxi Formation they differ significantly. In eastern Sichuan, the large thickness of the Longmaxi black shale with completed graptolite zones and thick silty shale in the Rhuddanian-Aeronian transition is overlain by thick, organic-rich shale. Three long-term sedimentary cycles are recognized in the Longmaxi black rock series, but in western Hubei the Longmaxi black shale is very thin and only two long-term sedimentary cycles are identified. Neither silty shale nor *Coronograptus cyphus* and *Demirastrites triangulatus* graptolite zones are present in the Rhuddanian-Aeronian transition, but thin lime-bearing dolomitic mudstone covered by thin organic-rich shale are developed. Additionally, the Longmaxi black shale contains less quartz in eastern Sichuan than in western Hubei. [Conclusions] In this study, tectonic paleogeomorphology and paleoclimate changes are considered to be the main factors influencing the different evolutionary histories of the Wufeng Formation-Longmaxi Formation black rock series in the two study areas. During the Upper Ordovician, eastern Sichuan and western Hubei both subsided as a result of the Cathaysia Block-Yangtze Block collision. The paleogeomorphology and sedimentary environments in eastern Sichuan and western Hubei are not significantly different, but continuous tectonic compression beginning in the Early Silurian caused non-uniform subsidence. Continuing subsidence in eastern Sichuan and gradual uplift in western Hubei led to significantly different thicknesses of the Rhuddanian black shale in the two regions. Global sea-level fall during the Rhuddanian-Aeronian transition related to intensified glaciation further exacerbated the sedimentary differences in the two study areas, resulting in a sedimentary gap in western Hubei and abundant sandy deposits with low TOC in eastern Sichuan. Subsequent significant sea-level rise following global climatic warming promoted the development of black shale in both areas, although thicker in eastern Sichuan than in western Hubei. However, gradually intensifying tectonic compression and gradual sea-level fall, along with sufficient terrigenous sediment supply, sustained a sedimentary environment in both regions that led to the termination of development of the Longmaxi black shale in the two study areas.

Key words: Wufeng Formation; Longmaxi Formation; sedimentary differences; eastern Sichuan; western Hubei

Foundation: China National Petroleum Corporation Innovation Fund, No. 2021DQ02-0101; Research Fund Program of Hubei Key Laboratory of Resources and Eco-Environment Geology, No. HBREGKFJJ-202305; College Students' Innovation and Entrepreneurship Training Program, No. Yz2022011

Corresponding author: CAI QuanSheng, E-mail: cqsh0713@163.com