



沉积学报
Acta Sedimentologica Sinica
ISSN 1000-0550, CN 62-1038/P

《沉积学报》网络首发论文

题目: 川南五峰组—龙马溪组页岩岩相特征及沉积作用
作者: 刘雨迪, 梁超, 操应长, 吴靖, 韩豫, 谢浩然, 罗子良, 马晓月
DOI: 10.14027/j.issn.1000-0550.2022.153
收稿日期: 2022-07-05
网络首发日期: 2023-02-10
引用格式: 刘雨迪, 梁超, 操应长, 吴靖, 韩豫, 谢浩然, 罗子良, 马晓月. 川南五峰组—龙马溪组页岩岩相特征及沉积作用[J/OL]. 沉积学报.
<https://doi.org/10.14027/j.issn.1000-0550.2022.153>



网络首发: 在编辑部工作流程中, 稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定, 且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式(包括网络呈现版式)排版后的稿件, 可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定; 学术研究成果具有创新性、科学性和先进性, 符合编辑部对刊文的录用要求, 不存在学术不端行为及其他侵权行为; 稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准, 正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性, 录用定稿一经发布, 不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容, 只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认: 纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司签约, 在《中国学术期刊(网络版)》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版, 以单篇或整期出版形式, 在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊(网络版)》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物(ISSN 2096-4188, CN 11-6037/Z), 所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

川南五峰组—龙马溪组页岩岩相特征及沉积作用

刘雨迪¹，梁超^{1,2}，操应长^{1,2}，吴靖³，韩豫¹，谢浩然¹，罗子良¹，
马晓月¹

1. 中国石油大学（华东）地球科学与技术学院，山东青岛 266580

2. 中国石油大学（华东）深层油气重点实验室，山东青岛 266580

3. 山东科技大学地球科学与工程学院，山东青岛 266590

摘要 【目的】川南地区上奥陶统和下志留统黑色页岩是页岩气勘探的主要目标，为了探究此套页岩的岩相划分、沉积环境以及沉积过程。【方法】通过岩心、光学显微镜以及扫描电镜的观察与分析，根据矿物组成及含量、沉积构造特征，并综合考虑生物作用及成岩作用对岩相进行划分；利用氧化—还原指标（U/Th、V/Cr、V/(V+Ni)、Ni/Co）、海平面变化指标（Ce*）、水体滞留程度指标（Mo/TOC）、古气候指标（Sr/Cu）、古盐度指标（Sr/Ba）以及古生产力指标（Cu、生源 Ba）对古环境进行分析，并基于岩心和薄片观察、X 射线荧光扫描以及矿物 X 衍射全岩分析对沉积过程进行识别。【结果】结果显示：五峰组—龙马溪组页岩识别出六种岩相：生物硅质页岩、黏土质页岩、（长英质—钙质）粉砂页岩、钙质粉砂页岩、钙质页岩以及长英质粉砂页岩。沉积环境自下而上经历 5 个阶段的变化。五峰组—龙马溪组页岩主要是在低能条件下悬浮沉积形成，也在五峰组中部和龙马溪组下部发育上升流沉积，五峰组顶部发育少量风暴流沉积，在龙马溪组上部也见有重力滑塌、碎屑流、和浊流沉积。【结论】沉积环境的频繁变化以及沉积过程的多样性控制了岩相的类型与特征，进一步导致不同岩相的有机质含量、孔隙度、含气量等储层品质因素存在显著差异，后续仍需对页岩岩相与储层品质等方面加强研究，为页岩气的勘探与开发提供理论依据。

关键词 五峰组—龙马溪组；岩相特征；古环境；沉积过程；沉积模式**第一作者简介** 刘雨迪，男，2000 年出生，硕士研究生，细粒沉积学，E-mail: s21010026@s.upc.edu.cn**通信作者** 梁超，男，教授，E-mail: liangchao0318@163.com**中图分类号** P618.13 **文献标志码** A

0 引言

细粒沉积岩约占沉积岩的 2/3，但由于粒度小、观察难度大以及受超微观实验条件的限制，其沉积、成岩作用仍是地质界的难题，且细粒物质各组分的物质来源、形成机制以及沉积过程极其复杂^[1-3]。岩相及其沉积环境是研究细粒沉积岩的两大基本问题^[4-7]。岩相的发育、垂向变化，以及其沉积时的古气候、古环境对于细粒沉积岩的研究有着至关重要的意义^[8-9]。同时也为页岩油气勘探开发和寻找有利勘探目标提供理论支撑^[2,10-13]。

在五峰组到龙马溪组沉积期间，全球发生了包括火山喷发、冰期事件、生物大灭绝等

收稿日期：2022-07-05；**收修改稿日期**：2022-11-21**基金项目**：国家自然科学基金（41902134, 42172165）；中央高校基本科研业务费专项资金（22CX06001A）；泰山学者工程（TSQN201812030）
[Foundation: National Natural Science Foundation of China, No. 41902134, 42172165; The Fundamental Research Funds for the Central Universities, No. 22CX06001A; The Taishan Scholars Program, No. TSQN201812030]

一系列的地质事件^[14-18]。受多种地质事件的综合影响,沉积五峰组—龙马溪组页岩时的气候、海平面、氧化还原性、水体封闭性、初级生产力等沉积环境要素发生频繁变化,进一步控制着岩相的类型与特征,同时也导致了其垂向上的非均质性。由于岩相的类型多样,不同岩相的有机质含量、含气量存在显著差异,在页岩气勘探与开发中受到重点关注^[19-21]。因此,五峰组—龙马溪组页岩的形成及演化值得进行深入研究^[19,22-23]。

本文综合运用野外观察、岩心描述、镜下观察、电镜观察、TOC 含量测试及元素地球化学测试分析,对四川盆地川南五峰组—龙马溪组页岩进行研究,刻画页岩的岩相类型和沉积特征,分析古气候、古盐度、古水深和古生产力等古沉积环境要素及其演化规律,并建立页岩沉积模式,从而为该区域下一步的页岩的勘探和开发提供理论依据。

1 地质概况

奥陶纪期间,华南克拉通是冈瓦纳大陆西北缘构造复杂地区的一个微大陆^[24]。晚奥陶世,盆地收到周边挤压作用,使得上扬子海域被围限成局限海盆(图 1a);到早志留世,川中隆起的范围不断扩大,使得四川盆地成为古隆起带包围的局限陆棚环境^[25]。且奥陶纪末和志留纪初,发生了两次全球性的海侵^[26]。

四川盆地位于我国西南部,属于扬子板块内的次一级的克拉通盆地^[27],可进一步划分为 5 个次级的构造单元,包括川北低缓构造区、川中低缓构造区、川东高陡构造带、川西低陡构造区以及川南中低缓构造带^[28],研究区位于川南中低缓构造带(图 1b)。

受海侵以及构造活动的影响,沉积了五峰组—龙马溪组富有机质黑色页岩。上奥陶统五峰组主要由黑色硅质泥岩组成,并含有丰富的笔石、放射虫和海绵骨针等化石。晚奥陶世,观音桥段主要沉积生物介壳灰岩,被认为是冰期海平面短暂下降的结果^[29]。在志留纪早期,全球冰川融化,海平面快速上升,导致龙马溪组主要沉积黑色硅质泥岩、灰色粉砂岩夹层泥岩以及灰色黏土质泥岩(图 1c)。

2 岩相类型及特征

2.1 矿物组成

五峰组—龙马溪组页岩矿物以石英、碳酸盐矿物和黏土矿物为主,含钾长石、斜长石、黄铁矿等(图 2)。石英含量介于 9.7%~72.8%,平均值为 33.88%,由陆源石英、生物成因石英以及成岩自生石英构成^[30];斜长石含量介于 1.4%~9.6%,平均值为 4.09%;方解石含

量介于 7.2%~38%，平均值为 25.1%，呈碎屑颗粒或纹层状的形式存在；白云石含量介于 3.6%~42.6%，平均值为 10.43%；黏土矿物含量介于 5.7%~51.2%，平均值为 24.73%，主要由伊利石、伊蒙混层及绿泥石组成；黄铁矿含量介于 0.7%~7%，平均值为 2.68，呈自形状或草莓状黄铁矿的形式存在。

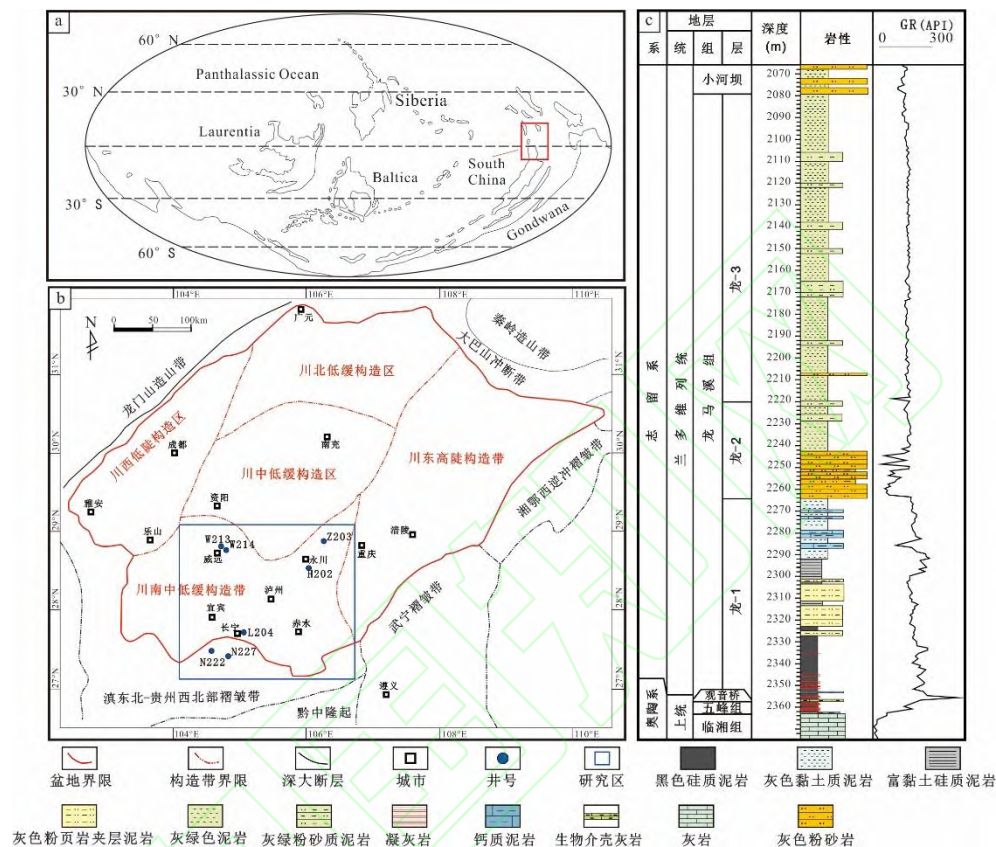


图 1 晚奥陶世全球古地理图 (a) (据文献[24]修改)、研究区构造简图 (b) (据文献[28]修改) 及地层柱状图 (c) (据文献[29]修改)

Fig.1 Late Ordovician global paleogeographic map (a), location of the study area (b), structural map, and lithologic histogram (c) (modified from references [24,28-29])

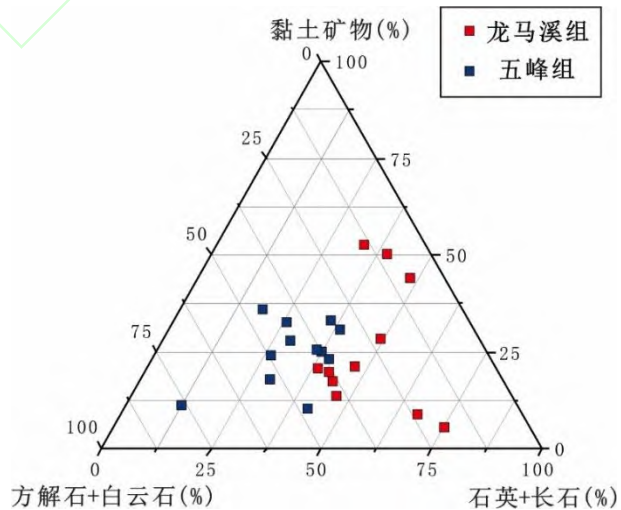


图2 川南地区 N222 井五峰组—龙马溪组主要矿物组成

Fig.2 Main mineral composition of the Wufeng Formation-Longmaxi Formation in well N222 in the southern Sichuan Basin

2.2 岩相类型

岩相是一定沉积环境中形成的岩石或岩石组合,既包含了岩石类型、颜色、结构、沉积构造等宏观信息,也包含无机矿物与有机组分的微观信息^[31]。关于页岩岩相的划分,前人已经进行了大量研究,合理的岩相划分能反映地层主要的、典型的岩石类型^[32]。本文通过岩心观察、镜下观察以及扫描电镜分析,根据矿物组成及含量、沉积构造特征,以长英质(石英+长石)、钙质(方解石+白云石)和黏土矿物为三端元进行划分,并综合考虑生物作用及成岩作用,识别出6种页岩岩相类型:生物硅质页岩、黏土质页岩、(长英质—钙质)粉砂页岩、钙质粉砂页岩,长英质粉砂页岩以及钙质页岩。除此之外,还发育少量凝灰岩和生物介壳灰岩。

2.2.1 生物硅质页岩

生物硅质页岩主要分布在五峰组的中部以及龙马溪组下部,呈层状分布,厚度一般0.2~1 cm,少量厚几百微米,上下界面呈现突变接触(图3a1)。岩心颜色多为黑色—灰黑色,硬度普遍比较大,TOC含量平均为3.31%。生物硅质页岩中SiO₂含量高,放射虫、海绵骨针等化石丰富(图3a3),由于方解石在放射虫的空腔内有充足的空间生长,大多呈自形(图3a2, a3)。前人研究中所绘制的Al-Fe-Mn三元图证实研究区的石英并非来源于热液,由黏土矿物转化产生的SiO₂大多形成分散在黏土基质中的粒状微晶石英^[33-34],由陆源搬运而来的石英则呈碎屑外形,而生物硅质页岩中大部分硅质呈隐晶质充填在放射虫化石中(图3a2),故排除其黏土转化及陆源成因。且放射虫、海绵等等硅质生物化石丰富,并结合其所在层位具较高的古生产力,推测其生物硅质页岩中的硅质来源为硅质生物碎屑的部分溶解。

2.2.2 黏土质页岩

黏土质页岩主要分布在五峰组的底部以及龙马溪组的上部,发育水平层理和块状层理,岩心呈黑色—灰黑色(图3b1),硬度相对较小,TOC含量平均为3.66%。黏土矿物含量均值大于50%(图3b3),主要为伊利石,其次为伊蒙混层及少量绿泥石,有少量石英、长石或碳酸盐矿物漂浮在黏土矿物中(图3b2),颗粒粒度一般小于62.5 μm。部分可见黏土透视镜体(图3b2),其可能为再搬运的泥质碎屑^[35]。

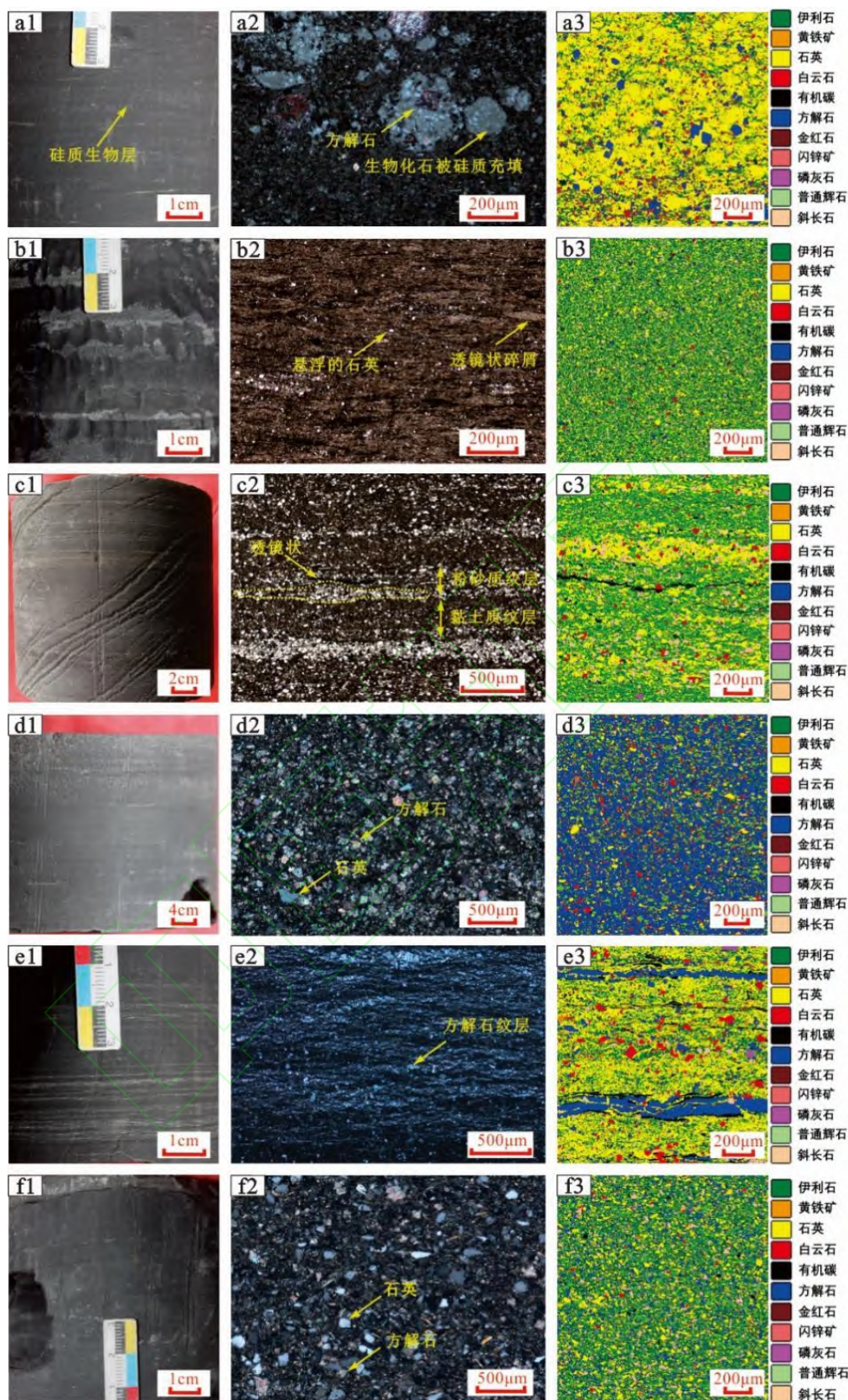


图3 川南地区五峰组—龙马溪组页岩岩相类型及特征

(a1) 生物硅质页岩，层状分布，上下界面突变，L204井，3 846.01 m，五峰组；(a2) 生物化石丰富，方解石在放射虫空腔中生长，L205井，4 038.31 m，五峰组；(a3) SEM-矿物扫描图像，硅质含量丰富，L204井，3 846.01 m，五峰组；(b1) 黏土质页岩，发育水平层理和块状层理，Z203井，4 056.37 m，龙马溪组；(b2) 黏土含量丰富，见悬浮的石英颗粒以及透镜

状泥质碎屑, Z203 井, 4 056.37 m, 龙马溪组; (b3) SEM-矿物扫描图像, 黏土矿物为主要矿物, L204 井, 3 851.90 m, 五峰组; (c1) (长英质—钙质) 粉砂页岩, 发育平行层理, W214 井, 3 566.90 m, 龙马溪组; (c2) 纹层发育, 粉砂质纹层与泥质纹层相间, W214 井, 3 566.90 m, 龙马溪组; (c3) SEM-矿物扫描图像, 粉砂质纹层与泥质纹层相间, N227 井, 3 569.90 m, 龙马溪组; (d1) 钙质粉砂页岩, 通常不显层理, W213 井, 3 746.60 m, 龙马溪组; (d2) 矿物方解石为主, 石英较少, N222 井, 4 330.90 m, 五峰组; (d3) SEM-矿物扫描图像, 矿物以方解石为主, N222 井, 4 331.00 m, 五峰组; (e1) 钙质页岩, 方解石纹层发育, W213 井, 3 741.35 m, 龙马溪组; (e2) 方解石纹层发育, N227 井 3 598.10 m, 五峰组; (e3) SEM-矿物扫描图像, 方解石纹层发育, W213, 3 741.40 m, 龙马溪组; (f1) 长英质粉砂页岩, 呈层状或块状分布, L204 井, 3 849.80 m, 五峰组; (f2) 石英颗粒含量丰富, 方解石含量较少, L204 井, 3 849.80 m, 五峰组; (f3) SEM-矿物扫描图像, 石英颗粒含量丰富, 方解石含量较少, L204 井, 3 849.84 m, 五峰组

Fig.3 Shale lithofacies types and characteristics of Wufeng Formation-Longmaxi Formation in the southern Sichuan Basin

2.2.3 (长英质—钙质) 粉砂页岩

(长英质—钙质) 粉砂页岩主要分布在龙马溪组中部, 发育平行层理, 透镜状层理以及韵律性层理, 岩心呈灰黑色—深灰色 (图 3c1), 硬度相对较大, TOC 含量平均 4.25%, 是有机质含量最丰富的岩相。薄片观察可见粉砂质 (亮纹层) 与泥质 (暗纹层) 相间 (图 3c2,c3), 其粉砂质纹层并不完全平行, 而是呈狭长的透镜状 (图 3c2)。长英质矿物与碳酸盐矿物含量大致相当, 均超过 30%, 分别为 38.27%和 33.64%, 碎屑颗粒分选较差, 磨圆中等, 呈次棱角—次圆状。有机质与黏土混杂在一起, 镜下很难分辨, 长石及云母在镜下很少看到。

2.2.4 钙质粉砂页岩

钙质粉砂页岩主要分布在五峰组中部, 通常不显层理, 岩心呈灰黑色 (图 3d1), 硬度相对较大, TOC 含量平均 3.5%。石英、长石、方解石均表现出碎屑外形, 以方解石为主 (图 3d2,d3), 含量平均为 54.56%, 其次为石英颗粒, 含量平均为 18.23%, 碎屑颗粒分选较好, 磨圆中等, 多呈次棱角—次圆状, 粒径一般在 10~50 μm 。黏土矿物含量平均为 23.07%。

2.2.5 钙质页岩

钙质页岩主要分布在龙马溪组下部, 纹层十分明显, 岩心呈灰黑色夹白色方解石纹层, 在手标本上可以见到灰质断口, TOC 含量较高, 平均为 5.35%。镜下可观察到纹层十分发育 (图 3e1), 为顺层分布的亮晶方解石纹层和暗色的黏土层的纹层组合 (图 3e2,e3), 方解石含量平均可达 30.5%, 其亮晶方解石为成岩作用形成。石英悬浮在黏土纹层中, 含量平均为 37.4%, 黏土矿物含量较低。

2.2.6 长英质粉砂页岩

长英质粉砂页岩主要分布在龙马溪组的下部和上部, 层状或块状分布, 岩心呈黑色或

灰黑色（图 3f1），硬度较大，TOC 含量平均 3.96%。镜下观察矿物以石英及长石为主（图 3f2,f3），石英含量平均为 42%，矿物分布均匀，磨圆中等，呈次棱角—次圆状，粒度大多在 20~50 μm 之间，方解石含量较少，平均为 11.8%，黏土矿物含量较高，平均约 43.4%。

2.3 岩相垂向序列

以 N222 井为例，分析了岩相的垂向演变（图 4），在五峰组沉积早期，黏土矿物、方解石含量较高，石英、长石、白云石含量较低，发育一套黏土质页岩，TOC 含量较高；五峰组中部，方解石、白云石含量增多，石英、长石、黏土矿物含量降低，发育钙质粉砂页岩与（长英质—钙质）粉砂页岩，TOC 含量较高；在五峰组及龙马溪组的交界处，此时发生冰期事件，发育一套生物介壳灰岩，TOC 含量较低；在龙马溪组沉积早期，石英、黏土矿物含量升高，长石、方解石含量降低，发育了一套钙质页岩、长英质粉砂页岩以及少量生物硅质页岩，TOC 含量逐渐降低；龙马溪组中上部，石英含量较高，长石、黏土矿物含量逐渐升高，方解石、白云石含量逐渐降低，发育（长英质—钙质）粉砂页岩、长英质粉砂页岩以及黏土质页岩，TOC 含量降低并保持稳定。岩相序列演变随着气候、海平面的升降以及沉积环境发生变化，TOC 含量以及各种矿物含量均随之变化，从而导致岩相的类型也发生相应的变化。

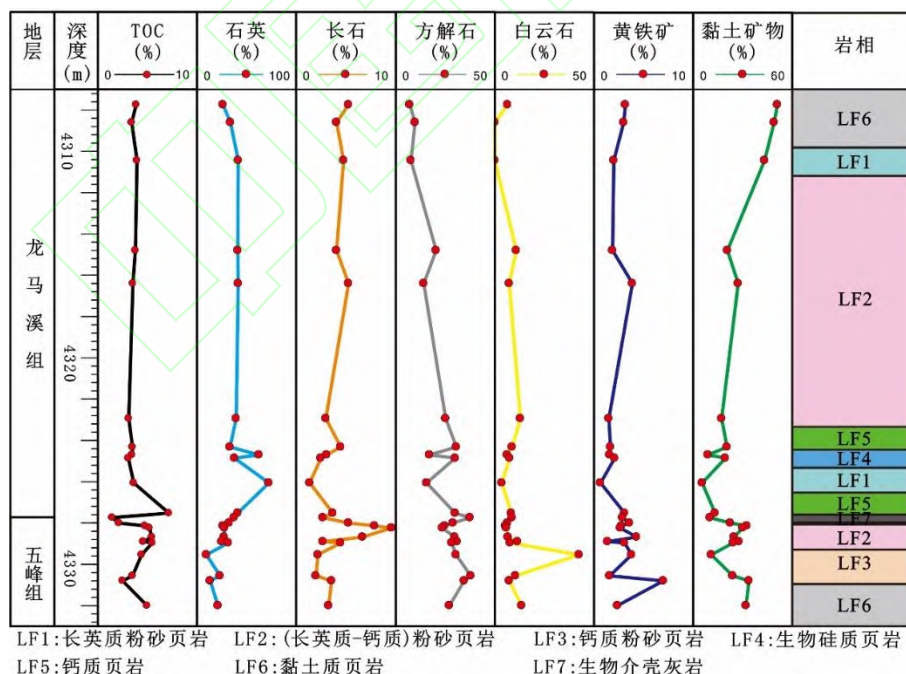


图 4 N222 井岩相综合柱状图

Fig.4 Comprehensive lithofacies histogram of well N222

3 地球化学特征及古环境分析

3.1 地球化学特征

宁 222 井五峰组—龙马溪组 22 个页岩样品 TOC 分布在 1.49%~7.17%，平均 3.90%，五峰组页岩的 TOC 含量波动幅度较大，龙马溪组 TOC 含量则较为稳定。微量元素分析显示，Cr 元素分布在 19.3~87 $\mu\text{g/g}$ ，平均 48.65 $\mu\text{g/g}$ ；Co 元素含量分布在 3.03~22.4 $\mu\text{g/g}$ ，平均含量为 10.21 $\mu\text{g/g}$ ；V 元素含量分布在 42.7~402 $\mu\text{g/g}$ ，平均含量为 145.45 $\mu\text{g/g}$ ；Ni 元素含量分布在 35~188 $\mu\text{g/g}$ ，平均含量为 81.79 $\mu\text{g/g}$ ；Zn 元素含量分布在 26.1~214 $\mu\text{g/g}$ ，平均含量为 101.15 $\mu\text{g/g}$ 。这些微量元素及其比值被广泛的用于古环境的判识（表 1）。

表 1 地球化学方法判识古环境

Table1 Geochemical methods used to identify the ancient environment		
古环境分析	地球化学特征	判识方法
氧化还原性	U/Th	<0.75 指示富氧化条件, 0.75~1.25 指示贫氧条件, >1.25 指示缺氧还原条件 ^[36]
	V/Cr	<2 指示富氧化, 2~4.25 指示贫氧条件, >4.25 指示还原条件 ^[36-37]
	V/(V+Ni)	<0.46 指示氧化条件, 0.46~0.6 指示贫氧条件, 0.6~0.84 指示缺氧还原条件, >0.84 指示静海闭塞还原条件 ^[36-37]
	Ni/Co	<5 指示氧化条件, 5~7 指示贫氧条件, >7 指示还原条件 ^[36]
海平面	Ce 异常	氧化条件下, 沉积物中 Ce 表现为正异常 (>1); 还原条件下, 表现为负异常 ^[38]
滞留程度	Mo/TOC	水体滞留程度高时, Mo/TOC 比值减小, 滞留程度低时, 比值增大 ^[39]
古生产力	Ba _{bio}	生物成因的 Ba 含量与古生产力成正比 ^[40]
	Cu	Cu 含量与古生产力成正比 ^[41]
古气候	Sr/Cu	当 Sr/Cu 比值较低, 在 1.0 到 5.0 之间时, 则指示此时气候为温湿气候, 当 Sr/Cu 比值较高大于 5.0 时, 指示此时古气候为干热气候 ^[42-43]
古盐度	Sr/Ba	> 1.00 指示海相咸水沉积环境, 0.50~1.00 指示海陆过渡相半咸水环境, < 0.50 指示陆相淡水环境 ^[44]

3.2 沉积环境判识

3.2.1 氧化—还原性

氧化还原条件是影响细粒沉积的重要因素，虽然 V、Ni、U、Th 等元素已经被广泛的运用于沉积水体氧化还原性的恢复，但是单个元素含量与沉积水体的氧化还原性之间的对应关系存在不确定性，因此本文选取 U/Th、V/Cr、V/(V+Ni)、Ni/Co 作为水体氧化还原性的有效判识指标。

(1) U/Th 比值法

U 元素在水体氧化还原性的判识中最为常见，水体处于强还原状态时 U 元素比较富集，以 U^{4+} 化合物从海水析出并沉淀下来，而当水体中氧含量丰富，U 元素很容易迁移，以 U^{6+} 例子游离于水体，利用此种性质可判识水体的氧化还原条件。Th 元素是一种化学性质不活泼的惰性元素，通常不受氧化还原条件的影响，利用 U/Th 比值的可以判识沉积水体的氧化还原性^[45-46]。研究区 U/Th 比值变化幅度较大，在 0.278~2.823 范围内（图 5），在五峰组

下部 U/Th 比值在 0.75~1.25 之间，表明沉积水体贫氧，到中部变为缺氧的还原环境，到顶部 U/Th 比值小于 0.75，表明迅速演变成氧化环境；在龙马溪组下部，U/Th 比值大于 1.25，沉积水体属于缺氧还原环境，中上部逐渐变为富氧环境。

(2) V/Cr 及 V/(V+Ni) 比值法

V/Cr 的比值也可用于判识氧化还原条件的判识，因为当水体处于氧化状态时，V 元素通常以 V^{5+} 的形式存在于钒酸盐 (HVO_4^{2-} 、 $H_2VO_4^-$) 中，且常常被铁和锰的氢氧化物吸附而发生迁移，当水体处于还原状态时， V^{5+} 会被还原为 V^{4+} 的 VO^{2+} 离子形成不溶的氢氧化物，易被有机质颗粒吸附而沉淀下来，在硫化环境中， V^{4+} 可被进一步还原成 V^{3+} ，形成固态氧化物 V_2O_3 或氢氧化物 $V(OH)_3$ 沉淀^[47-48]。当水体处于氧化状态时，Cr 元素以+6 价的可溶铬酸盐阴离子 CrO_4^{2-} 的形式存在，当水体处于还原状态时，Cr 元素则以+3 价的不溶铬氢氧化物 $Cr(OH)_3$ 的形式存在^[46-47]。研究区 V/Cr 比值在 1.458~5.539 之间（图 5），平均值为 3.269，指示其沉积水体总体为贫氧环境。在五峰组下部沉积环境从氧化迅速演化为还原环境，中部变为贫氧的沉积环境，到五峰组顶部时沉积环境变为氧化环境；在龙马溪组下部，V/Cr 比值大于 4.25，沉积环境属于还原环境，中上部沉积环境逐渐变为氧化环境。

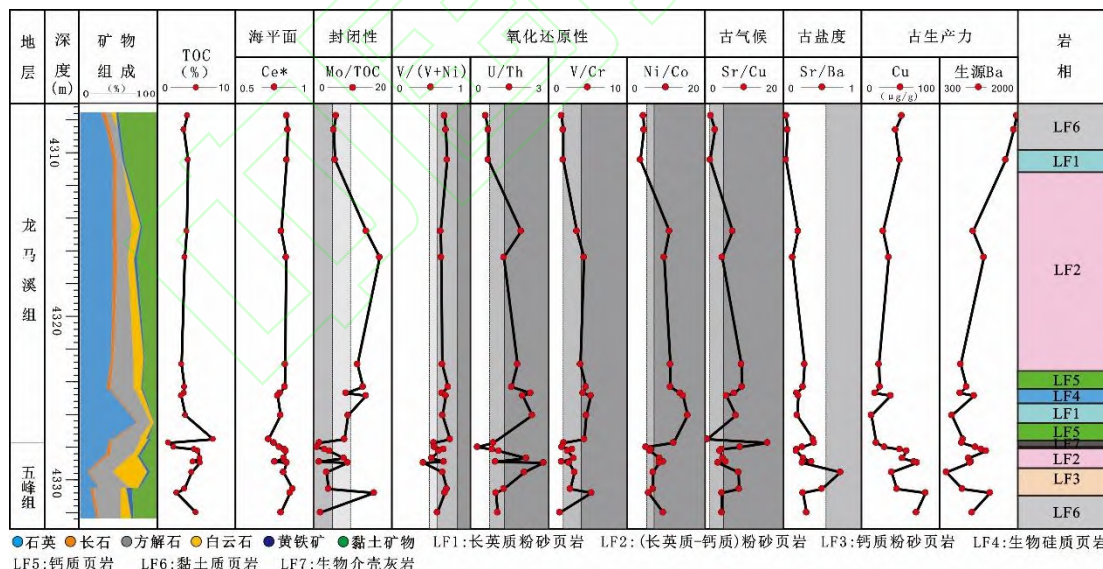


图 5 川南地区 N222 井五峰组—龙马溪组沉积环境分析

Fig.5 Sedimentary environment analysis of the Wufeng Formation-Longmaxi Formation in Well N222 in the southern Sichuan Basin

当水体处于还原状态时，沉积物中会富集 V 所形成的有机络合物，在硫化还原条件下 Ni 的富集会更早，因此可以用 V/(V+Ni) 的比值来指示沉积水体的氧化还原环境^[36-37]。研究区 V/(V+Ni) 比值在 0.403~0.743 之间（图 5），平均值为 0.634，指示沉积五峰组—

龙马溪组页岩时环境总体为厌氧亚还原环境。在五峰组下部, $V/(V+Ni)$ 比值在 0.60~0.84 之间, 沉积水体属于缺氧还原环境, 中部水体还原性减弱, 局部达到有氧条件, 可能是由于水体硫化增强导致 $V/(V+Ni)$ 比值偏低, 顶部比值处于 0.46~0.6 之间, 属于贫氧环境; 在龙马溪组下部到上部, $V/(V+Ni)$ 比值在 0.60~0.84 之间, 属于缺氧还原环境。

(3) Ni/Co 比值法

当水体处于缺氧的且 H_2S 存在的还原环境时, Ni 会形成硫化物 NiS 的形式赋存在沉积物中, Co 则以固溶体的形态存在于自生黄铁矿中, 但如果水体的氧含量比较充足时, Ni 则以 Ni^{2+} 离子和 $NiCO_3$ 等形式存在, Co 也以离子的形式存在且易溶于水^[36,45-46]。研究区 Ni/Co 比值变化较大(图 5), 在 3.581~15.634 之间, 平均比值为 8.735, 表明其沉积水体总体上属于还原环境。在五峰组下部, 沉积水体属于贫氧环境, 中部沉积水体演变为还原环境, 顶部 Ni/Co 比值降低, 属于有氧—贫氧环境; 在龙马溪组下部, Ni/Co 比值大于 7, 属于缺氧还原环境, 中上部沉积环境逐渐变为氧化环境。

3.2.2 海平面变化

当海平面发生变化时, 所沉积的地层中的 Ce 异常值也会发生相应的变化, 在氧化环境下 Ce 元素以 Ce^{+4} 价态存在, 在水体中的溶解度较小, 表现出水体的 Ce 负异常, 沉积物则表现为 Ce 正异常或无明显负异常; 在还原环境下 Ce 元素以 Ce^{+3} 价态存在, 溶解度增加, 表现出沉积物的负异常^[49]。水体中的溶解氧浓度随深度的增加而降低, 因而垂向上 Ce 异常值的变化也可指示海平面的升降变化, 前人总结出 Ce 异常值的计算公式为 $Ce^* = \lg[3CeN/(2LaN+NdN)]$ ^[38]。研究区 Ce^* 值变化范围不大, 在 0.715~0.869 之间(图 5), 平均 0.805, 小于 1, 显示为 Ce 负异常, 指示在沉积五峰组—龙马溪组页岩时水体较深。垂向上的变化表明在五峰组下部, 海平面升高, 中部缓慢降低, 随后到五峰组顶部, 海平面显著降低并达到最低点; 龙马溪组下部海平面逐渐升高, 至龙马溪组中部后海平面略微降低并趋于稳定。

3.2.3 水体滞留程度

沉积盆地的水体滞留程度通过影响水体交换流通从而对生物地球化学的循环造成制约, 因此是影响沉积环境的一个重要因素。由于四川盆地被周围的古隆起所围限, 因此盆地的水体滞留程度直接受水平面高低的影响^[29,39]。在氧化环境中, Mo 元素以钼氧离子 MoO_4^{2-} 的形式存在, 在还原环境中, Mo 则会被还原为+4 价进入沉积物。因此水体在强滞留程度

条件下，Mo/TOC 比值通常较低，因为 Mo 再补给率低于沉积物对 Mo 的吸收率，而水体在较为开放条件下，Mo/TOC 比值相对较高，因为外界海水 Mo 补给较为充足^[50-51]。从 TOC 与 Mo 的关系图可以看出研究区页岩总体形成于中等—强滞留的环境（图 6）。在五峰组下部滞留程度显著降低，水体处于中等滞留程度，中部 Mo/TOC 比值降低，属于强滞留环境，随后到五峰组顶部 Mo/TOC 比值达到最低，滞留程度最强；在龙马溪组下部，滞留程度显著降低，水体逐渐开放，中上部 Mo/TOC 比值降低，滞留程度逐渐增强（图 5）。

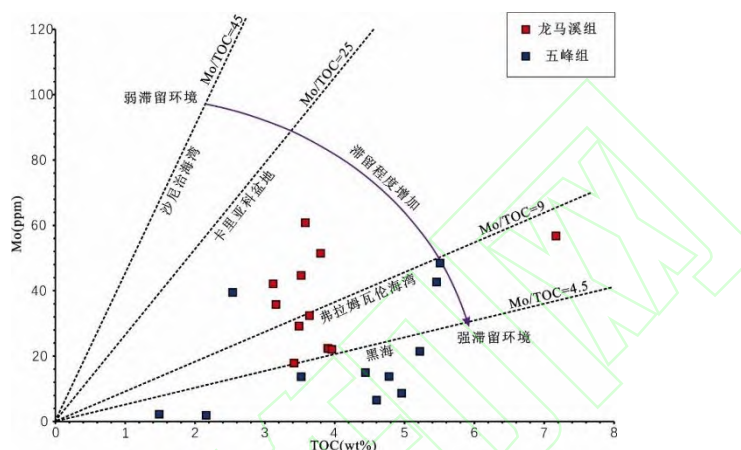


图 6 川南地区 Mo/TOC 关系与现代厌氧海盆的对比（据文献[29,52]修改）

Fig.6 Comparison of Mo-TOC (Water retention index) relationship for the southern Sichuan Basin and those for modern anoxic basins (modified from references [29,52])

3.2.4 古气候条件判识

喜干型元素 Sr 和喜湿型 Cu 的含量变化与古气候有密切关系，Sr 因此 Sr/Cu 比值的变化可以用来指示古气候的变化^[42-43]，研究区五峰组—龙马溪组页岩中的 Sr/Cu 比值变化范围较大（图 5），在 0.593~16.031 之间，平均值为 5.926。在五峰组下部属温湿气候，中部气候演变为干热气候，在五峰组顶部 Sr/Cu 比值明显降低，此时变为干冷气候，对应五峰组与龙马溪组交界处的赫南特冰期；在龙马溪组下部 Sr/Cu 比值升高，大于 5，表明此时气候较为干热，中上部 Sr/Cu 比值逐渐降低，表明气候也逐渐向温湿转变。

3.2.5 古盐度判识

一般情况下 Sr 比 Ba 更化学性质更活泼，从而更容易发生流失、迁移，在水体矿化度比较低的沉积环境中 Sr 和 Ba 都以重碳酸盐的形式赋存，Ba 在水体盐度升高时由于其溶解度较小，以碳酸钡的形式先沉淀，水体中的部分 Ba 被沉淀，导致留在水体中的 Sr 含量更高，水体盐度继续加大达到过量的程度时，Sr 也以 SrSO₄ 的形式逐渐沉淀^[44]。因此记录在沉积物中的 Sr 丰度和 Sr/Ba 比值与古盐度成正比关系，可作为古盐度的判别标志^[44,53]。研

究区五峰组—龙马溪组 Sr/Ba 比值变化不大(图 5), 在 0.039~0.736 之间, 平均值为 0.254。五峰组下部水体盐度较低, 中部 Sr/Ba 比值有部分明显增大, 达到 0.736, 表明此阶段水体古盐度较高, 五峰组顶部水体古盐度较低, 随后略微升高; 龙马溪组开始, 水体古盐度持续缓慢下降并趋于稳定。

3.2.6 古生产力判识

古生产力的高低可由页岩中的 TOC 含量直接反映, 因此可以用 TOC 含量初步表征古生产力, 研究区五峰组—龙马溪组 TOC 含量变化范围较大, 在 1.49%~7.17%之间, 平均值在 3.97%。但页岩中 TOC 含量除受到古生产力的控制, 还受水体介质条件、沉积速率等多方面因素的影响, 因此并不能准确地反映初级生产力的强弱。Cu 主要以与有机质相关的有机金属络合物的形式输送到沉积物中, 并在还原条件下保留在沉积物中, 因此, Cu 含量可用于评估古生产力^[41]。

Ba 含量变化也被广泛用于古生产力的判识, 与古生产力及有机碳含量存在正比关系^[54]。沉积物中的 Ba 主要有两种来源, 陆源输入和生物成因, 其中生物成因的 Ba 与古生产力之间有直接决定关系, 因此若想通过 Ba 的含量来判识古生产力的高低, 就必须去除陆源 Ba 的影响, 计算公式为 $Ba_{bio} = Ba_{total} - Ti_{total} \times (Ba/Ti)_{pass}$, 公式中的 Ba_{total} 为样品 Ba 总含量, Ti_{total} 表示样品 Ti 总含量, $(Ba/Ti)_{pass}$ 取自晚太古代澳大利亚平均页岩中的 Ba/Ti 质量分数比值, 为 0.007 7^[40]。研究区五峰组—龙马溪组页岩生物钡 Ba_{bio} 值变化较大, 在 $(454.993 \sim 1978.982) \times 10^{-6}$ 之间(图 5), 平均值为 $1\ 079.665 \times 10^{-6}$ 。在五峰组中部以及龙马溪组底部 Ba_{bio} 值明显偏低, 曾发生两幕生物灭绝事件^[18], 大量生物在此次事件中灭绝, 从而导致古生产力低下。

3.3 沉积环境演化

综上所述, 奥陶系五峰组到志留系龙马溪组时期古环境经历了 5 个阶段(图 7): 阶段 I: 五峰组沉积早期, 气候属于温湿气候, 海平面逐渐升高, 沉积水体属贫氧—缺氧环境, 水体的滞留程度减弱, 水体盐度略微下降, 古生产力相对升高。阶段 II: 到五峰组中部, 此时属于干热气候, 海平面逐渐下降, 水体滞留程度逐渐增强, 水体还原程度增强, 水体盐度较高, 古生产力较低。阶段 III: 随着时间推移到五峰组顶部, 冰川作用造成全球迅速降温, 盆地内变为寒冷干燥的气候, 水体变浅, 水体滞留程度较高, 属强滞留海盆, 沉积水体由还原条件变为氧化条件, 水体古盐度较高, 此时古生产力较低。阶段 IV: 到龙马溪

组早期，冰期结束气温回升，气候再次变为干热条件，发生广泛海侵，海平面长期保持在高位，水体滞留程度较弱，沉积水体是缺氧的还原环境，沉积速率较稳定，水体古盐度降低，古生产力显著升高。阶段V：到龙马溪组中上部时，古气候变为温暖湿润，海平面略微降低并趋于稳定，水体封闭程度增强，还原性逐渐减弱并最终变为富氧的氧化环境，水体古盐度逐渐降低并趋于稳定，古生产力逐渐升高。

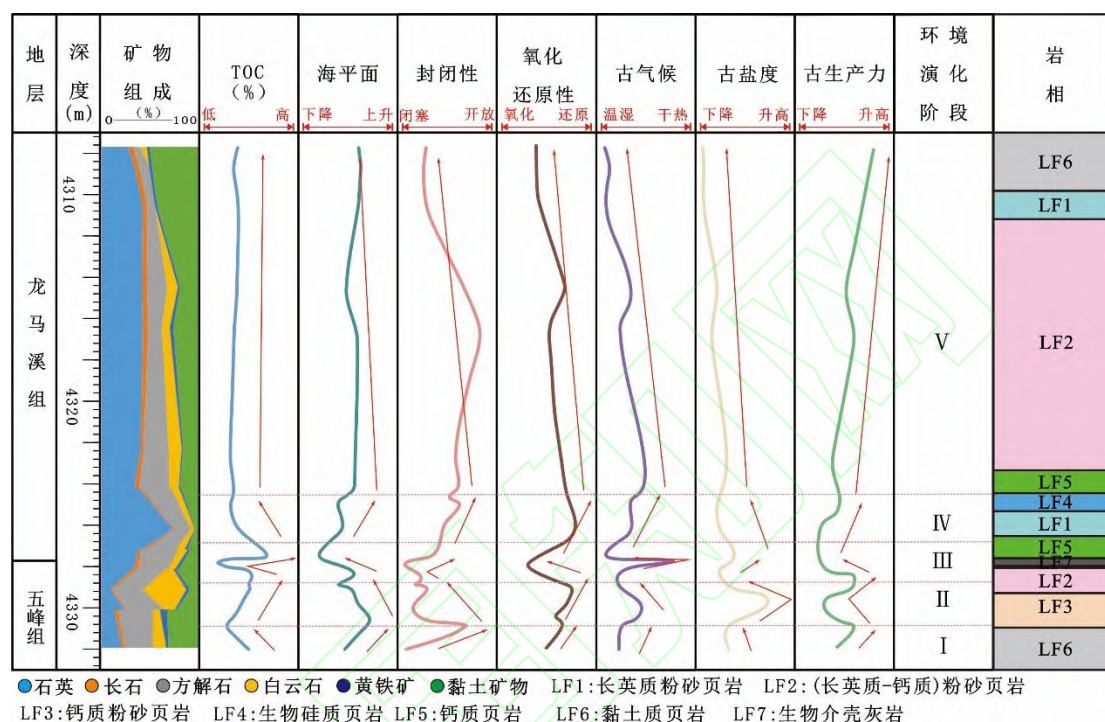


图7 川南地区五峰组—龙马溪组沉积环境演化过程

Fig.7 Sedimentary environment evolution of the Wufeng Formation-Longmaxi Formation in the southern Sichuan Basin

4 沉积作用类型及沉积模式

4.1 沉积作用类型

基于详细的岩心和薄片观察、X射线荧光扫描以及矿物X衍射全岩分析，识别了6种沉积作用类型：悬浮沉积、上升流、浊流、碎屑流、风暴流和重力滑塌。

4.1.1 悬浮沉积

悬浮沉积是五峰组—龙马溪组页岩主要的沉积过程。(长英质—钙质)粉砂页岩和黏土质页岩矿物粒度较小，粗碎屑颗粒少见，有机质、笔石含量较高且富含黄铁矿，说明其沉积时水体较深，水动力条件较弱，沉积速率较慢，一般为悬浮沉积的结果(图8a)。

4.1.2 上升流

海洋上升流是海洋循环中的一个重要过程，对气候变化和海洋生产力有很大的影响，前人认为四川盆地生物硅质页岩是上升流的结果（图 8b）^[55-56]。上升流主要发生在现代海洋的狭窄区域，沿低纬度或中纬度大陆的西海岸垂直于赤道，与海岸平行的表层风通过埃克曼运输将水从海岸带走，随后下层温度较低的、营养丰富的水被补充到表层，从而促进表层海水中的放射虫、海绵等生物更加繁盛，使得原始海洋古生产力增强^[16]。在冰期，纬度温度梯度更大，结合信风能增强温盐环流的强度，产生更强烈的上升流。在间冰期，两极和赤道温差相对较小，海洋环流较为缓慢，从而上升流强度较弱^[57-58]。

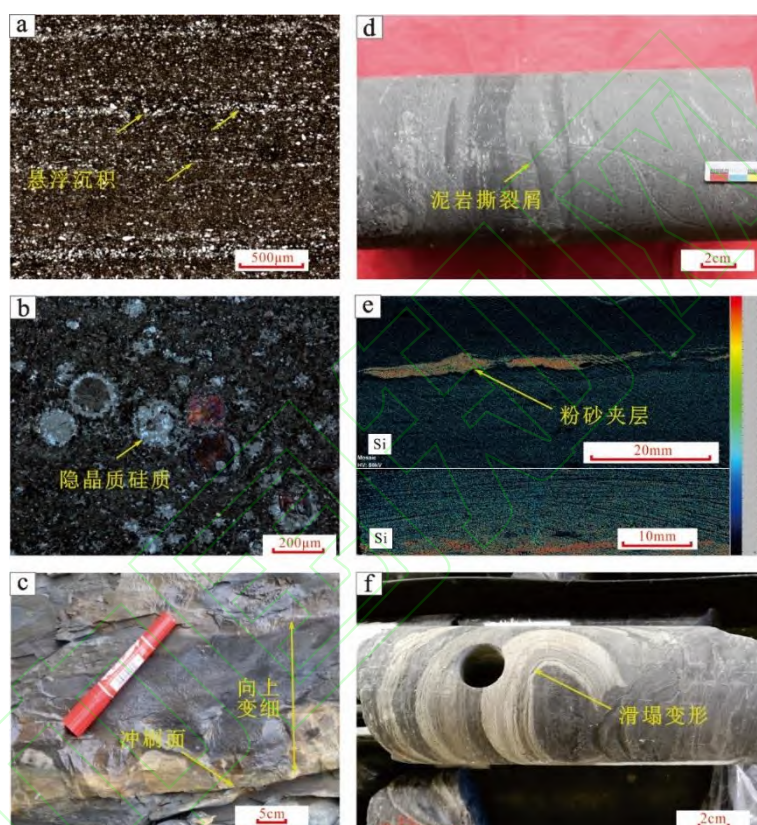


图 8 不同沉积作用形成的沉积构造特征

(a) 悬浮沉积的（长英质—钙质）粉砂页岩，纹层发育，W214 井，3 566.89 m，龙马溪组；(b) 上升流沉积的生物硅质页岩，生物被隐晶质硅质充填，L205 井，4 038.31 m，五峰组；(c) 浊流沉积，见下部冲刷面及向上粒度变细^[20]；(d) 碎屑流，漂浮的泥岩撕裂屑，N227 井，3 556.70 m，龙马溪组；(e) XRF 扫描，风暴沉积的生物扰动粉砂夹层，W213 井，3 748.82 m，五峰组；(f) 滑塌变形构造，岩层滑动扭曲，L205 井，3 801.50 m，龙马溪组

Fig.8 Sedimentary tectonic features formed by different sedimentary processes

4.1.3 浊流

在龙马溪组中上部的页岩中可见有浊流沉积，在黑色页岩中可见粉砂岩夹层，往往与页岩有明显的突变接触，具槽模构造和正粒序结构（图 8c）。底部发育的波状层理和水平层理，到顶部发育的块状层理，这一沉积序列符合鲍玛序列的 C、D、E 段。顶部的块状层理段有低 TOC 含量的特点，且镜下矿物颗粒无定向排列，明显与悬浮沉积长轴矿物定向排

列的特点不同，因此这些具块状层理的黏土质页岩可能为浊流沉积而成，且是在较短的时间内沉积。浊流沉积时会将上部的富氧水体携带到海底，从而导致局部氧含量短暂提升，大量有机质被氧化，这是浊流沉积 TOC 含量偏低的主要原因之一^[20]。此外，尽管较快的沉积速率缩短了有机质降解的时间，但有机质的原始供应和保存条件较差，导致最终 TOC 含量较低^[59]。

4.1.4 碎屑流

威远地区下部和长宁地区中上部发育碎屑流沉积，厚度 10~50 cm，结构和成分混杂，杂基含量较高，岩相之间呈突变接触，无分选，不具正粒序结构，可见高角度的侵蚀面及悬浮的泥岩撕裂屑（图 8d）。

4.1.5 风暴流

风暴流沉积主要发育于龙马溪组底部，但这种作用相对较弱。与下伏泥岩接触底面呈突变接触，常具底冲刷面结构^[60]，夹有疑似生物逃逸的粉砂岩（图 8e），可见丘状交错层理、平行层理以及水平层理等层理构造，指示其为风暴成因。

4.1.6 重力滑塌

在龙马溪组上部可见重力滑塌变形构造（图 8f），沉积层内发生变形，揉皱，岩性混杂，与上下层位呈突变接触。岩层颜色稍浅且 TOC 含量较低，由于水体变浅以及陆源碎屑输入使得粉砂质含量增多。一般是伴随快速沉积而产生，是水下滑坡的良好标志。

4.2 沉积模式

综合岩相及沉积作用类型、构造演化以及沉积环境演化建立了五峰组—龙马溪组页岩的沉积模式。在五峰组沉积早期，古气候属于温湿气候，海侵导致盆地内大面积的水体变深，海平面上升，此时沉积水体由贫氧变为贫氧—缺氧，水体封闭性减弱，水体盐度略微下降，古生产力升高，TOC 含量逐渐降低，主要在悬浮沉积作用下沉积黏土质页岩（图 9a）；到五峰组沉积中期时，气候干热，海平面逐渐下降，水体变浅，水体滞留程度增强，还原性增强，古盐度较高，古生产力先下降后上升，TOC 含量逐渐升高，主要在悬浮作用下沉积钙质粉砂页岩以及（长英质—钙质）粉砂页岩（图 9b）；五峰组与龙马溪组交界时期，气温经历了大范围的波动，气温快速下降，发生冰期事件，但也存在短暂干热气候的间冰期，冰期海平面急剧下降，导致盆地内水体变浅，水体古盐度上升，滞留程度较高，属强滞留海盆，沉积水体演变为氧化环境，古生产力变低，TOC 含量先下降后快速上升，主要

发育生物介壳灰岩, 也可见风暴流沉积的粉砂质层 (图 9c); 龙马溪组沉积早期, 气候迅速演变为干热气候, 冈瓦纳冰盖消融, 导致海平面显著上升, 水体相对滞留程度弱, 底部水体氧含量很低, 是有利于有机质保存的还原水体, 水体古盐度逐渐下降, 顶层水体富氧且营养丰富, 笔石、海藻、放射虫等海洋生物大规模复苏, 古生产力水平高, 主要发育由化学作用沉积的钙质页岩, 在悬浮沉积作用下发育的长英质粉砂页岩、以及上升流影响的生物硅质页岩 (图 9d); 随后龙马溪组沉积中晚期气候变为温暖湿润气候, 海平面保持稳定略微下降, 水体还原性减弱, 受构造运动的影响, 水体封闭性增强, 水体古盐度逐渐下降, 古生产力逐渐升高, 此时沉积速率较快, 且陆源供给的碎屑物质逐渐变多, 不利于有机质的保存, TOC 含量相对较低, 此时沉积作用较为丰富, 主要由化学作用沉积的钙质页岩以及悬浮沉积的作用下发育 (长英质—钙质) 粉砂页岩、长英质粉砂页岩和黏土质页岩, 可见有浊流沉积的粉砂岩夹层、碎屑流产生的泥岩撕裂屑以及重力滑塌作用导致的滑塌变形构造 (图 9e)。不同地区垂向上岩相序列的发育也不相同, 威远和泸州地区五峰组长英质矿物含量较高, 长宁地区则碳酸盐矿物含量较高, 且威远和长宁脆性矿物含量更高, 有利于压裂。长宁地区的黑色页岩形成环境缺氧程度强于威远地区^[61]。总体上泸州和长宁地区页岩有机质丰度较高, 威远部分井位五峰组的有机质丰度较低^[61-62]。所识别的六种沉积作用在威远、泸州以及长宁地区均存在, 只是发育程度以及发育位置有所差异。

由于构造活动、氧化还原条件、古生产力条件、气候变化以及沉积作用等因素都会对页岩的有机质富集产生一定影响, 因此恢复五峰组—龙马溪组沉积期的古环境并且建立沉积模式对于明确有机质的富集机理显得尤为重要。前人对于有机质的富集模式提出了“生产力模式”和“保存条件模式”, 前者强调高生产力水平下, 有机质的埋藏速率增加促进有机质的积累; 后者则认为受限盆地中的缺氧水体更利于有机质的保存。而实际情况更加复杂, 往往是两种模式共同作用的结果^[63-64]。在五峰组下部, 虽然古生产力逐渐升高, 但 TOC 含量却逐渐下降, 其原因可能是海平面上升, 逐渐开放的水体不利于有机质的保存。在五峰组中部, 古生产力逐渐升高, TOC 含量也随之升高, 此时的还原性逐渐增强, 水体封闭性较强, 有机质的含量主要受“保存条件模式”主导, 大部分有机质得以保留。进入赫南特冰期, 冰川形成导致全球海平面下降, 尽管底栖生物繁盛, 但水体变为不利于有机质保存的氧化环境, 导致 TOC 含量较低。龙马溪组沉积期, 开始时仍受冰川作用控制, 海平面处于最低点, 此时虽古生产力较低, 但还原的水体环境以及较强的封闭性对于有机质来说

是良好的保存条件，导致 TOC 含量较高。随后气候变暖导致冰川消融，海平面升高，溶解的冷水向赤道对流形成的上升流带来丰富的营养物质，生产力逐步升高，但陆源碎屑的增加以及逐渐开放的水体环境破坏了有机质的保存，导致 TOC 含量降低。综上所述，五峰组—龙马溪组页岩有机质的富集受构造条件、海平面升降、氧化还原条件、古生产力条件、气候变化以及沉积作用等因素共同控制^[65-66]。

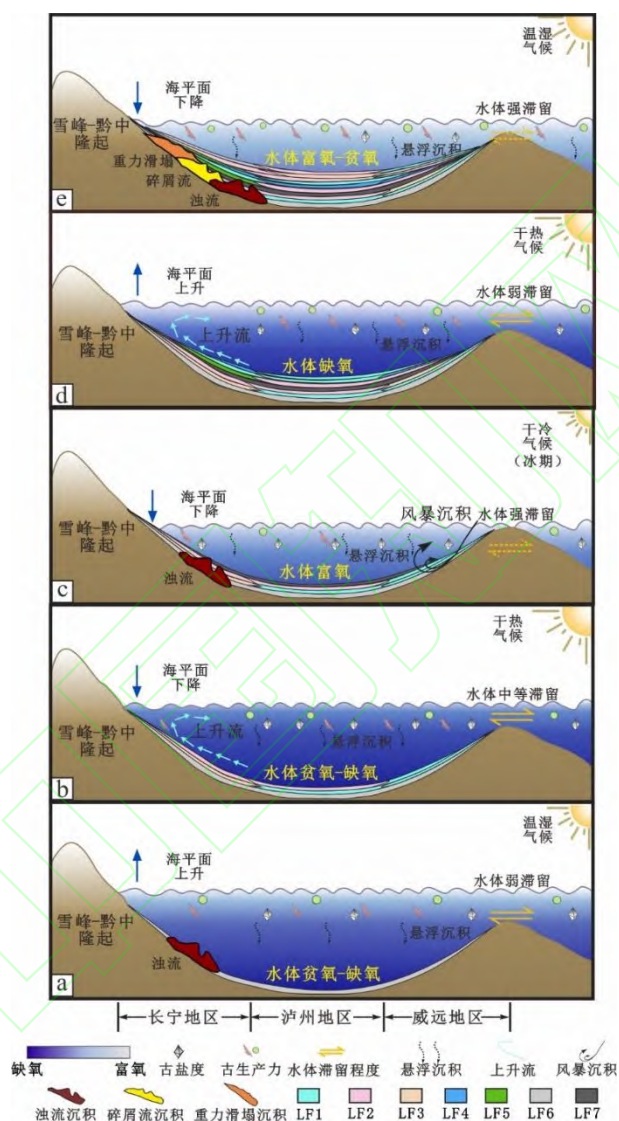


图 9 Shale sedimentary model of the Wufeng Formation-Longmaxi Formation in the southern Sichuan Basin

除有机质丰度外，影响储层性质的还有储层脆性、孔隙类型、孔隙度、渗透率以及含气性等因素。一般认为，页岩脆性越好，造缝能力越强，改造效果越理想。石英、长石、方解石以及白云石含量越高，储层的脆性越好^[62,67]。N222 井页岩脆性均较好，平均脆性矿

物含量为 72.59%。不同岩相的脆性矿物含量不同,其中生物硅质页岩以及钙质页岩脆性矿物含量最高。王超等^[19]对五峰组—龙马溪组主要页岩岩相储层特征分析发现,硅质类页岩有机质孔隙非常发育,连通性好,孔隙度平均为 3.77%,渗透率平均为 $1.57 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,含气量较高,平均为 $1.61 \text{ m}^3/\text{t}$ (图 10);混合类页岩普遍发育有机质孔隙、黏土矿物晶间孔以及碎屑颗粒原生粒间孔,孔隙度平均为 3.39%,渗透率平均为 $2.16 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,含气量相对较低,平均为 $1.16 \text{ m}^3/\text{t}$ (图 10);黏土类页岩孔隙结构以黏土矿物粒间孔为主,孔隙度较低,平均为 3.05%,渗透率平均为 $2.31 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。含气量最低,仅为 $0.66 \text{ m}^3/\text{t}$ (图 10)。黏土类页岩、混合类页岩以及硅质类页岩不同岩相的储层品质差异较大,而岩相又受到沉积作用以及沉积环境的控制。综合考虑,在水动力条件较弱、封闭性较强且缺氧还原的水体中悬浮沉积,以及受上升流带来的大量营养物质影响所沉积的(长英质—钙质)粉砂页岩、长英质粉砂页岩以及生物硅质页岩由于有机质丰度较高,脆性矿物含量较高,孔隙度、渗透率以及含气性也较高,因此可以作为良好的储层。

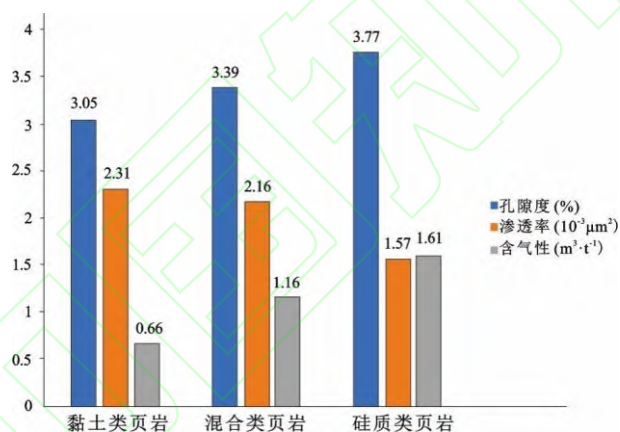


图 10 四川盆地五峰组—龙马溪组主要页岩岩相储层特征(据文献[19]修改)

Fig.10 Characteristics of main shale lithofacies reservoirs in the Wufeng Formation-Longmaxi Formation, Sichuan Basin (modified from references [19])

5 结论

(1) 根据五峰组—龙马溪组页岩矿物组成及含量、沉积构造特征,识别出 6 种页岩岩相类型(生物硅质页岩、黏土质页岩、(长英质—钙质)粉砂页岩、钙质粉砂页岩、钙质页岩及长英质粉砂页岩),并详细刻画了不同岩相宏微观岩石学特征。

(2) 沉积五峰组—龙马溪组期间,沉积环境频繁变化,自下而上经历 5 个阶段。古气候经历了从五峰组底部温湿到中部干热再到顶部干冷,随后从龙马溪组下部的干热到中上部的温湿的演变。在五峰组下部以及龙马溪组下部经历了两次大规模的海侵使得海平面升

高，海平面较高时，水体封闭性弱，还原性强，盐度较低，古生产力较高；在五峰组顶部发生冰川事件导致海平面下降，海平面较低时，水体封闭性强，还原性弱，盐度较高，古生产力较低。

(3) 川南地区识别出 6 种沉积作用类型，即悬浮沉积、上升流、浊流、碎屑流、风暴流和重力滑塌。五峰组—龙马溪组页岩主要是在低能条件下悬浮沉积，在五峰组中部及龙马溪组下部受上升流影响，古生产力升高，发育生物硅质页岩；在五峰组顶部由于水体变浅，发育少量风暴流沉积；在龙马溪组上部由于水体变浅以及陆源输入的增加，发育重力滑塌、碎屑流以及浊流。

参考文献 (References)

- [1] 姜在兴, 梁超, 吴靖, 等. 含油气细粒沉积岩研究的几个问题[J]. 石油学报, 2013, 34(6): 1031-1039. [Jiang Zaixing, Liang Chao, Wu Jing, et al. Several issues in sedimentological studies on hydrocarbon-bearing fine-grained sedimentary rocks[J]. Acta Petrolei Sinica, 2013, 34(6): 1031-1039.]
- [2] 金之钧, 胡宗全, 高波, 等. 川东南地区五峰组—龙马溪组页岩气富集与高产控制因素[J]. 地学前缘, 2016, 23(1): 1-10. [Jin Zhijun, Hu Zongquan, Gao Bo, et al. Controlling factors on the enrichment and high productivity of shale gas in the Wufeng-Longmaxi Formations, southeastern Sichuan Basin[J]. Earth Science Frontiers, 2016, 23(1): 1-10.]
- [3] 邹才能, 杨智, 朱如凯, 等. 中国非常规油气勘探开发与理论技术进展[J]. 地质学报, 2015, 89(6): 979-1007. [Zou Caineng, Yang Zhi, Zhu Rukai, et al. Progress in China's unconventional oil & gas exploration and development and theoretical technologies[J]. Acta Geologica Sinica, 2015, 89(6): 979-1007.]
- [4] Potter P E, Maynard J B, Depetris P J. Mud and mudstones: Introduction and overview[M]. Berlin, Germany: Springer, 2005: 297.
- [5] 胡宗全, 杜伟, 彭勇民, 等. 页岩微观孔隙特征及源—储关系: 以川东南地区五峰组—龙马溪组为例[J]. 石油与天然气地质, 2015, 36(6): 1001-1008. [Hu Zongquan, Du Wei, Peng Yongmin, et al. Microscopic pore characteristics and the source-reservoir relationship of shale: A case study from the Wufeng and Longmaxi Formations in Southeast Sichuan Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2015, 36(6): 1001-1008.]
- [6] Schieber J, Southard J B. Bedload transport of mud by floccule ripples—Direct observation of ripple migration processes and their implications[J]. Geology, 2009, 37(6): 483-486.
- [7] Jiang Z X, Duan H J, Liang C, et al. Classification of hydrocarbon-bearing fine-grained sedimentary rocks[J]. Journal of Earth Science, 2017, 28(6): 693-976.
- [8] 王志峰, 张元福, 梁雪莉, 等. 四川盆地五峰组—龙马溪组不同水动力成因页岩岩相特征[J]. 石油学报, 2014, 35(4): 623-632. [Wang Zhifeng, Zhang Yuanfu, Liang Xueli, et al. Characteristics of shale lithofacies formed under different hydrodynamic conditions in the Wufeng-Longmaxi Formation, Sichuan Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2014, 35(4): 623-632.]
- [9] Liang C, Jiang Z X, Zhang C M, et al. The shale characteristics and shale gas exploration prospects of the Lower Silurian Longmaxi shale, Sichuan Basin, South China[J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2014, 21: 636-648.
- [10] Zou C N, Dong D Z, Wang Y M, et al. Shale gas in China: Characteristics, challenges and prospects (I)[J]. Petroleum Exploration and Development, 2015, 42(6): 753-767.
- [11] 聂海宽, 汪虎, 何治亮, 等. 常压页岩气形成机制、分布规律及勘探前景: 以四川盆地及其周缘五峰组—龙马溪组为例[J]. 石油学报, 2019, 40(2): 131-143, 164. [Nie Haikuan, Wang Hu, He Zhiliang, et al. Formation mechanism, distribution and exploration prospect of normal pressure shale gas reservoir: A case study of Wufeng Formation-Longmaxi Formation in Sichuan Basin and its periphery[J]. Acta Petrolei Sinica, 2019, 40(2): 131-143, 164.]

- [12] 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(增刊 1): 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(Suppl.1): 107-114.]
- [13] 张金川, 聂海宽, 徐波, 等. 四川盆地页岩气成藏地质条件[J]. 天然气工业, 2008, 28(2): 151-156. [Zhang Jinchuan, Nie Haikuan, Xu Bo, et al. Geological condition of shale gas accumulation in Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 2008, 28(2): 151-156.]
- [14] Finnegan S, Bergmann K, Eiler J M, et al. The magnitude and duration of Late Ordovician-early Silurian glaciation[J]. Science, 2011, 331(6019): 903-906.
- [15] Jablonski D. Extinctions: A paleontological perspective[J]. Science, 1991, 253(5021): 754-757.
- [16] Yang S C, Hu W X, Wang X L. Mechanism and implications of upwelling from the Late Ordovician to early Silurian in the Yangtze region, South China[J]. Chemical Geology, 2021, 565: 120074.
- [17] Yang S C, Hu W X, Wang X L, et al. Duration, evolution, and implications of volcanic activity across the Ordovician-Silurian transition in the Lower Yangtze region, South China[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2019, 518: 13-25.
- [18] Li N, Li C, Algeo T J, et al. Redox changes in the outer Yangtze Sea (South China) through the Hirnantian Glaciation and their implications for the end-Ordovician biocrisis[J]. Earth-Science Reviews, 2021, 212: 103443.
- [19] 王超, 张柏桥, 舒志国, 等. 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, 2018, 39(3): 485-497. [Wang Chao, Zhang Boqiao, Shu Zhiguo, et al. Lithofacies types and reservoir characteristics of marine shales of the Wufeng Formation-Longmaxi Formation in Fuling area, the Sichuan Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2018, 39(3): 485-497.]
- [20] Liang C, Jiang Z X, Cao Y C, et al. Deep-water depositional mechanisms and significance for unconventional hydrocarbon exploration: A case study from the Lower Silurian Longmaxi shale in the southeastern Sichuan Basin[J]. AAPG Bulletin, 2016, 100(5): 773-794.
- [21] 梁超, 姜在兴, 杨懿婷, 等. 四川盆地五峰组—龙马溪组页岩岩相及储集空间特征[J]. 石油勘探与开发, 2012, 39(6): 691-698. [Liang Chao, Jiang Zaixing, Yang Yiting, et al. Characteristics of shale lithofacies and reservoir space of the Wufeng-Longmaxi Formation, Sichuan Basin[J]. Petroleum Exploration and Development, 2012, 39(6): 691-698.]
- [22] Wu L Y, Lu Y C, Jiang S, et al. Relationship between the origin of organic-rich shale and geological events of the Upper Ordovician-Lower Silurian in the Upper Yangtze area[J]. Marine and Petroleum Geology, 2019, 102: 74-85.
- [23] Zhao J H, Jin Z J, Jin Z K, et al. Applying sedimentary geochemical proxies for paleoenvironment interpretation of organic-rich shale deposition in the Sichuan Basin, China[J]. International Journal of Coal Geology, 2016, 163: 52-71.
- [24] Zhou L, Algeo T J, Shen J, et al. Changes in marine productivity and redox conditions during the Late Ordovician Hirnantian glaciation[J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2015, 420: 223-234.
- [25] 刘树根, 马文辛, Jansa L, 等. 四川盆地东部地区下志留统龙马溪组页岩储层特征[J]. 岩石学报, 2011, 27(8): 2239-2252. [Liu Shugen, Ma Wenxin, Jansa L, et al. Characteristics of the shale gas reservoir rocks in the Lower Silurian Longmaxi Formation, East Sichuan Basin, China[J]. Acta Petrologica Sinica, 2011, 27(8): 2239-2252.]
- [26] 朱志军, 陈洪德, 林良彪, 等. 黔北—川东南志留系层序格架下的沉积体系演化特征及有利区带预测[J]. 沉积学报, 2010, 28(2): 243-253. [Zhu Zhijun, Chen Hongde, Lin Liangbiao, et al. Depositional system evolution characteristics in the framework of sequences of Silurian and prediction of favorable zones in the northern Guizhou-southeastern Sichuan[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2010, 28(2): 243-253.]
- [27] 何龙. 四川盆地东南缘五峰组—龙马溪组页岩有机质富集机制及沉积环境演化[D]. 广州: 中国科学院大学(中国科学院广州地球化学研究所), 2020: 1-105. [He Long. Organic matter enrichment and evolution of sedimentary environment of the wufeng-longmaxi shale in southeastern margins of the Sichuan Basin[D]. Guangzhou: University of Chinese Academy of Sciences (Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences), 2020: 1-105.]
- [28] Wang Y, Liu L F, Zheng S S, et al. Full-scale pore structure and its controlling factors of the Wufeng-Longmaxi shale, southern

- Sichuan Basin, China: Implications for pore evolution of highly overmature marine shale[J]. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2019, 67: 134-146.
- [29] Lu Y B, Hao F, Lu Y C, et al. Lithofacies and depositional mechanisms of the Ordovician-Silurian Wufeng-Longmaxi organic-rich shales in the Upper Yangtze area, southern China[J]. *AAPG Bulletin*, 2020, 104(1): 97-129.
- [30] 吴蓝宇, 胡东风, 陆永潮, 等. 四川盆地涪陵气田五峰组—龙马溪组页岩优势岩相[J]. *石油勘探与开发*, 2016, 43 (2): 189-197. [Wu Lanyu, Hu Dongfeng, Lu Yongchao, et al. Advantageous shale lithofacies of Wufeng Formation-Longmaxi Formation in Fuling gas field of Sichuan Basin, SW China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2016, 43(2): 189-197.]
- [31] 陆扬博. 上扬子五峰组和龙马溪组富有机质页岩岩相定量表征及沉积过程恢复[D]. 武汉: 中国地质大学, 2020: 1-173. [Lu Yangbo. Quantitative characterization of lithofacies and reconstruction of the sedimentary process for Upper Yangtze Wufeng and Longmaxi organic rich shales[D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2020: 1-173.]
- [32] 王玉满, 王淑芳, 董大忠, 等. 川南下志留统龙马溪组页岩岩相表征[J]. *地学前缘*, 2016, 23 (1): 119-133. [Wang Yuman, Wang Shufang, Dong Dazhong, et al. Lithofacies characterization of Longmaxi Formation of the Lower Silurian, southern Sichuan[J]. *Earth Science Frontiers*, 2016, 23(1): 119-133.]
- [33] Xu H, Zhou W, Hu Q H, et al. Quartz types, silica sources and their implications for porosity evolution and rock mechanics in the Paleozoic Longmaxi Formation shale, Sichuan Basin[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2021, 128: 105036.
- [34] Yang X R, Yan D T, Wei X S, et al. Different Formation mechanism of quartz in siliceous and argillaceous shales: A case study of Longmaxi Formation in South China[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2018, 94: 80-94.
- [35] Schieber J, Southard J B, Schimmelmann A. Lenticular shale fabrics resulting from intermittent erosion of water-rich muds—interpreting the rock record in the light of recent flume experiments[J]. *Journal of Sedimentary Research*, 2010, 80(1): 119-128.
- [36] Zhang L C, Xiao D S, Lu S F, et al. Effect of sedimentary environment on the Formation of organic-rich marine shale: Insights from major/trace elements and shale composition[J]. *International Journal of Coal Geology*, 2019, 204: 34-50.
- [37] Yan D T, Chen D Z, Wang Q C, et al. Geochemical changes across the Ordovician-Silurian transition on the Yangtze Platform, South China[J]. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 2009, 52(1): 38-54.
- [38] 冯洪真, Erdtmann B D, 王海峰. 上扬子区早古生代全岩 Ce 异常与海平面长缓变化[J]. *中国科学(D辑): 地球科学*, 2000, 30 (1): 66-72. [Feng Hongzhen, Erdtmann B D, Wang Haifeng. Early Paleozoic whole-rock Ce anomalies and secular eustatic changes in the Upper Yangtze region[J]. *Science China (Seri. D): Earth Sciences*, 2000, 30(1): 66-72.]
- [39] Algeo T J, Lyons T W. Mo-total organic carbon covariation in modern anoxic marine environments: Implications for analysis of paleoredox and paleohydrographic conditions[J]. *Paleoceanography*, 2006, 21(1): PA1016.
- [40] 邱振, 王清晨. 来宾地区中晚二叠世之交烃源岩沉积的主控因素及大地构造背景[J]. *地质科学*, 2012, 47 (4): 1085-1098. [Qiu Zhen, Wang Qingchen. Main factors controlling the deposition of the Middle-Upper Permian source rocks in Laibin area and its tectonic setting[J]. *Chinese Journal of Geology*, 2012, 47(4): 1085-1098.]
- [41] Wei C, Dong T, He Z L, et al. Major, trace-elemental and sedimentological characterization of the Upper Ordovician Wufeng-Lower Silurian Longmaxi formations, Sichuan Basin, South China: Insights into the effect of relative sea-level fluctuations on organic matter accumulation in shales[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2021, 126: 104905.
- [42] 王彤, 朱筱敏, 董艳蕾, 等. 基于微量元素分析的古沉积背景重建: 以准噶尔盆地西北缘古近系安集海河组为例[J]. *地质学报*, 2020, 94 (12): 3830-3851. [Wang Tong, Zhu Xiaomin, Dong Yanlei, et al. Trace elements as paleo sedimentary environment indicators: A case study of the Paleogene Anjihaihe Formation in the northwestern Junggar Basin[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2020, 94(12): 3830-3851.]
- [43] Li D L, Li R X, Zhu Z W, et al. Elemental characteristics and paleoenvironment reconstruction: A case study of the Triassic lacustrine Zhangjiatan oil shale, southern Ordos Basin, China[J]. *Acta Geochimica*, 2018, 37(1): 134-150.
- [44] Zhang X G, Lin C Y, Zahid M A, et al. Paleosalinity and water body type of Eocene Pinghu Formation, Xihu Depression, East China Sea Basin[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2017, 158: 469-478.

- [45] Jones B, Manning D A C. Comparison of geochemical indices used for the interpretation of palaeoredox conditions in ancient mudstones[J]. *Chemical Geology*, 1994, 111(1/2/3/4): 111-129.
- [46] Tribouillard N, Algeo T J, Lyons T, et al. Trace metals as paleoredox and paleoproductivity proxies: An update[J]. *Chemical Geology*, 2006, 232(1/2): 12-32.
- [47] Algeo T J, Maynard J B. Trace-element behavior and redox facies in core shales of Upper Pennsylvanian Kansas-type cyclothems[J]. *Chemical Geology*, 2004, 206(3/4): 289-318.
- [48] Crusius J, Calvert S, Pedersen T, et al. Rhenium and molybdenum enrichments in sediments as indicators of oxic, suboxic and sulfidic conditions of deposition[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1996, 145(1/2/3/4): 65-78.
- [49] Wilde P, Quinby-Hunt M S, Erdtmann B D. The whole-rock cerium anomaly: A potential indicator of eustatic sea-level changes in shales of the anoxic facies[J]. *Sedimentary Geology*, 1996, 101(1/2): 43-53.
- [50] Rowe H D, Loucks R G, Ruppel S C, et al. Mississippian Barnett Formation, Fort Worth Basin, Texas: Bulk geochemical inferences and Mo-TOC constraints on the severity of hydrographic restriction[J]. *Chemical Geology*, 2008, 257(1/2): 16-25.
- [51] 王跃, 桂和荣, 苏尚国, 等. 滇黔北五峰组—龙马溪组页岩沉积环境和古气候地球化学特征[J]. *沉积学报*, 2022, 40(3): 653-666. [Wang Yue, Gui Herong, Su Shangguo, et al. Sedimentary environment and paleoclimate geochemical characteristics of shale in the wufeng and Longmaxi Formations, northern Yunan-Guizhou area[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2022, 40(3): 653-666.]
- [52] Algeo T J, Rowe H. Paleooceanographic applications of trace-metal concentration data[J]. *Chemical Geology*, 2012, 324-325: 6-18.
- [53] Liang C, Jiang Z X, Cao Y C, et al. Sedimentary characteristics and paleoenvironment of shale in the Wufeng-Longmaxi Formation, North Guizhou province, and its shale gas potential[J]. *Journal of Earth Science*, 2017, 28(6): 1020-1031.
- [54] Li Y F, Zhang T W, Ellis G S, et al. Depositional environment and organic matter accumulation of Upper Ordovician-Lower Silurian marine shale in the Upper Yangtze Platform, South China[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2017, 466: 252-264.
- [55] 刘峰, 蔡进功, 吕炳全, 等. 下扬子五峰组上升流相烃源岩沉积特征[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2011, 39(3): 440-444. [Liu Feng, Cai Jingong, Lü Bingquan, et al. Sedimentary characters of wufeng Formation upwelling facies source rock in Lower Yangtze area[J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2011, 39(3): 440-444.]
- [56] Ran B, Liu S G, Jansa L, et al. Origin of the Upper Ordovician-Lower Silurian cherts of the yangtze block, South China, and their palaeogeographic significance[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2015, 108: 1-17.
- [57] Pope M C, Steffen J B. Widespread, prolonged Late Middle to Late Ordovician upwelling in North America: A proxy record of glaciation?[J]. *Geology*, 2003, 31(1): 63-66.
- [58] 王濡岳, 胡宗全, 龙胜祥, 等. 四川盆地上奥陶统五峰组一下志留统龙马溪组页岩储层特征与演化机制[J]. *石油与天然气地质*, 2022, 43(2): 353-364. [Wang Ruyue, Hu Zongquan, Long Shengxiang, et al. Reservoir characteristics and evolution mechanisms of the Upper Ordovician Wufeng-Lower Silurian Longmaxi shale, Sichuan Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2022, 43(2): 353-364.]
- [59] Wu J, Liang C, Hu Z Q, et al. Sedimentation mechanisms and enrichment of organic matter in the Ordovician Wufeng Formation-Silurian Longmaxi Formation in the Sichuan Basin[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2019, 101: 556-565.
- [60] 郭英海, 李壮福, 李大华, 等. 四川地区早志留世岩相古地理[J]. *古地理学报*, 2004, 6(1): 20-29. [Guo Yinghai, Li Zhuangfu, Li Dahua, et al. Lithofacies palaeogeography of the Early Silurian in Sichuan area[J]. *Journal of Palaeogeography*, 2004, 6(1): 20-29.]
- [61] 叶玥豪. 四川盆地五峰—龙马溪组页岩储层形成机理[D]. 成都: 成都理工大学, 2018: 1-139. [Ye Yuehao. Formation mechanism of shale reservoir in wufeng-longmaxi Formation in Sichuan Basin[D]. Chengdu: Chengdu University Of Technology, 2018: 1-139.]
- [62] 邹晓艳, 李贤庆, 王元, 等. 川南地区五峰组—龙马溪组深层页岩储层特征和含气性[J]. *天然气地球科学*, 2022, 33(4): 654-665. [Zou Xiaoyan, Li Xianqing, Wang Yuan, et al. Reservoir characteristics and gas content of Wufeng-Longmaxi formations

- deep shale in southern Sichuan Basin[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2022, 33(4): 654-665.]
- [63] 黄梓桑, 王兴志, 杨西燕, 等. 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*, 2021, 39 (3): 631-644. [Huang Zisang, Wang Xingzhi, Yang Xiyan, et al. 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*, 2021, 39(3): 631-644.]
- [64] 王兴, 田景春, 林小兵, 等. 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/OL]. *沉积学报*. <https://doi.org/10.14027/j.issn.1000-0550.2022.069>. [Wang Xing, Tian Jingchun, Lin Xiaobing, et al. Sedimentary environment and controlling factors of organic matter accumulation in wufeng-longmaxi formations: A case study of Jielong section in eastern Chongqing[J/OL]. *Acta Sedimentologica Sinica*. <https://doi.org/10.14027/j.issn.1000-0550.2022.069>.]
- [65] 何龙, 王云鹏, 陈多福, 等. 重庆南川地区五峰组—龙马溪组黑色页岩沉积环境与有机质富集关系[J]. *天然气地球科学*, 2018, 30 (2): 203-218. [He Long, Wang Yunpeng, Chen Duofu, et al. Relationship between sedimentary environment and organic matter accumulation in the black shale of Wufeng-Longmaxi Formations in Nanchuan area, Chongqing[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2018, 30(2): 203-218.]
- [66] Yang S C, Hu W X, Yao S P, et al. Constraints on the accumulation of organic matter in Upper Ordovician-Lower Silurian black shales from the Lower Yangtze region, South China[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2020, 120: 104544.
- [67] 张晨晨, 王玉满, 董大忠, 等. 川南长宁地区五峰组—龙马溪组页岩脆性特征[J]. *天然气地球科学*, 2016, 27 (9): 1629-1639. [Zhang Chenchen, Wang Yuman, Dong Dazhong, et al. Brittleness characteristics of Wufeng-Longmaxi shale in Changning region, southern Sichuan, China[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2016, 27(9): 1629-1639.]

Shale Facies Characteristics and Sedimentation of the Wufeng Formation-Longmaxi Formation in the Southern Sichuan Basin

LIU Yudi¹, LIANG Chao^{1,2}, CAO Yingchang^{1,2}, WU Jing³, HAN Yu¹, XIE Haoran¹, LUO Ziliang¹, MA Xiaoyue¹

1. School of Geosciences, China University of Petroleum (East China), Qingdao, Shandong 266580, China

2. Key Laboratory of Deep Oil and Gas, China University of Petroleum (East China), Qingdao, Shandong 266580, China

3. College of Earth Science and Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao, Shandong 266590, China

Abstract: [Objective] The black shales of the Upper Ordovician and Lower Silurian in the southern Sichuan Basin are the main target of shale gas exploration, having attracted extensive attention among domestic and foreign scholars. To provide the theoretical basis for shale exploration and development in the future, the lithofacies division, sedimentary environment, and depositional processes of shale are explored. [Methods] Through core observation and analysis using optical and scanning electron microscopes, the lithofacies are divided based on mineral composition and content, sedimentary structural characteristics, and comprehensive consideration of biological process and diagenesis. The paleoenvironment is analyzed by oxidation-reduction (U/Th, V/Cr, V/(V+Ni), Ni/Co), sea level change (Ce*), hydrographic restriction (Mo/TOC), paleo-climate (Sr/Cu), paleo-salinity (Sr/Ba), and paleo-productivity (Cu, biogenic Ba) indices. Depositional processes are identified by

core and thin section observation, X-ray fluorescence scanning, and mineral X-ray diffraction whole rock analysis. **[Results]** Six lithofacies are identified from the shales of the Wufeng Formation-Longmaxi Formation: biological siliceous, clayey, (felsic-calcareous) silty, calcareous silty, calcareous, and felsic silty shale. The shale sedimentary environment of the Wufeng Formation-Longmaxi Formation underwent five stages of bottom-up changes. The paleo-climate shifted from warm and humid at the bottom of the Wufeng Formation to dry and hot at the middle to dry and cold at the top, and then from dry and hot at the lower part of the Longmaxi Formation to warm and humid at the middle and upper sections. In the lower parts of the Wufeng and Longmaxi formations, the sea level had risen owing to two large-scale transgressions. When the sea level is high, the extent of basin retention is weak, strong in reduction, low in salinity, and high in paleo-productivity. The glacier event at the top of Wufeng Formation caused the sea level to drop. When the sea level is low, the extent of basin retention is strong, weak in reduction, high in salinity, and low in paleo-productivity. The shale of the Wufeng Formation-Longmaxi Formation was mainly formed by suspended sedimentation under low energy conditions. Upwelling sedimentation developed in the middle Wufeng Formation and the lower Longmaxi Formation. A small amount of storm surge sedimentation developed at the top of the Wufeng Formation. In the upper Longmaxi Formation, gravity slumping, debris flows, and turbidity currents developed because of the shallowing of water and the increase of terrigenous input. Therefore, the sedimentary model of the Wufeng Formation-Longmaxi Formation shale was established by integrating the lithofacies, depositional processes type, tectonic evolution, and sedimentary environment evolution. **[Conclusion]** The frequent changes of sedimentary environment and the diversity of depositional processes control the types and characteristics of lithofacies, further leading to significant differences in organic matter content, porosity, gas content, and other reservoir quality factors of different lithofacies. Further research on shale lithofacies and reservoir quality is required to provide theoretical basis for shale gas exploration and development.

Key words: Wufeng Formation-Longmaxi Formation; lithofacies characteristics; paleo-environment; depositional processes; depositional model