

文章编号: 0253-2697(2024)08-1219-15 DOI:10.7623/syxb202408005

深层海相页岩气立体开发“甜点”岩相及其成因机制

——以四川盆地南部泸州区块龙马溪组一段一亚段为例

武瑾^{1,2} 郭为^{1,2} 郭伟^{1,2} 赵圣贤³ 苟其勇³ 曾凡成⁴
刘宇⁴ 邹晓品⁴ 王玉满^{1,2} 刘兆龙^{1,2}

(1. 中国石油勘探开发研究院 北京 100083; 2. 国家能源页岩气研发(实验)中心 北京 100083;
3. 中国石油西南油气田公司页岩气研究院 四川成都 610051;
4. 中国石油吉林油田公司川南天然气开发事业部(一体化中心) 吉林松原 138000)

摘要:页岩岩相控制着页岩的生烃潜力、储集性能以及可压裂性。基于岩心观察结果,综合利用岩石薄片鉴定、X射线衍射(XRD)矿物分析、场发射扫描电镜(FE-SEM)成像、X射线荧光光谱(XRF)元素扫描、主量/微量元素测试等技术手段,对四川盆地南部泸州区块龙马溪组一段(龙一段)一亚段上部开发层系(上层系)页岩岩相进行了系统研究。研究结果表明,龙一段一亚段上层系主要发育高 TOC 含泥硅质页岩(S1)岩相、高 TOC 硅泥混合页岩(CM1)岩相、中 TOC 含泥硅质页岩(S2)岩相、中 TOC 硅泥混合页岩(CM2)岩相、中 TOC 混合页岩(M2)岩相和低 TOC 硅泥混合页岩(CM3)岩相 6 种岩相。其中,S1 岩相和 CM1 岩相为龙一段一亚段上层系“甜点”岩相类型。S1 岩相主要发育于龙一段一亚段 4 小层底部和龙一段一亚段 6 小层下部,有机质丰度高,有机孔及微裂缝发育,脆性矿物含量高,现场测试其含气量最高,为最优岩相类型;CM1 岩相主要发育于龙一段一亚段 6 小层中一下部,有机质丰度高,黏土矿物晶间孔、有机孔及微裂缝发育,现场测试其含气量较高,为次优岩相类型。海平面升降、火山事件以及上升洋流共同控制着泸州区块龙一段一亚段上层系“甜点”岩相的形成。Ce 元素含量异常表明,海平面小幅上升造成底层水中溶解的氧浓度降低,同时火山喷发的火山灰释放大量营养元素,以及上升洋流带来的深海富营养水体,共同促使表层海水中海洋生物生产力提高,形成了一套富有机质的硅质、硅泥混合页岩,并在成岩过程中发育了大量微孔隙和微裂缝。

关键词:深层页岩气;立体开发;“甜点”岩相;储层特征;龙马溪组;四川盆地

中图分类号:TE122.2

文献标识码:A

Sweet spot lithofacies and its genesis mechanism for stereoscopic development of deep marine shale: a case study of the first submember of Member 1 of Longmaxi Formation in Luzhou area, southern Sichuan Basin

Wu Jin^{1,2} Guo Wei^{1,2} Guo Wei^{1,2} Zhao Shengxian³ Gou Qiyong³ Zeng Fancheng⁴
Liu Yu⁴ Zou Xiaopin⁴ Wang Yuman^{1,2} Liu Zhaolong^{1,2}

(1. PetroChina Research Institute of Petroleum Exploration and Development, Beijing 100083, China;

2. National Energy Shale Gas Research and Development (Experiment)Center, Beijing 100083, China;

3. Shale Gas Research Institute, PetroChina Southwest Oil & Gasfield Company, Sichuan Chengdu 610051, China;

4. Chuannan Gas Development Division, PetroChina Jilin Oilfield Company, Jilin Songyuan 138000, China)

Abstract: Lithofacies control the hydrocarbon generation potential, reservoir property and fracturability of shales. Based on core observations, comprehensively using the techniques such as rock thin sections identification, X-ray diffraction mineral analysis, field emission scanning electron microscopy (FE-SEM) imaging, X-ray fluorescence (XRF) element scanning and major element and microelement testing, the study systematically investigates the shale lithofacies of the upper layer series of development in the first submember of Member 1 of Longmaxi Formation (Long1 Member) in Luzhou area of Sichuan Basin. The results show that the study area mainly develops six lithofacies, i. e., high TOC siliceous shale (S1), high TOC siliceous clay mixed shale (CM1), medium TOC siliceous mud shale (S2), medium TOC siliceous clay mixed shale (CM2), medium TOC mixed shale (M2) and low TOC siliceous clay mixed shale (CM3). Among them, S1 and CM1 are the sweet spot lithofacies of the upper layers in the first submember of Long1 Member. S1 lithofacies is mainly developed at the bottom of the fourth layer and the lower part of the sixth layer in the first submember of Long1 Member, characterized with high organic matter, developed organic matter pores and microcracks, high content of brittle min-

基金项目:中国石油天然气集团有限公司科技专项“页岩油气富集机理与储层地质力学评价技术研究”(2024DJ87)资助。

第一作者及通信作者:武瑾,女,1988年12月生,2020年获成都理工大学博士学位,现为中国石油勘探开发研究院高级工程师,主要从事页岩气开发地质研究工作。Email:wujinouc@petrochina.com.cn

erals, and the highest gas content, which is classified as the optimal lithofacies type. CM1 lithofacies is mainly developed in the middle and lower parts of the sixth layer in the first submember of Long1 Member, characterized with high organic matter, well-developed intergranular pores of clay minerals, organic matter pores and microcracks, as well as high gas content, which is classified as the suboptimal lithofacies type. The formation of sweet spot lithofacies is jointly controlled by sea level changes, volcanism and upwelling ocean currents. Ce anomalies indicate that a slight rise in sea level causes a decrease in dissolved oxygen concentration in the bottom water. Meanwhile, volcanic ashes release a lot of nutrient elements, and the upwelling ocean currents can provide eutrophic water bodies, thus promoting the marine biological productivity in surface sea water, and forming a set of organic-rich siliceous shale and siliceous clay mixed shale. Moreover, a large number of micro pores and micro cracks were developed during the diagenesis process of the shales.

Key words: deep shale gas; stereoscopic development; sweet spot lithofacies; reservoir characteristics; Longmaxi Formation; Sichuan Basin

引用:武瑾,郭为,郭伟,赵圣贤,苟其勇,曾凡成,刘宇,邹晓品,王玉满,刘兆龙. 深层海相页岩气立体开发“甜点”岩相及成因机制——以四川盆地南部泸州区块龙马溪组一段一亚段为例[J]. 石油学报, 2024, 45(8): 1219-1233.

Cite: WU Jin, GUO Wei, GUO Wei, ZHAO Shengxian, GOU Qiyong, ZENG Fancheng, LIU Yu, ZOU Xiaopin, WANG Yuman, LIU Zhaolong. Sweet spot lithofacies and its genesis mechanism for stereoscopic development of deep marine shale: a case study of the first submember of Member 1 of Longmaxi Formation in Luzhou area, southern Sichuan Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2024, 45(8): 1219-1233.

北美地区页岩气开发实践表明,对于巨厚页岩储层,单层井网的采收率仅为10%~20%,立体开发是实现采收率大幅提高的关键技术之一^[1-4]。四川盆地南部(川南)地区上奥陶统五峰组一下志留统龙马溪组富有机质页岩厚度大、分布稳定,是中国页岩气勘探开发的主力层系^[5]。目前,川南地区五峰组—龙马溪组中—浅层(埋深小于3500 m)页岩气已实现规模效益开发,深层(埋深为3500~4500 m)页岩气正逐渐成为增储上产的主力^[6-7]。自2018年起,中国石油天然气股份有限公司(中国石油)持续攻关川南地区深层页岩气的高效开发,聚焦龙马溪组底部最优20 m厚度的页岩储层,进行一次井网开发,成功获得一批高产页岩气井,实现了中国深层页岩气开发的战略性突破^[8]。川南地区龙马溪组底界与五峰组呈整合接触,表现为水体持续变浅的进积式沉积旋回。依据沉积旋回的分界特征,龙马溪组可划分为龙马溪组二段(龙二段)、龙马溪组一段(龙一段)2个次级反旋回。其中,龙一段为持续海退的进积式反旋回,自下而上划分为龙一段一亚段、龙一段二亚段。龙一段一亚段为一套富有机质的黑色页岩,厚度为50~75 m。目前一次井网开发仅动用其下部层系20 m厚度的页岩,上部层系仍有30~50 m的厚层页岩气资源未动用,提高页岩气采收率多层立体井网精细开发势在必行。

中国页岩气立体开发仍处于起步阶段^[1]。2017年,中国石油化工股份有限公司在涪陵页岩气田率先开展12口页岩气单井先导试验,探索立体开发井网模式及调整潜力,并于2021年对试验井组进行立体开发调整,80口页岩气井龙一段一亚段上部气层试气的平均产量达 $15.89 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ^[9-10]。2018年,中国石油在川南地区泸州区块优选3口深层页岩气井,开展立体开发先导试验,在早期钻完井工艺技术不成熟、有利靶体

不明确的情况下,气井测试产量仍达 $(4.0 \sim 15.0) \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,这表明川南地区深层页岩气具备立体开发的资源潜力^[3]。

岩相是指形成于特定沉积环境的岩石或岩石组合^[11-12]。受沉积环境和成岩作用共同控制,不同页岩岩相的生烃能力、储集性能以及可压裂性差异明显,“甜点”岩相决定着页岩储层“甜点”段的分布^[13]。川南地区深层龙一段一亚段页岩厚度大,纵向储层非均质性强,立体开发调整井“甜点”靶体认识不明确,制约了深层页岩气资源的有效动用^[1-3]。岩相研究是锁定页岩气立体开发“甜点”靶体的关键。目前,围绕页岩气立体开发的研究主要集中在龙一段一亚段上部层系页岩气资源潜力评价及开发理论技术等方面^[1,3-4,9-10,14-15],对页岩岩相的分类表征与系统评价研究较少。基于川南地区深层龙一段一亚段页岩气立体开发的现状,3个科学问题有待明确:①上部层系页岩的岩石学特征,即页岩岩相类型和发育特征;②不同岩相的储集空间类型与储集物性差异;③“甜点”岩相类型及其成因机制。笔者以川南地区泸州区块龙一段一亚段为例,重点探讨了上部层系页岩的岩相类型和发育特征、“甜点”岩相类型及其成因机制,以期为深层页岩气立体开发靶体优选提供有益参考。

1 地质概况

川南地区位于中国南方上扬子台地西南缘,在大凉山以东、乐山—龙女寺古隆起志留系剥蚀线以南、华蓥山以西、黔北凹陷以北,面积约为 $4 \times 10^4 \text{ km}^2$ ^[7][图1(a)]。奥陶纪—志留纪转折期,受构造运动影响,全球海平面大幅波动^[16]。鲁丹阶早期,受加里东构造运动影响,扬子板块与华夏板块逐渐拼合,形成了川中隆起、黔中隆起和江南—雪峰隆起等隆起构造,川南地区处于被

古隆起所围限的半封闭一局限深水陆棚海域, 沉积了一套灰黑色硅质、钙质富有机质页岩。鲁丹阶中一晚期至埃隆阶晚期, 随着华夏板块对扬子地块碰撞作用

的增强, 扬子地台东南部向下挠曲的幅度逐渐加大, 沉降中心开始向 NW 向迁移, 川南地区处于半深水陆棚海域, 沉积了一套深灰色含黏土矿物粉砂质页岩^[17]。

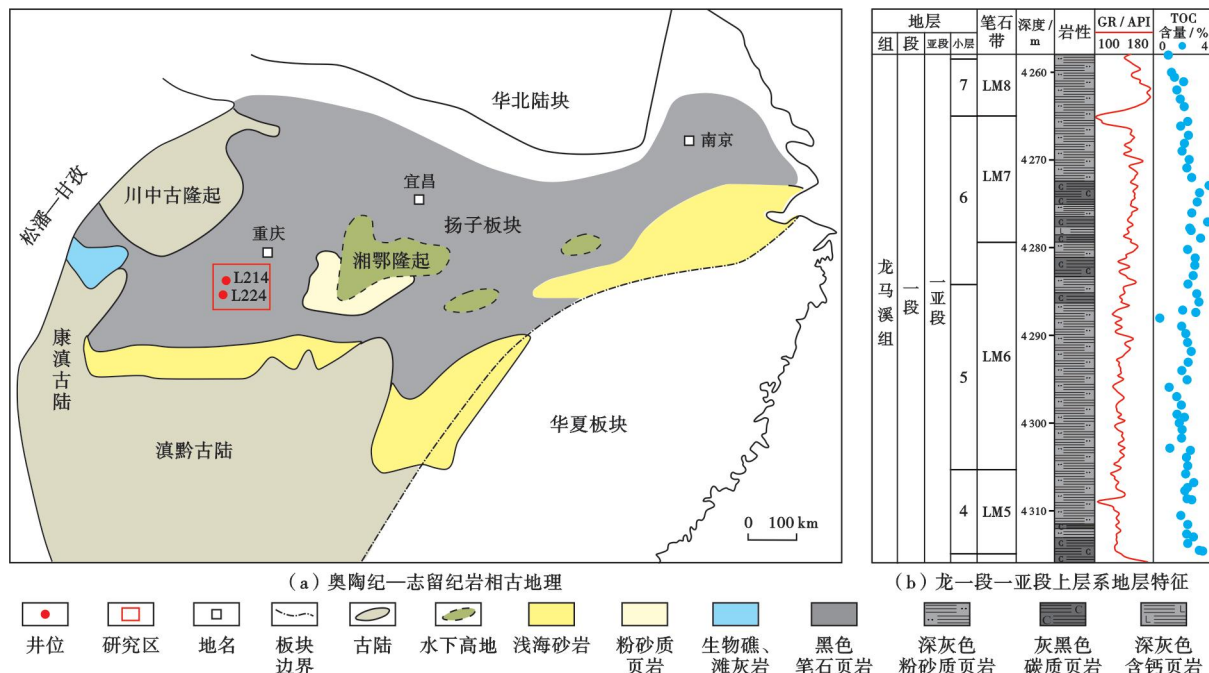


图 1 扬子板块岩相古地理与综合地层特征

Fig. 1 Lithofacies paleogeography and stratigraphic comprehensive characteristics of Yangtze plate

泸州区块是目前川南地区五峰组—龙马溪组深层页岩气勘探开发的重点领域^[6]。前人曾基于岩石矿物学和古生物特征将泸州区块龙一段—亚段划分为 4 个小层。随着对深层页岩气研究的不断深入, 进一步根据测井曲线、沉积旋回以及元素特征差异, 将龙一段—亚段自下而上精细划分为 1 小层—7 小层^[3]。依据“沉积环境相似、储层类型一致、力学品质相近”的原则, 五峰组—龙一段—亚段纵向上可划分为 2 套开发层系。下部开发层系(下层系)为五峰组—龙一段—亚段 3 小层, 对应 WF2—WF3 笔石带和 LM1—LM4 笔石带, 发育一套灰黑色硅质、钙质页岩, 厚度为 10~28 m, 是目前页岩气一次井网开发层段; 上部开发层系(上层系)为龙一段—亚段 4 小层—7 小层, 对应 LM5—LM8 笔石带, 以深灰色含黏土矿物粉砂质页岩为主, 局部发育灰黑色硅质、钙质页岩, 厚度为 40~72 m, 是页岩气立体开发的重点目标层段^[7-8][图 1(b)]。

2 实验样品及方法

2.1 实验样品

实验样品主要取自泸州区块深层页岩气评价井 L214 井和 L224 井, 少量取自 L202 井和 Y101H3-8 井。L214 井和 L224 井完钻层位均为奥陶系宝塔组, 完钻井深分别为 4367 m 和 4099 m, 上层系龙一段—亚

段 4 小层—7 小层的页岩厚度分别为 56.4 m、65.4 m, 分别连续系统取样 58 块和 66 块, 共制备了 5 类页岩样品: ①垂直岩心层理面切制长、宽和厚度分别为 60 mm、50 mm 和 0.03 mm 的页岩岩石薄片 46 片, 用于岩石薄片鉴定、X 射线荧光光谱(XRF)元素扫描; ②垂直岩心层理面切制长、宽和厚度分别为 10 mm、10 mm 和 2 mm 的块体岩样 12 块, 进行氩离子抛光及镀碳处理, 用于场发射扫描电镜(FE-SEM)观察; ③制备 100~200 目粉末样品 124 份, 用于总有机碳(TOC)含量测定; ④制备 200 目粉末样品 124 份, 用于 X 射线衍射(XRD)全岩矿物和黏土矿物分析、主量/微量元素及稀土元素测定; ⑤钻取直径和高度分别为 25 mm 和 35 mm 的柱塞样 124 块, 进行孔隙度和渗透率测试。

2.2 实验方法

TOC 含量测定、XRD 全岩矿物和黏土矿物分析在国家能源页岩气研发(实验)中心完成, 实验设备分别为美国 LECCO 公司 CS230 型碳硫仪和日本理学公司 TTR III 型全自动 X 射线衍射仪。FE-SEM 观察、XRF 元素扫描及页岩岩石薄片鉴定在中国石油天然气集团公司油气储层重点实验室完成, 实验仪器分别为 FEI 公司生产的 Quanta FEG 450 型场发射扫描电镜、德国布鲁克公司 M4 TORNADO 型微束 X 射线荧光光谱仪和 Axio Scope A1 型偏光显微镜。主量元

素、微量元素和稀土元素测试在四川省科源工程技术测试中心有限责任公司完成,实验设备分别为 AXios-mAX 型 X 射线荧光光谱仪和 PE NexION 350X 型电感耦合等离子体原子发射质谱仪。以上所有实验测试均严格按照国家行业实验规范操作完成。

3 岩石学特征及岩相划分

3.1 岩相划分原则

岩相标志选取的关键在于需要考虑其能否反映沉积环境以及能否对生产实践起到指导作用^[11]。笔者综合考虑页岩矿物组成、有机质含量和沉积构造 3 项因素,建立了川南地区龙一段一亚段上层系页岩的岩相划分方案。

3.1.1 矿物组分及含量

矿物组分作为岩相划分的第一要素,可通过 XRD 分析准确定量获取。龙一段一亚段上层系页岩的矿物组分主要为硅质矿物(石英+长石)、碳酸盐矿物(方解石+白云石)和黏土矿物。笔者依据矿物组分的三端元图解进行页岩岩相划分(图 2)。首先,以 50% 的矿物含量为边界条件,划分出硅质岩相、钙质岩相和黏土质岩相大类,若 3 类矿物含量均未超过 50%,则划分为混合岩相大类。其次,在硅质岩相大类中,当硅质矿物含量介于 50%~75% 时,若碳酸盐矿物或黏土矿物含量大于 25%,则分别定为含钙硅质页岩相或含泥硅质页岩相,若二者含量均未超过 25%,则定为混合硅质页岩相。同理,钙质岩相和黏土质岩相大类均可进一步细分。

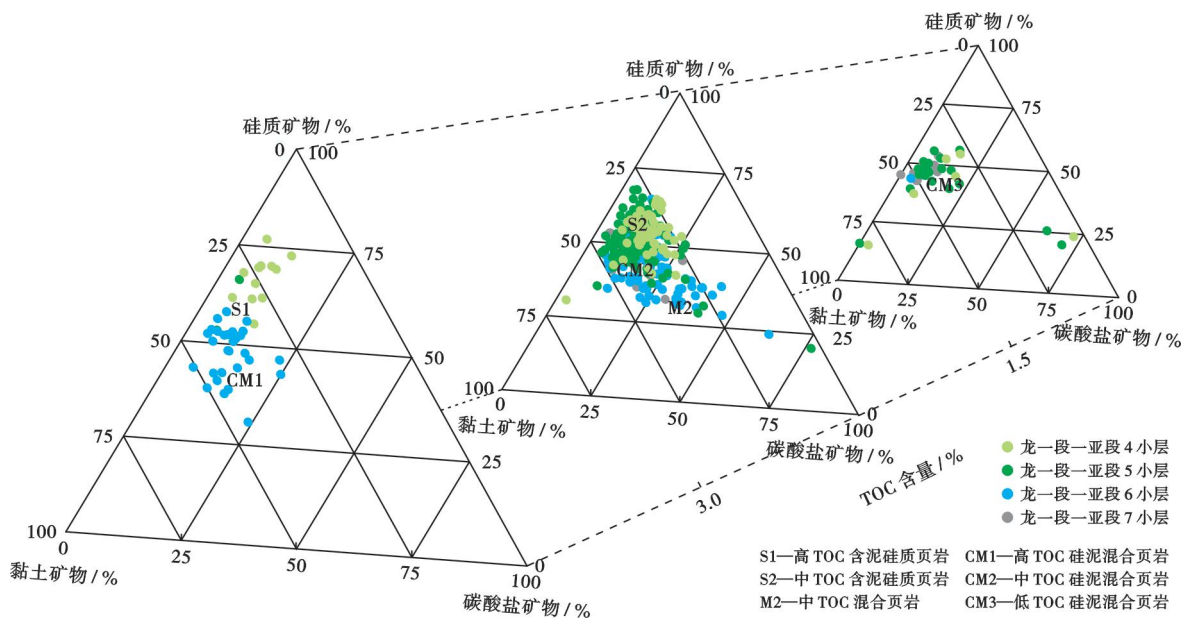


图 2 泸州区块龙一段一亚段上层系页岩的岩相划分

Fig. 2 Shale lithofacies classification of the upper layer of the first submember of Member 1 of Longmaxi Formation in Luzhou block

3.1.2 TOC 含量

含气性是评价页岩气藏是否具备开发潜力的关键指标,龙马溪组页岩气商业开采的含气量下限为 $2.0 \text{ m}^3/\text{t}$ ^[18]。泸州区块 6 口页岩气评价井测得的龙一段一亚段上层系页岩的含气量为 $1.3 \sim 4.9 \text{ m}^3/\text{t}$, 平均为 $2.5 \text{ m}^3/\text{t}$ 。TOC 含量作为岩相划分的第二要素,通常与含气量呈正相关性。当龙一段一亚段上层系页岩含气量为 $4.0 \text{ m}^3/\text{t}$ 时,对应的 TOC 含量约为 2.8%;当含气量为 $3.0 \text{ m}^3/\text{t}$ 时,对应的 TOC 含量约为 2.1%;当含气量为 $2.0 \text{ m}^3/\text{t}$ 时,对应的 TOC 含量约为 1.4%。鉴于此,笔者将 TOC 含量为 1.5% 和 3.0% 作为界线,厘定出高 TOC 页岩 (TOC 含量 $> 3.0\%$)、中 TOC 页岩 ($1.5\% < \text{TOC 含量} < 3.0\%$) 和低 TOC 页岩 (TOC 含量 $< 1.5\%$) 3 种类型(图 2)。

3.1.3 沉积构造

纹层是页岩层系独具特色的组构特征,纹层状结构构造的差异性是引起页岩非均质性的重要原因^[19-20]。选取纹层结构构造作为岩相划分的第三要素。根据纹层厚度和颗粒粒径差异,将页岩纹层进一步划分为极薄纹层和薄纹层 2 类。极薄纹层厚度小于 $200 \mu\text{m}$, 粒径介于 $2 \sim 25 \mu\text{m}$, 平均粒径约为 $8 \mu\text{m}$ 。薄纹层厚度介于 $200 \sim 1200 \mu\text{m}$, 平均为 $600 \mu\text{m}$; 粒径介于 $12 \sim 38 \mu\text{m}$, 平均粒径约为 $20 \mu\text{m}$ 。

综合以上岩相划分原则,在泸州区块龙一段一亚段 4 小层—7 小层识别出 6 类岩相(表 1):①高 TOC 含泥硅质页岩相(S1)、②高 TOC 硅泥混合页岩相(CM1)、③中 TOC 含泥硅质页岩相(S2)、④中 TOC 硅泥混合页岩相(CM2)、⑤中 TOC 混合页岩相(M2)、⑥低 TOC 硅泥混合页岩相(CM3)。

3.2 岩相类型及特征

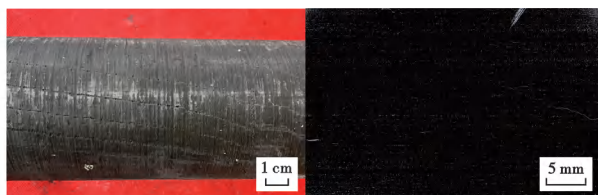
3.2.1 高 TOC 含泥硅质页岩(S1)岩相

S1 岩相为灰黑色硅质页岩[图 3(a)],单偏光下呈黑褐色,发育极薄纹层,纹层界限不清晰[图 4(a)]。显微镜下可观察到大量硅质微粒、黏土矿物-有机质团粒,少量石英粉砂和碳酸盐矿物,少量硅质放射虫和鸡骨状火山玻璃[图 4(b)、图 4(c)]。硅质微粒为无定形态,粒径一般小于 $2\ \mu\text{m}$;石英粉砂呈棱角状;

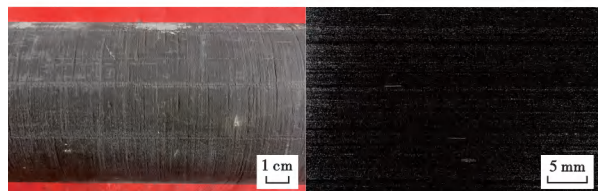
碳酸盐矿物为方解石和白云石,矿物颗粒细小,粒径为 $5\sim 10\ \mu\text{m}$ 。TOC 含量为 $3.0\%\sim 3.8\%$ (平均为 3.4%)。硅质矿物含量为 $50.0\%\sim 68.2\%$;碳酸盐矿物含量为 $4.5\%\sim 13.0\%$,其中方解石、白云石含量约各占 $1/2$;黏土矿物含量为 $26.0\%\sim 43.0\%$ (表 1)。页岩脆性指数为 $57.0\%\sim 76.0\%$ (平均为 65.0%)。该类页岩岩相主要发育在龙一段一亚段 4 小层底部和 6 小层下部。



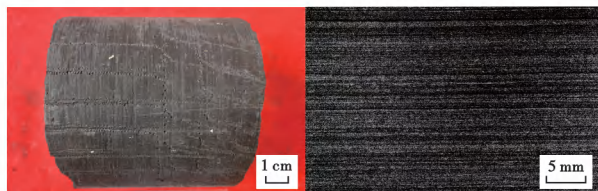
(a) 灰黑色硅质页岩,发育极薄纹层,S1岩相,L214井4287.71 m



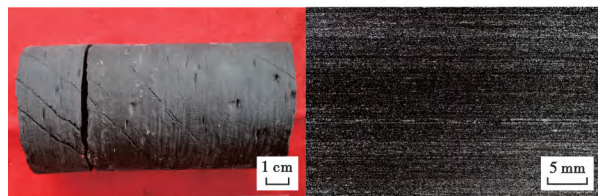
(b) 灰黑色黏土质页岩,发育极薄纹层,CM1岩相,L214井4301.60 m



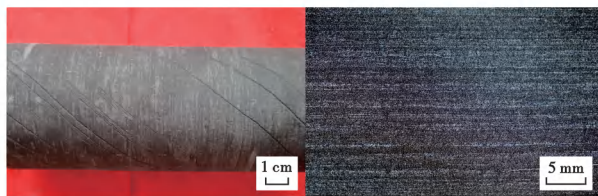
(c) 深灰色硅质页岩,发育双黏土矿物韵律纹层,S2岩相,L214井4313.30 m



(d) 深灰色黏土质页岩,发育黏土矿物纹层,CM2岩相,L214井4303.60 m



(e) 深灰色混合页岩,发育混合纹层,M2岩相,L214井4278.07 m



(f) 灰色粉砂质页岩,发育粉砂纹层,CM3岩相,L214井4260.90 m

图 3 泸州区块龙一段一亚段上层系典型岩相的岩心特征

Fig. 3 Core characteristics of typical lithofacies in the upper layer of first submember of Member 1 of Longmaxi Formation in Luzhou block

3.2.2 高 TOC 硅泥混合页岩(CM1)岩相

CM1 岩相主要为灰黑色黏土质页岩[图 3(b)],单偏光显微镜下呈深褐色,发育薄细粉砂纹层夹黏土矿物纹层[图 4(d)]。其中,粉砂纹层由单颗粒棱角状石英和碳酸盐矿物颗粒构成,粒径为 $15\sim 35\ \mu\text{m}$ [图 4(e)];黏土矿物纹层中含大量黏土矿物-有机质团粒、无定形硅质微粒;此外,可见细砂级火山玻璃,粒径为 $100\sim 150\ \mu\text{m}$ [图 4(f)]。该类岩相的 TOC 平均含量为 3.2% 。硅质矿物与黏土矿物含量相当,平均分别为 42.6% 和 41.7% ;碳酸盐矿物的平均含量为 15.7% (表 1)。页岩脆性指数为 $50.0\%\sim 69.8\%$ (平均为 58.3%)。该类岩相主要发育在龙一段一亚段 6 小层中一下部。

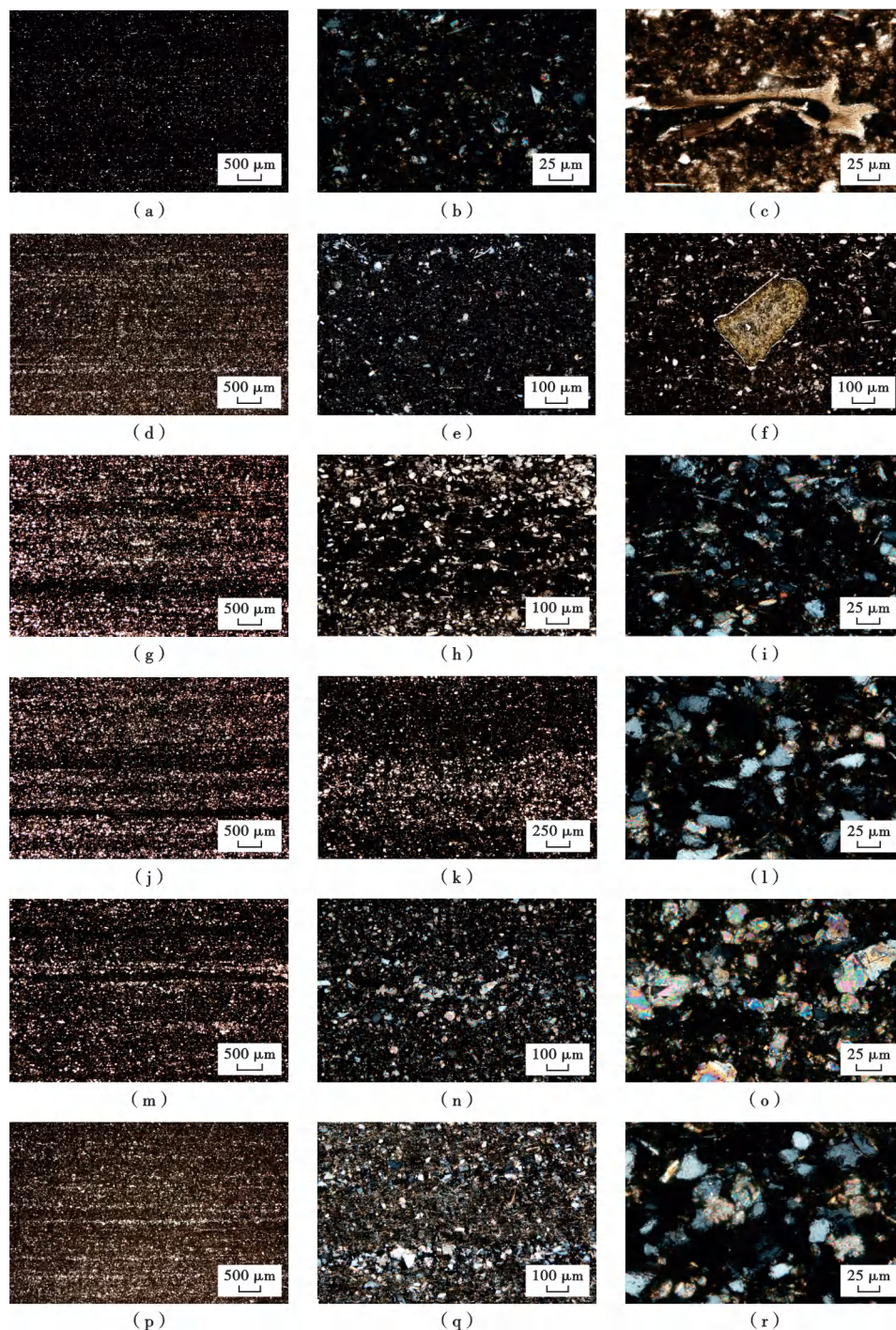
3.2.3 中 TOC 含泥硅质页岩(S2)岩相

S2 岩相为深灰色硅质页岩[图 3(c)]。岩石薄片下可见黏土矿物团粒、石英粉砂及云母含量增多。该岩相发育典型的双黏土矿物韵律纹层,其间为宽厚的

石英粉砂纹层[图 3(c)、图 4(g)]。黏土矿物纹层由黑色扁平状黏土矿物团粒组成,粒径为 $50\sim 75\ \mu\text{m}$,长轴平行于纹层[图 4(h)]。石英粉砂纹层以棱角状石英为主,含少量碳酸盐矿物、云母[图 4(i)]。该类岩相的 TOC 平均含量为 2.2% 。硅质矿物含量最高,平均为 55.1% ;黏土矿物平均含量为 34.0% ;碳酸盐矿物平均含量为 10.9% (表 1)。页岩脆性指数为 $54.2\%\sim 76.0\%$ (平均为 66.3%)。该类岩相为龙一段一亚段 4 小层和 5 小层的主要岩相类型。

3.2.4 中 TOC 硅泥混合页岩(CM2)岩相

CM2 岩相为深灰色黏土质页岩[图 3(d)]。岩石薄片下可见由多个细黏土矿物纹层复合成一个粗的黏土矿物纹层,具有韵律性,黏土矿物纹层厚、粉砂纹层薄,生物扰动强烈[图 3(d)、图 4(j)、图 4(k)]。粉砂纹层含有大量棱角状石英和云母[图 4(l)]。该类岩相的 TOC 平均含量为 2.2% 。硅质矿物与黏土矿物含量相



(a)极薄纹层发育,S1岩相,L214井4287.71m;(b)无定形硅质微粒、黏土矿物-有机质团粒发育,含少量石英粉砂和碳酸盐矿物,S1岩相,L214井4287.71m;(c)鸡骨状火山玻璃,S1岩相,L214井4287.71m;(d)薄细的粉砂纹层夹黏土矿物纹层,CM1岩相,L214井4301.60m;(e)粉砂纹层由单颗粒石英、方解石及白云石组成,CM1岩相,L214井4301.60m;(f)细砂级火山玻璃,CM1岩相,L214井4301.60m;(g)双黏土矿物韵律纹层发育,S2岩相,L214井4313.30m;(h)黏土矿物纹层由黑色扁平状黏土矿物团粒组成,S2岩相,L214井4313.30m;(i)黏土矿物纹层中黏土矿物团粒、棱角状石英粉砂含量高,含少量碳酸盐矿物和云母,S2岩相,L214井4313.30m;(j)多个细黏土矿物纹层复合为一个粗的黏土矿物纹层,具有韵律性,CM2岩相,L214井4309.00m;(k)粉砂纹层中的生物扰动,CM2岩相,L214井4309.00m;(l)粉砂纹层含大量棱角状石英、云母,CM2岩相,L214井4309.00m;(m)混合纹层发育,M2岩相,L214井4278.07m;(n)混合纹层中棱角状石英粉砂、方解石、白云石颗粒混杂分布,M2岩相,L214井4278.07m;(o)混合纹层中方解石、白云石发育,M2岩相,L214井4278.07m;(p)粉砂纹层发育,边界不清晰,CM3岩相,L224井3984.50m;(q)粉砂纹层中含有大量颗粒较粗的石英粉砂、云母,黏土矿物团粒发育,CM3岩相,L224井3984.50m;(r)棱角状石英粉砂发育,CM3岩相,L224井3984.50m。

图4 泸州区块龙一段一亚段上层系典型岩相的岩石薄片特征

Fig. 4 Thin section characteristics of typical lithofacies in the upper layer of first submember of Member 1 of Longmaxi Formation in Luzhou block

当,平均含量分别为 44.6% 和 39.9%;碳酸盐矿物的平均含量为 15.5%(表 1)。页岩脆性指数为 44.0%~74.0%(平均为 60.0%)。该类岩相主要发育在龙一段一亚段 5 小层和 6 小层。

3.2.5 中 TOC 混合页岩(M2)岩相

M2 岩相为深灰色混合页岩[图 3(e)]。岩石薄片下可见大量棱角状石英粉砂和碳酸盐矿物颗粒,粒径为 14~25 μm ,由这 2 类矿物颗粒组成了混合纹

层,与黏土矿物纹层构成韵律性纹层组合;此外,可见生物扰动,纹层连续性遭到破坏[图 3(e)、图 4(m)和图 4(n)]。该类岩相的 TOC 平均含量为 2.2%。硅质矿物、碳酸盐矿物和黏土矿物含量几乎各占 1/3(表 1)。其中,碳酸盐矿物以白云石为主,含量约占 2/3[图 4(o)]。页岩脆性指数为 59.2%~74.7%(平均为 67.4%)。该类岩相主要发育在龙一段一亚段 6 小层局部。

表 1 泸州区块龙一段一亚段上层系页岩岩相类型及特征

Table 1 Lithofacies types and characteristics of the upper layer of first submember of Member 1 of Longmaxi Formation in Luzhou block

岩相类型	沉积构造	TOC 含量/ %	矿物组成/%			储集空间特征			含气量/ (m^3/t)	发育层位
			硅质矿物	黏土矿物	碳酸盐矿物	孔隙类型	孔隙度/%	渗透率/mD		
高 TOC 含泥 硅质页岩	极薄纹层	3.0~3.9/ 3.4	50.0~68.2/ 56.6	16.0~43.0/ 34.1	4.5~16.9/ 8.8	有机孔、 粒间孔	3.3~7.6/ 5.8	0.005~0.024/ 0.0145	1.8~5.0/ 3.0	4 小层、 6 小层
		高 TOC 硅泥 混合页岩	3.0~3.8/ 3.2	30.8~48.3/ 42.5	30.2~50.0/ 41.5	9.0~24.9/ 14.1	晶间孔、 有机孔、 粒间孔	4.5~7.7/ 6.2	0.009~0.019/ 0.0112	1.5~3.6/ 2.6
中 TOC 含泥 硅质页岩	薄纹层	1.5~2.9/ 2.2	50.0~68.0/ 55.0	25.0~45.8/ 33.3	3.0~22.3/ 11.1	粒间孔、 晶间孔	2.2~6.9/ 4.4	0.005~0.013/ 0.0078	1.3~4.8/ 2.4	4 小层、 5 小层
中 TOC 硅泥 混合页岩	薄纹层	1.5~3.0/ 2.2	31.4~50.0/ 44.4	27.7~48.9/ 39.0	3.1~24.9/ 15.6	晶间孔、 粒间孔	2.6~7.0/ 4.9	0.004~0.022/ 0.0094	1.1~3.8/ 2.3	5 小层、 6 小层
中 TOC 混合页岩	薄纹层	1.5~2.9/ 2.2	27.0~47.5/ 36.0	24.0~40.8/ 31.6	23.0~42.0/ 31.2	溶蚀孔、 粒间孔	2.9~5.9/ 4.7	0.002~0.016/ 0.0077	1.6~3.7/ 2.4	6 小层
低 TOC 硅泥 混合页岩	薄纹层	0.7~1.5/ 1.3	40.5~49.7/ 46.0	32.2~48.3/ 42.8	5.1~22.0/ 10.9	晶间孔、 粒间孔	3.6~5.5/ 4.6	0.0082	0.7~3.1/ 1.9	5 小层、 7 小层

注:“/”后为平均值。

3.2.6 低 TOC 硅泥混合页岩(CM3)岩相

CM3 岩相为灰色粉砂质页岩[图 3(f)]。岩石薄片下可见韵律纹层,边界不清晰,发育大量棱角状石英粉砂和云母,颗粒较粗,粒径介于 20~35 μm ,黏土矿物团粒含量高,生物扰动强烈[图 3(f)、图 4(p)]。粉砂纹层由棱角状石英粉砂和云母组成,颗粒较粗[图 4(q)、图 4(r)]。页岩的 TOC 平均含量为 1.3%。硅质矿物与黏土矿物含量相当,平均含量分别为 46.0% 和 42.8%;碳酸盐矿物平均含量为 10.9%(表 1)。页岩脆性指数为 51.0%~64.8%(平均为 56.9%)。该类岩相主要发育在龙一段一亚段 5 小层局部和 7 小层。

4 不同岩相的储集空间特征

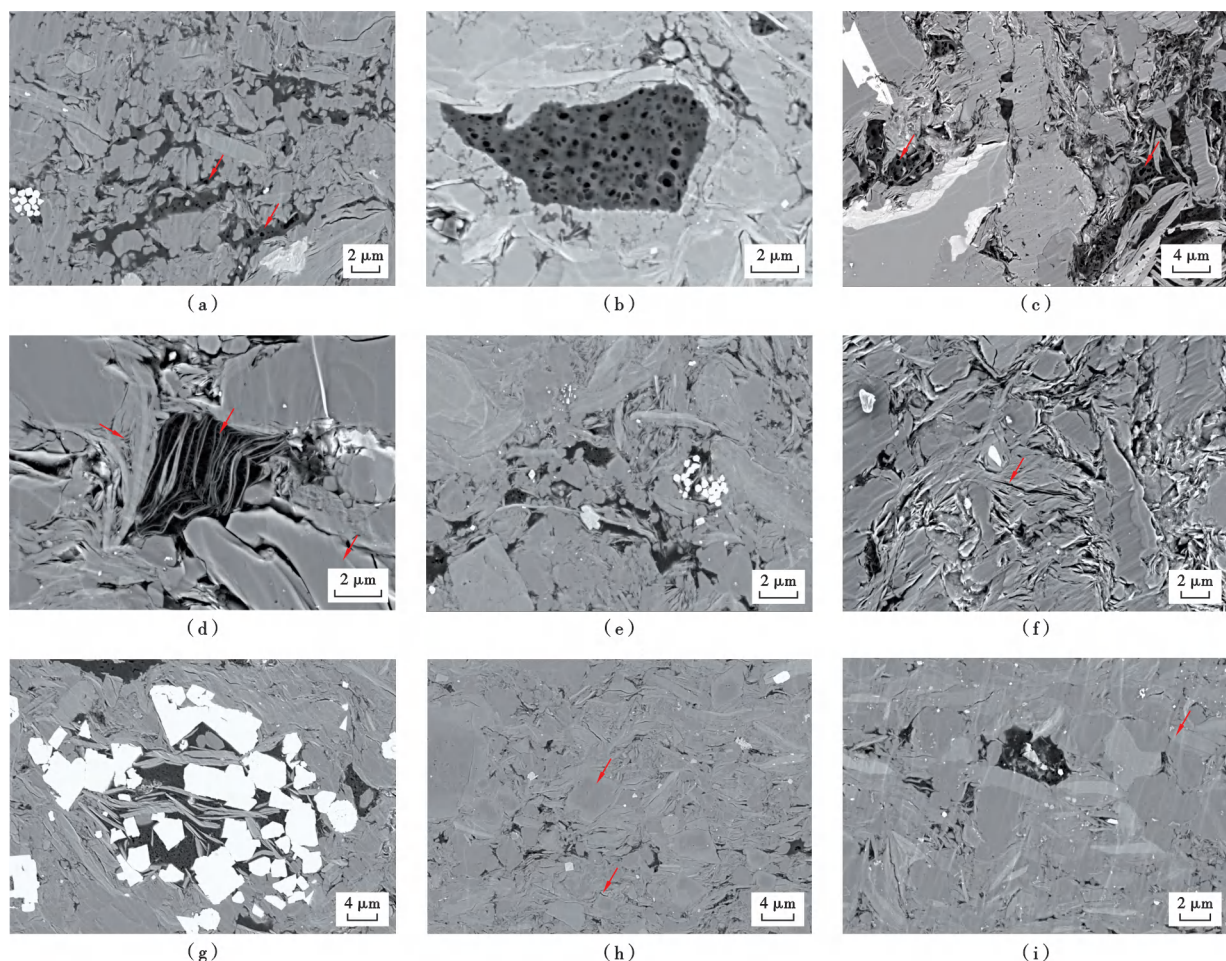
不同岩相的页岩具有不同的沉积构造、岩矿组分和有机质丰度等,这些宏观特征的差异可造成其具有不同的微观储集空间特征。

4.1 孔隙类型

龙一段一亚段上层系页岩主要发育有机孔和无机孔 2 类。其中,无机孔主要包括矿物粒间孔、黏土矿物晶间孔和矿物溶蚀孔等。不同岩相页岩的孔隙类型存在一定差异(图 5)。

FE-SEM 分析发现,S1 岩相中陆源碎屑石英、方解

石和白云石矿物颗粒呈相间分布。矿物颗粒间分布着大量成岩微晶石英,呈椭球状和片状,粒径约为 1.0 μm 。微晶石英间充填沥青,内部发育蜂窝状有机孔,孔径为 50~500 nm[图 5(a)、图 5(b)]。CM1 岩相中可见大量黏土矿物与石英、方解石和白云石等矿物颗粒呈相间分布,并可见大量有机质-黏土矿物集合体呈条带状或团块状赋存于矿物颗粒间。该类岩相主要发育 3 类孔隙:①黏土矿物晶间孔,呈狭缝形,宽度为几百纳米至几微米;②有机质-黏土矿物集合体发育大量有机孔,呈圆形或椭圆形,孔径为几十至几百纳米[图 5(c)、图 5(d)];③矿物粒间孔,呈不规则状,孔径为几至十几微米。S2 岩相中陆源碎屑石英、方解石、白云石和黏土矿物呈相间分布,主要发育矿物粒间孔、黏土矿物晶间孔,微晶石英少见,有机孔发育较少[图 5(e)]。CM2 岩相以黏土矿物晶间孔为主,此外,成岩期形成的黄铁矿晶粒常分布于有机质-黏土矿物集合体间,可对有机孔起到支撑作用[图 5(f)、图 5(g)]。M2 岩相中白云石、方解石含量高,发育矿物溶蚀孔,呈圆形或不规则形,孔径为几十纳米[图 5(h)];此外,石英、黏土矿物颗粒间发育粒间孔。CM3 岩相中含有大量黏土矿物和陆源碎屑石英,孔隙类型以黏土矿物晶间孔和矿物粒间孔为主[图 5(i)]。



(a)微晶石英呈椭球状、片状分布,其间充填的有机质发育大量有机孔,S1岩相,L214井4313.50m;(b)团块状有机质发育海绵状有机孔,S1岩相,L214井4287.70m;(c)有机质-黏土矿物集合体呈条带状分布,不规则粒间孔、狭缝形晶间孔及近圆形有机孔发育,CM1岩相,L202井4257.90m;(d)团块状有机质-黏土矿物集合体,发育大量有机孔,CM1岩相,Y101H3-8井3731.90m;(e)矿物粒间孔、晶间孔发育,有机孔发育较少,S2岩相,Y101H3-8井3767.07m;(f)狭缝形黏土矿物晶间孔发育,CM2岩相,L202井4258.00m;(g)成岩期黄铁矿晶粒支撑有机孔,CM2岩相,L214井4278.10m;(h)具有环带结构的铁白云石发育溶蚀孔,M2岩相,Y101H3-8井3747.20m;(i)黏土矿物晶间孔和矿物粒间孔发育,CM3岩相,L214井3759.60m。

图5 泸州区块龙一段一亚段上层系不同岩相的孔隙特征

Fig. 5 Pore characteristics of different lithofacies in the upper layer of first submember of Member 1 of Longmaxi Formation in Luzhou block

4.2 微裂缝特征

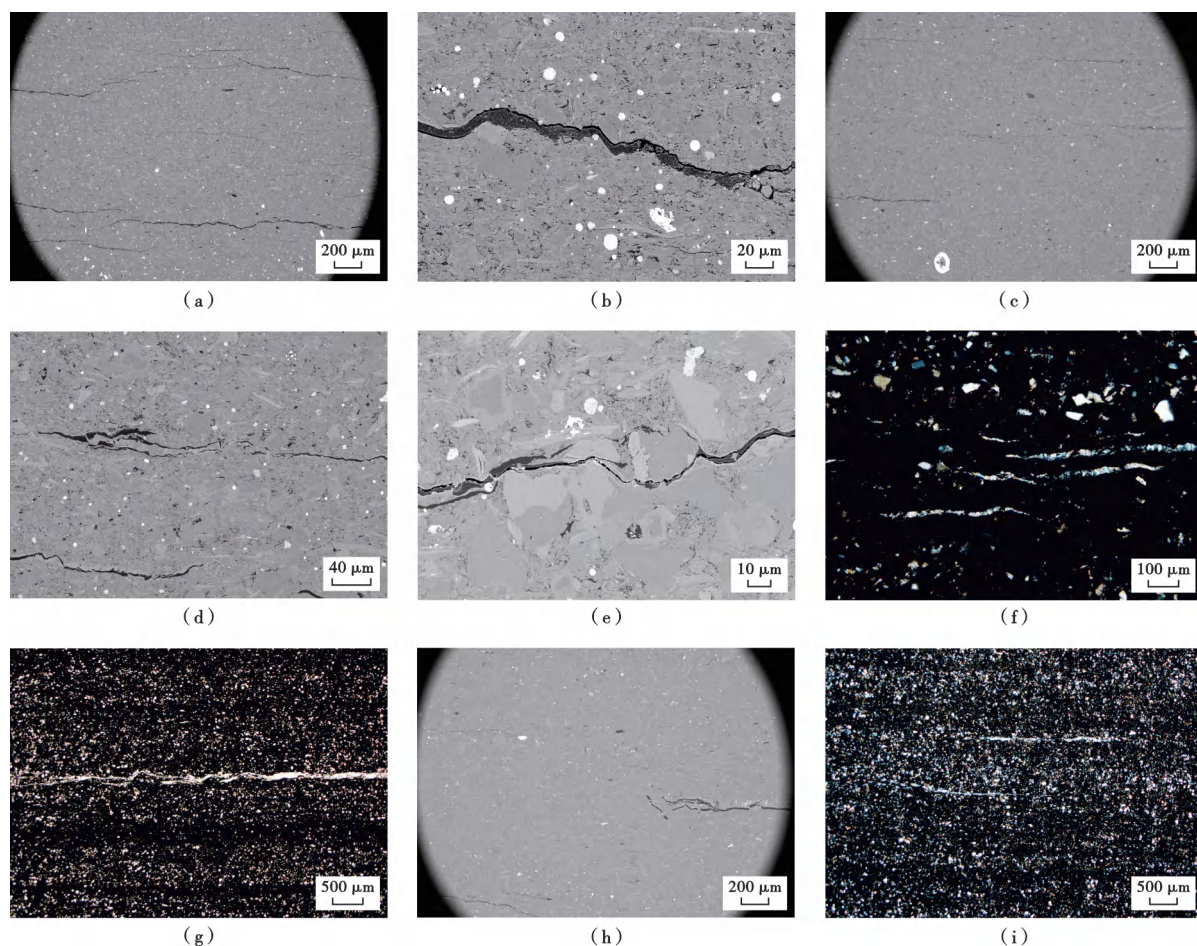
FE-SEM观察可见,CM1岩相中微裂缝最为发育,裂缝延伸长度超过2mm,有机质充填其中,且多与矿物粒间孔相互连通[图6(a)、图6(b)]。S1岩相中微裂缝较为发育,裂缝延伸长度为0.8~1.2mm[图6(c)],显微镜下可见微裂缝平行于纹层发育,呈断折状,硅质、钙质胶结物以及沥青充填其中[图6(d)]。S2岩相发育少量微裂缝,FE-SEM观察可见微裂缝沿矿物颗粒延伸[图6(e)],正交偏光显微镜下可见微裂缝被方解石充填,呈雁行式排列,裂缝延伸长度为0.4~0.6mm[图6(f)]。CM2岩相的微裂缝平行于纹层面发育,延伸长度超过2.0mm,且连续性较好,常被硅

质、钙质胶结物充填[图6(g)]。M2岩相和CM3岩相均发育少量微裂缝,裂缝呈长条形,延伸长度小于0.5mm,连续性差[图6(h)、图6(i)]。

5 分析与讨论

5.1 “甜点”岩相类型

“甜点”岩相类型的判别依据主要为页岩有机质丰度、储集空间类型及其发育程度、矿物组成及含量。有机质丰度决定了页岩的生烃潜力;储集空间类型及其发育程度影响着页岩的储集性能^[19-21];脆性矿物含量决定了页岩的可压裂性,通常脆性矿物含量越高,压裂时页岩储层越易形成复杂缝网,体积改造效果越理想^[22]。



(a)微裂缝发育、延伸长,CM1 岩相,Y101H3-8 井 3731.90 m,扫描电镜;(b)微裂缝被有机质充填,与矿物粒间孔相互连通,CM1 岩相,Y101H3-8 井 3731.90 m,扫描电镜;(c)微裂缝发育,S1 岩相,L214 井 4317.02 m,扫描电镜;(d)微裂缝呈曲折状,被硅质、钙质胶结物与沥青充填,S1 岩相,L214 井 4316.50 m,单偏光;(e)少量微裂缝沿矿物颗粒延伸,S2 岩相,Y101H3-8 井 3767.70 m,扫描电镜;(f)微裂缝被方解石胶结,呈雁行式排列,Y101H3-8 井 3767.70 m,正交偏光;(g)微裂缝延伸长,被硅质、钙质胶结,CM2 岩相,L214 井 4309.00 m,单偏光;(h)少量微裂缝发育,M2 岩相,L214 井 4278.07 m,扫描电镜;(i)微裂缝延伸长度短、连续性差,CM3 岩相,L202 井 4292.59 m,正交偏光。

图 6 泸州区块龙一段一亚段上层系页岩微裂缝特征

Fig. 6 Microfracture characteristics of shale in the upper layers of first submember of Member 1 of Longmaxi Formation in Luzhou block

S1 岩相发育于龙一段一亚段 4 小层底部以及 5 小层和 6 小层的交界层段,其页岩的 TOC 含量最高(平均为 3.4%),有机孔与微裂缝发育,孔隙度高(平均为 5.8%)、渗透率高(平均为 0.0145 mD),脆性矿物含量高(平均为 65.0%),岩心含气量最高(平均为 3.0 m³/t)。CM1 岩相主要发育于龙一段一亚段 6 小层,其页岩的 TOC 含量高(平均为 3.2%),储集空间类型多样,矿物晶间孔、粒间孔、有机孔及微裂缝均发育,孔隙度最高(平均为 6.2%)、渗透率较高(平均为 0.0112 mD),脆性矿物含量中等(平均为 58.3%),岩心含气量较高(平均为 2.6 m³/t)。S2 岩相发育于龙一段一亚段 4 小层、5 小层,TOC 含量中等(平均为 2.2%),矿物粒间孔、晶间孔发育,但有机孔发育欠佳,孔隙度低(平均为 4.4%)、渗透率低(平均为 0.0078 mD),脆性矿物含量较高(平均为 66.3%),岩心含气量中等(平均为 2.4 m³/t)。

CM2 岩相发育于龙一段一亚段 5 小层、6 小层,其页岩的 TOC 含量中等(平均为 2.2%),主要发育矿物晶间孔,孔隙度中等(平均为 4.9%)、渗透率中等(平均为 0.0094 mD),脆性矿物含量中等(平均为 60.0%),岩心含气量较低(平均为 2.3 m³/t)。M2 岩相发育于龙一段一亚段 6 小层局部,其页岩的 TOC 含量中等(平均为 2.2%),发育少量矿物溶蚀孔、粒间孔,孔隙度较低(平均为 4.7%)、渗透率低(平均为 0.0077 mD),脆性矿物含量高(平均为 67.4%),岩心含气量较低(平均为 2.4 m³/t)。CM3 岩相主要发育于龙一段一亚段 7 小层局部,其页岩的 TOC 含量最低(平均为 1.3%),矿物晶间孔、粒间孔发育,孔隙度较低(平均为 4.6%)、渗透率低(平均为 0.0082 mD),脆性矿物含量最低(平均为 56.9%),岩心含气量最低(平均为 1.9 m³/t)(表 1、图 7)。

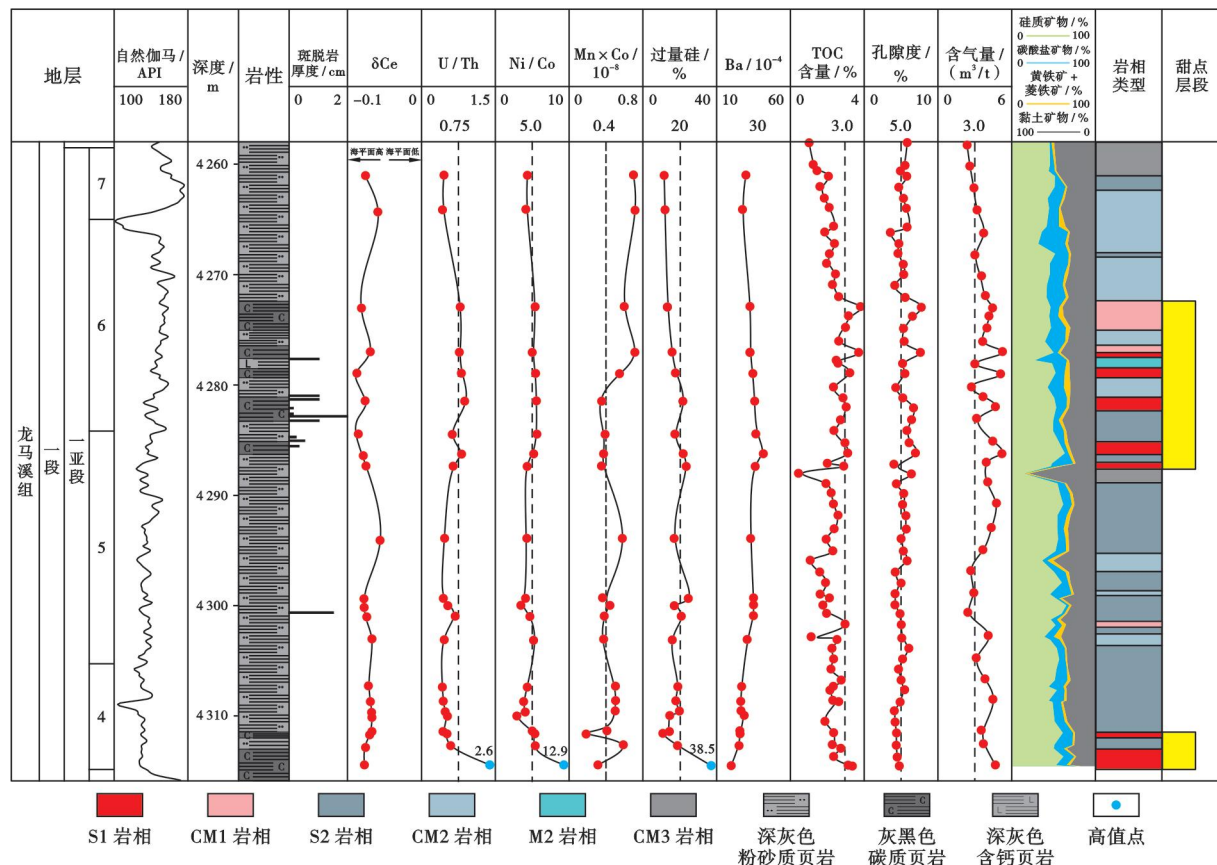


图7 泸州区块龙一段一亚段上层系页岩储层的综合评价

Fig. 7 Comprehensive evaluation of shale reservoir in the upper layer of first submember of Member 1 of Longmaxi Formation in Luzhou block

综合以上分析可知, S1 岩相页岩的有机质丰度高, 孔隙与微裂缝发育, 脆性矿物含量高, 含气量最高, 为龙一段一亚段上层系最优岩相类型。CM1 岩相的有机质丰度高, 储集空间类型多样, 孔隙度最高, 含气量较高, 为次优岩相类型。

5.2 “甜点”岩相形成的主控因素

古生产力的高低和沉积环境的氧化-还原程度是影响有机质富集和保存的重要因素^[23-25]。海平面升降控制着底层水体的氧化-还原性, 火山事件和上升洋流则是促进早志留世扬子板块古海洋生产力的 2 个重要驱动因素。

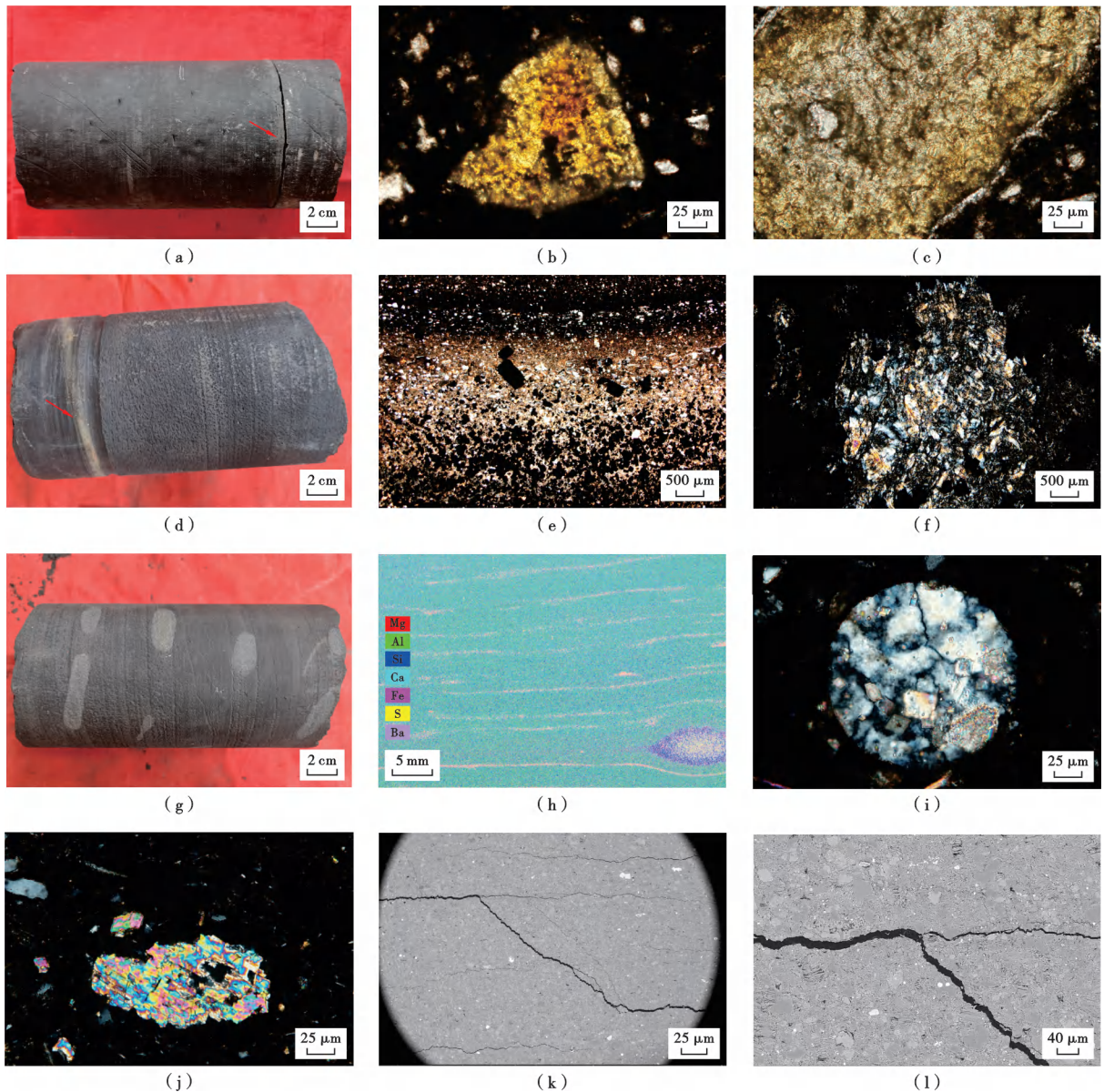
5.2.1 海平面升降

志留纪早期, 华南地区位于古特提斯洋东部赤道附近, 整体为陆表海环境^[26]。在古生代大陆架斜坡缺氧沉积物化学地层学研究中, Ce 元素异常可用来指示海平面的相对变化^[27]。海平面下降, 底层水含氧量增高, 氧化环境下 Ce 元素不易溶于海水, 因此含氧海水中 Ce 含量亏损呈负异常, 而含氧沉积物中 Ce 含量富集呈正异常或无明显负异常。反之, 海平面升高, 底层水含氧量降低, 缺氧环境下 Ce 元素发生活化并释放到水体中, 海水中 Ce 元素富集, 而在同期沉积物中 Ce 元素则

发生亏损呈负异常^[27-28]。前人研究认为, Ce 元素异常的分析样品应选取不含牙形刺或其他磷质化石的沉积物。早志留世龙马溪组笔石相黑色页岩符合这一条件, 可根据 δCe 来判别海平面的相对变化^[27]。计算结果表明, 龙一段一亚段 4 小层—7 小层呈现不同程度的 Ce 元素亏损, 表明该时期海平面变化较为频繁。其中, 龙一段一亚段 5 小层顶至 6 小层的 Ce 元素异常亏损程度较高(图 7), 指示该沉积期海平面相对较高, 底层水中溶解的氧浓度降低, 从而有利于有机质富集与保存。

5.2.2 火山事件

志留纪早期, 受华夏地块与扬子地块间汇聚作用影响, 华南地区发生了多期次的火山活动, 沉积了多层火山灰^[29-31]。岩心观察发现, 泸州区块龙一段一亚段上层系发育多层火山凝灰层, 密集段位于 5 小层顶至 6 小层底的 S1 岩相和 CM1 岩相发育层段(图 7)。相对于五峰组火山灰层, 龙一段一亚段上层系发育的火山凝灰层厚度较薄, 一般为 0.1~0.5 cm, 最厚达 1.0~1.5 cm, 颜色多呈浅灰色[图 8(a)]。XRD 矿物分析结果显示, 火山凝灰层中黏土矿物含量超过 70%, 以伊/蒙混层为主。火山凝灰层中的玻屑在成岩过程中发生脱玻化作用, 脱水收缩形成微张裂缝, 并逐步扩展、连



(a)浅灰色凝灰岩薄层,L214井4277.80 m;(b)棱角状细砂级火山玻璃,L214井4276.91 m,单偏光;(c)火山玻璃蚀变,L214井4301.60 m,单偏光;(d)凝灰岩黄铁矿化,L224井4006.55 m;(e)凝灰岩黄铁矿化,可见交代成因的黄铁矿晶体,L224井4006.55 m,正交偏光;(f)火山灰蚀变为伊/蒙混层和伊利石,呈斑块状,L224井4006.55 m,正交偏光;(g)椭球状重晶石结核发育,部分结核核心黄铁矿化,L224井4004.60 m;(h)重晶石结核以Ba、S元素为主,L224井4004.60 m,荧光光谱;(i)硅质放射虫化石,部分被方解石交代,L214井4301.60 m,正交偏光;(j)细砂级生物碎屑发生重结晶,L214井4287.70 m,正交偏光;(k)火山凝灰层发育大量微裂缝,L214井4283.56 m,扫描电镜;(l)微裂缝充填有机质,L214井4283.56 m,扫描电镜。

图8 泸州区块龙一段一亚段上层系“甜点”岩相的岩心和微观特征

Fig. 8 Core and microscopic characteristics of sweet spot lithofacies in the upper layers of first submember of Member 1 of Longmaxi Formation in Luzhou block

通,形成层理缝。岩心观察可见在火山凝灰层与黑色页岩接触边界处层理缝发育,并常见二者呈分离状态[图8(a)]。岩石薄片观察可见火山凝灰层中含棱角状火山玻璃组分,其在单偏光显微镜下呈黄褐色或灰黄色,粒径为 $100\sim 200\mu\text{m}$,已发生蚀变[图8(b)、图8(c)]。此外,火山凝灰层容易发生黄铁矿化,厚度

为 $1.0\sim 2.0\text{cm}$,呈黄灰色[图8(d)],黄铁矿晶体为后生交代成因,分散在火山灰中[图8(e)]。部分残余火山灰已蚀变为伊/蒙混层和伊利石,形成黏土矿物斑块[图8(f)]。

5.2.3 上升洋流

上升洋流是受地形、季风或大洋环流等作用而产

生深层水涌升的一种洋流^[32]。古生代扬子板块处于低纬度地区,属于热带和亚热带气候。当南极地区富营养盐的冷水团沿洋底流向低纬度区时,在大陆斜坡区易形成上升洋流^[33]。Mn、Co含量乘积是判别上升洋流的常用指标,通常其值小于 0.4×10^{-8} 指示上升洋流环境^[34]。L214井、L224井41块岩心样品的元素分析表明,S1岩相、CM1岩相岩心的Mn、Co含量乘积值主要分布在小于 0.4×10^{-8} 的范围内,表明该时期可能存在上升洋流事件(图7、图9)。此外,岩心观察发现,S1岩相和CM1岩相层段发育多个重晶石结核,呈椭球形或圆形,宽度为1~3 cm,长度为1~5 cm,部分结核被黄铁矿交代[图8(g)]。XRF元素扫描分析显示,重晶石结核以Ba、S元素为主[图8(h)]。前人研究认为,龙马溪组中发育的重晶石结核与黑色页岩共生,形成于上升洋流控制区的贫氧—缺氧沉积环境^[35-37]。上升洋流将深海富营养和富Ba海水带到

海洋表层,导致海洋生物大量繁殖^[24,38-41]。海水中的Ba元素通过生物作用富集、形成生物Ba,并在埋藏过程中在硫酸盐衰竭区发生细菌硫酸盐还原作用,再次溶解、激活,最终赋存在早期成岩阶段松软沉积物的孔隙水中^[17]。由此推测,S1岩相和CM1岩相层段为上升洋流控制区。

5.2.4 岩相发育模式

研究表明,火山喷发的火山灰降落到深海中后会发水解作用,能够释放大量P、N、Fe和Si等营养元素^[23,26-28]。上升洋流可将深海的营养物质带到浅海的透光带,为藻类等低等水生生物的勃发提供充沛的营养来源;而以藻类为食的浮游动物也会随之大量繁殖,表层海水中生物生产力可大幅提高^[17,24,38-39](图10)。大量浮游生物死亡后沉降于海底,如在龙一段一亚段上层系S1岩相和CM1岩相中可见部分被方解石交代的硅质放射虫化石,以及重结晶的细砂级钙质生物碎屑[图8(i)、图8(j)]。龙一段一亚段上层系“甜点”岩相中的过量硅^[42]为生物成因硅,其含量为15%~21%。表层海水中的大量浮游生物在死亡、沉降过程中由于生物体分解会消耗大量的氧气,当氧气的消耗速率超过表层水体向深层水体输送氧气的速率时,底层水体形成最小含氧带,可导致水体缺氧程度增加^[41]。岩石的U/Th值和Ni/Co值可用于判别沉积时的氧化还原环境^[43],如S1岩相和CM1岩相发育层段的U/Th值为0.76~2.6、Ni/Co值为5.4~12.9(图7),指示其为贫氧—缺氧的沉积环境。综合分析认为,埃隆期,川南地区的海平面在海退背景下仍存在小幅度升降,其中,龙一段一亚段5小层顶至6小层沉积期海平面升高,底层水体中溶解的氧浓度降低;同时,该时期火山事件和上升洋流事件共同促进了海洋生物生产力的提高,为有机质和生物硅的富集提供了充足的物质基础;此

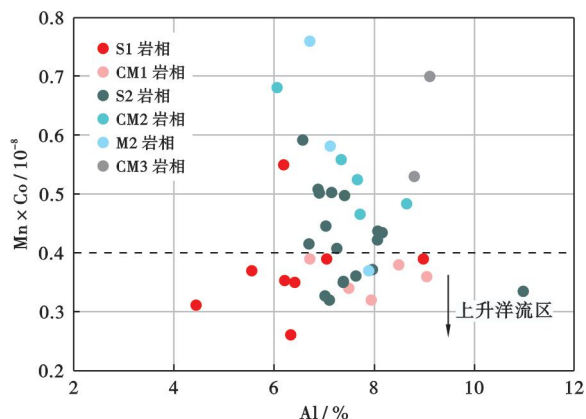


图9 泸州区块龙一段一亚段上层系岩相Mn、Co与Al的相关性分析

Fig. 9 Correlation analysis of Mn, Co and Al in the upper layer of first submember of Member 1 of Longmaxi Formation in Luzhou block

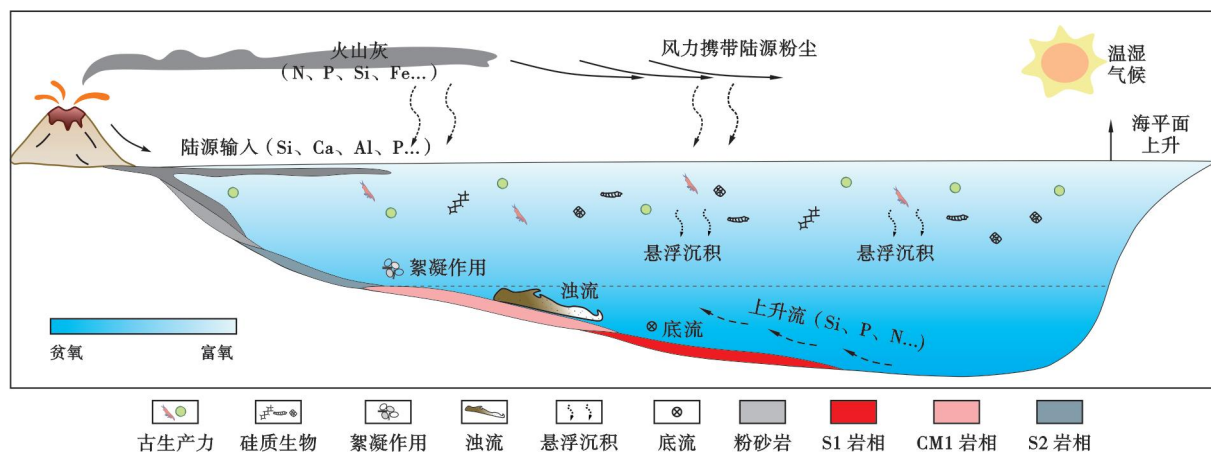


图10 川南地区龙一段一亚段上层系“甜点”岩相发育模式

Fig. 10 Development model of sweet spot lithofacies in the upper layer of first submember of Member 1 of Longmaxi Formation in Luzhou block

外,大量浮游生物的死亡、分解加剧了底层水体的贫氧程度,有利于有机质埋藏保存,从而形成了一套富有机质的硅质、硅泥混合质页岩(图10)。

在后期成岩过程中,生物成因硅质的存在有利于有机孔的形成和保持。一方面,在成岩演化阶段早期,浮游生物躯壳在埋藏过程中会发生溶解、再沉淀或重结晶,可产生大量粒间孔,为早期沥青的滞留提供赋存空间;另一方面,随着成岩过程中温度、压力的增高,生物硅质会进一步转化为隐晶质—微晶石英,石英属于典型的刚性矿物,微晶石英颗粒呈点接触或面接触,构成刚性格架,可有效提高页岩的机械强度,增加抗压实能力,使得有机孔在深埋条件下得以保存^[44]。例如,S1岩相的矿物颗粒间分布着大量微晶石英,其间发育蜂窝状有机孔[图5(a)、图5(b)]。

扬子地区龙马溪组的火山物质属于中—酸性硅酸盐,性质极不稳定,在成岩演化过程中会发生脱玻化作用,形成隐晶或微晶长英质矿物,或发生交代蚀变作用,形成伊利石、伊/蒙混层等矿物^[45]。火山玻屑在脱水收缩过程中发生形态变化,造成体积缩小,其边缘形成大量微张裂缝,可有效改善页岩储层的渗透性[图8(k)、图8(l)]。

6 结 论

(1) 四川盆地泸州区块龙一段—亚段4小层—7小层主要发育高TOC含泥硅质页岩(S1)岩相、高TOC硅泥混合页岩(CM1)岩相、中TOC含泥硅质页岩(S2)岩相、中TOC硅泥混合页岩(CM2)岩相、中TOC混合页岩(M2)岩相、低TOC硅泥混合页岩(CM3)岩相6种岩相。

(2) S1岩相和CM1岩相主要发育于龙一段—亚段4小层和6小层局部,为龙一段—亚段上层系的“甜点”岩相类型。其中,S1岩相中有机质丰度高,孔隙和微裂缝发育,脆性矿物含量高,含气量最高,为最优岩相类型;CM1岩相中有机质丰度高,储集空间类型多样,孔隙度最高,含气量较高,为次优岩相类型。

(3) 海平面升降、火山事件和上升洋流共同控制着龙一段—亚段上层系“甜点”岩相的形成。海平面的小幅上升可造成底层水中溶解的氧浓度降低,火山喷发的火山灰可释放大量营养元素,上升洋流可带来深海富营养水体,三者共同促使表层海水中海洋生物生产力的提高,从而形成一套富有机质的硅质、硅泥混合页岩,并在成岩过程中发育大量微观孔隙和微裂缝。

参 考 文 献

[1] 孙焕泉,蔡勋育,胡德高,等.页岩气立体开发理论技术与实践——以四川盆地涪陵页岩气田为例[J].石油勘探与开发,

2023,50(3):573-584.

SUN Huanquan, CAI Xunyu, HU Degao, et al. Theory, technology and practice of shale gas three-dimensional development: a case study of Fuling shale gas field in Sichuan Basin, SW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2023, 50(3): 573-584.

[2] ALIMAHOMED F, MALPANI R, JOSE R, et al. Development of the stacked pay in the Delaware Basin, Permian Basin[C]// Proceedings of the 6th Unconventional Resources Technology Conference, Houston, Texas: AAPG, 2018.

[3] 杨洪志,赵圣贤,夏自强,等.四川盆地南部泸州区块深层页岩气立体开发目标优选[J].天然气工业,2022,42(8):162-174.

YANG Hongzhi, ZHAO Shengxian, XIA Ziqiang, et al. Target selection of tridimensional development of deep shale gas in the Luzhou region, South Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 2022, 42(8): 162-174.

[4] 端祥刚,吴建发,张晓伟,等.四川盆地海相页岩气提高采收率研究进展与关键问题[J].石油学报,2022,43(8):1185-1200.

DUAN Xianggang, WU Jianfa, ZHANG Xiaowei, et al. Progress and key issues in the study of enhanced recovery of marine shale gas in Sichuan Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2022, 43(8): 1185-1200.

[5] 姜鹏飞,吴建发,朱逸青,等.四川盆地海相页岩气富集条件及勘探开发有利区[J].石油学报,2023,44(1):91-109.

JIANG Pengfei, WU Jianfa, ZHU Yiqing, et al. Enrichment conditions and favorable areas for exploration and development of marine shale gas in Sichuan Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2023, 44(1): 91-109.

[6] 何晓,陈更生,吴建发,等.四川盆地南部地区深层页岩气勘探开发新进展与挑战[J].天然气工业,2022,42(8):24-34.

HE Xiao, CHEN Gengsheng, WU Jianfa, et al. Deep shale gas exploration and development in the southern Sichuan Basin: new progress and challenges[J]. Natural Gas Industry, 2022, 42(8): 24-34.

[7] 武瑾,李海,杨学锋,等.深层海相页岩纹层类型、组合及其对储层品质的影响——以四川盆地南部泸州区块龙马溪组一段—亚段为例[J].石油学报,2023,44(9):1517-1531.

WU Jin, LI Hai, YANG Xuefeng, et al. Types and combinations of deep marine shale laminae and their effects on reservoir quality: a case study of the first submember of Member 1 of Longmaxi Formation in Luzhou block, south Sichuan Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2023, 44(9): 1517-1531.

[8] 杨洪志,赵圣贤,刘勇,等.泸州区块深层页岩气富集高产主控因素[J].天然气工业,2019,39(11):55-63.

YANG Hongzhi, ZHAO Shengxian, LIU Yong, et al. Main controlling factors of enrichment and high-yield of deep shale gas in the Luzhou block, southern Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 2019, 39(11): 55-63.

[9] 包汉勇,梁榜,郑爱维,等.地质工程一体化在涪陵页岩气示范区立体勘探开发中的应用[J].中国石油勘探,2022,27(1):88-98.

BAO Hanyong, LIANG Bang, ZHENG Aiwei, et al. Application of geology and engineering integration in stereoscopic exploration and development of Fuling shale gas demonstration area[J]. China Petroleum Exploration, 2022, 27(1): 88-98.

[10] 孙焕泉,周德华,蔡勋育,等.中国石化页岩气发展现状与趋势

- [J]. 中国石油勘探, 2020, 25(2): 14-26.
- SUN Huanquan, ZHOU Dehua, CAI Xunyu, et al. Progress and prospect of shale gas development of Sinopec[J]. *China Petroleum Exploration*, 2020, 25(2): 14-26.
- [11] 武瑾, 王红岩, 施振生, 等. 海陆过渡相黑色页岩优势岩相类型及成因机制——以鄂尔多斯盆地东缘二叠系山西组为例[J]. *石油勘探与开发*, 2021, 48(6): 1137-1149.
- WU Jin, WANG Hongyan, SHI Zhensheng, et al. Favorable lithofacies types and genesis of marine-continental transitional black shale: a case study of Permian Shanxi Formation in the eastern margin of Ordos Basin, NW China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2021, 48(6): 1137-1149.
- [12] 吴松涛, 朱如凯, 罗忠, 等. 中国中西部盆地典型陆相页岩纹层结构与储层品质评价[J]. *中国石油勘探*, 2022, 27(5): 62-72.
- WU Songtao, ZHU Rukai, LUO Zhong, et al. Laminar structure of typical continental shales and reservoir quality evaluation in central-western basins in China[J]. *China Petroleum Exploration*, 2022, 27(5): 62-72.
- [13] 孙龙德, 赵文智, 刘合, 等. 页岩油“甜点”概念及其应用讨论[J]. *石油学报*, 2023, 44(1): 1-13.
- SUN Longde, ZHAO Wenzhi, LIU He, et al. Concept and application of “sweet spot” in shale oil[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2023, 44(1): 1-13.
- [14] 周安富, 谢伟, 邱响晰, 等. 泸州区块龙—14 小层页岩气勘探开发潜力[J]. *特种油气藏*, 2022, 29(6): 20-28.
- ZHOU Anfu, XIE Wei, QIU Xunxi, et al. On exploration and development potential of shale gas in Longyi14 sub-bed in Luzhou block[J]. *Special Oil & Gas Reservoirs*, 2022, 29(6): 20-28.
- [15] 余凯, 鲜成钢, 文恒, 等. 昭通国家级示范区浅层页岩气立体开发探索: 以海坝背斜南翼 YS203H1 平台为例[J]. *地球科学*, 2023, 48(1): 252-266.
- YU Kai, XIAN Chenggang, WEN Heng, et al. Stereoscopic development exploration of shallow shale gas in Zhaotong national shale gas demonstration area: case study of YS203H1 pad of Haiba anticline southern limb[J]. *Earth Science*, 2023, 48(1): 252-266.
- [16] HAQ B U, SCHUTTER S R. A chronology of Paleozoic sea-level changes[J]. *Science*, 2008, 322(5898): 64-68.
- [17] 王玉满, 陈波, 李新景, 等. 川东北地区下志留统龙马溪组上升洋流相页岩沉积特征[J]. *石油学报*, 2018, 39(10): 1092-1102.
- WANG Yuman, CHEN Bo, LI Xinjing, et al. Sedimentary characteristics of upwelling facies shale in Lower Silurian Longmaxi Formation, northeast Sichuan area [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2018, 39(10): 1092-1102.
- [18] 赵文智, 李建忠, 杨涛, 等. 中国南方海相页岩气成藏差异性比较与意义[J]. *石油勘探与开发*, 2016, 43(4): 499-510.
- ZHAO Wenzhi, LI Jianzhong, YANG Tao, et al. Geological difference and its significance of marine shale gases in South China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2016, 43(4): 499-510.
- [19] YAWAR Z, SCHIEBER J. On the origin of silt laminae in laminated shales[J]. *Sedimentary Geology*, 2017, 360: 22-34.
- [20] 柳波, 石佳欣, 付晓飞, 等. 陆相泥页岩层系岩相特征与页岩油富集条件——以松辽盆地古龙凹陷白垩系青山口组一段富有机质泥页岩为例[J]. *石油勘探与开发*, 2018, 45(5): 828-838.
- LIU Bo, SHI Jiaxin, FU Xiaofei, et al. Petrological characteristics and shale oil enrichment of lacustrine fine-grained sedimentary system: a case study of organic-rich shale in first Member of Cretaceous Qingshankou Formation in Gulong sag, Songliao Basin, NE China [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2018, 45(5): 828-838.
- [21] POMMER M, MILLIKEN K. Pore types and pore-size distributions across thermal maturity, Eagle Ford Formation, southern Texas[J]. *AAPG Bulletin*, 2015, 99(9): 1713-1744.
- [22] 何治亮, 聂海宽, 胡东风, 等. 深层页岩气有效开发中的地质问题——以四川盆地及其周缘五峰组—龙马溪组为例[J]. *石油学报*, 2020, 41(4): 379-391.
- HE Zhiliang, NIE Haikuan, HU Dongfeng, et al. Geological problems in the effective development of deep shale gas: a case study of Upper Ordovician Wufeng-Lower Silurian Longmaxi formations in Sichuan Basin and its periphery[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2020, 41(4): 379-391.
- [23] 邱振, 卢斌, 陈振宏, 等. 火山灰沉积与页岩有机质富集关系探讨——以五峰组—龙马溪组含气页岩为例[J]. *沉积学报*, 2019, 37(6): 1296-1308.
- QIU Zhen, LU Bin, CHEN Zhenhong, et al. Discussion of the relationship between volcanic ash layers and organic enrichment of black shale: a case study of the Wufeng-Longmaxi gas shales in the Sichuan Basin[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2019, 37(6): 1296-1308.
- [24] YANG Shengchao, HU Wenxuan, WANG Xiaolin. Mechanism and implications of upwelling from the Late Ordovician to Early Silurian in the Yangtze region, South China[J]. *Chemical Geology*, 2021, 565: 120074.
- [25] 朱如凯, 李梦莹, 杨静儒, 等. 细粒沉积学研究进展与发展方向[J]. *石油与天然气地质*, 2022, 43(2): 251-264.
- ZHU Rukai, LI Mengying, YANG Jingru, et al. Advances and trends of fine-grained sedimentology [J]. *Oil & Gas Geology*, 2022, 43(2): 251-264.
- [26] CHEN Xu, RONG Jiayu, LI Yue, et al. Facies patterns and geography of the Yangtze region, South China, through the Ordovician and Silurian transition[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2004, 204(3/4): 353-372.
- [27] 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.
- [28] 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*, 2000, 30(1): 66-72.
- FENG Hongzhen, ERDTMANN B D, WANG Haifeng. Early Paleozoic whole rock Ce anomalies and gradual changes in sea level in the Upper Yangtze region[J]. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 2000, 43(3): 328-336.
- [29] 苏文博, 李志明, 史晓颖, 等. 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*, 2006, 13(6): 82-95.
- SU Wenbo, LI Zhiming, SHI Xiaoying, et al. K-bentonites and black shales from the Wufeng-Longmaxi formations (Early Pale-

- zoic, South China) and Xiamaling Formation (Early Neoproterozoic, North China) implications for tectonic processes during two important transitions[J]. *Earth Science Frontiers*, 2006, 13(6): 82-95.
- [30] SU Wenbo, HUFF W D, ETTENSOHN F R, et al. K-bentonite, black-shale and flysch successions at the Ordovician-Silurian transition, South China; possible sedimentary responses to the accretion of Cathaysia to the Yangtze block and its implications for the evolution of Gondwana[J]. *Gondwana Research*, 2009, 15(1): 111-130.
- [31] 舒逸, 陆永潮, 刘占红, 等. 海相页岩中斑脱岩发育特征及对页岩储层品质的影响——以涪陵地区五峰组—龙马溪组一段为例[J]. *石油学报*, 2017, 38(12): 1371-1380.
- SHU Yi, LU Yongchao, LIU Zhanhong, et al. Development characteristics of bentonite in marine shale and its effect on shale reservoir quality: a case study of Wufeng Formation to Member 1 of Longmaxi Formation, Fuling area[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2017, 38(12): 1371-1380.
- [32] 张尚锋, 许光彩, 朱锐, 等. 上升流沉积的研究现状和发展趋势[J]. *石油天然气学报*, 2012, 34(1): 7-11.
- ZHANG Shangfeng, XU Guangcai, ZHU Rui, et al. Research status and development tendency of upwelling sediments[J]. *Journal of Oil and Gas Technology*, 2012, 34(1): 7-11.
- [33] 李双建, 肖开华, 沃玉进, 等. 南海海相上奥陶统一志留统优质烃源岩发育的控制因素[J]. *沉积学报*, 2008, 26(5): 872-880.
- LI Shuangjian, XIAO Kaihua, WO Yujin, et al. Developmental controlling factors of Upper Ordovician-Lower Silurian high quality source rocks in marine sequence, South China[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2008, 26(5): 872-880.
- [34] SWEERE T, VAN DEN BOORN S, DICKSON A J, et al. Definition of new trace-metal proxies for the controls on organic matter enrichment in marine sediments based on Mn, Co, Mo and Cd concentrations[J]. *Chemical Geology*, 2016, 441: 235-245.
- [35] 笱博文, 刘树根, 冉波, 等. 扬子板块北缘下志留统龙马溪组重晶石结核特征及其成因机制分析[J]. *岩石矿物学杂志*, 2017, 36(2): 213-226.
- ZAN Bowen, LIU Shugen, RAN Bo, et al. An analysis of barite concretions from Lower Silurian Longmaxi Formation on the northern margin of the Yangtze block and their genetic mechanism[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 2017, 36(2): 213-226.
- [36] 严德天, 汪建国, 王卓卓, 等. 扬子地区上奥陶—下志留统生物钡特征及其古生产力意义[J]. *西安石油大学学报(自然科学版)*, 2009, 24(4): 16-19.
- YAN Detian, WANG Jianguo, WANG Zhuozhuo, et al. Biogenetic barium distribution from the Upper Ordovician to Lower Silurian in the Yangtze area and its significance to paleoproductivity[J]. *Journal of Xi'an Shiyou University (Natural Science Edition)*, 2009, 24(4): 16-19.
- [37] 朱逸青, 陈更生, 刘勇, 等. 四川盆地南部凯迪阶——埃隆阶层序地层与岩相古地理演化特征[J]. *石油勘探与开发*, 2021, 48(5): 974-985.
- ZHU Yiqing, CHEN Gengsheng, LIU Yong, et al. Sequence stratigraphy and lithofacies paleogeographic evolution of Katian stage-Aeronian stage in southern Sichuan Basin, SW China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2021, 48(5): 974-985.
- [38] WORNE S, KENDER S, SWANN G E A, et al. Coupled climate and subarctic Pacific nutrient upwelling over the last 850,000 years[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2019, 522: 87-97.
- [39] PICHEVIN L E, GANESH RAM R S, GEIBERT W, et al. Silica burial enhanced by iron limitation in oceanic upwelling margins[J]. *Nature Geoscience*, 7: 541-546.
- [40] NIU Xing, YAN Detian, ZHUANG Xinguo, et al. Origin of quartz in the Lower Cambrian Niutitang Formation in south Hubei Province, Upper Yangtze platform[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2018, 96: 271-287.
- [41] 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, LV 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.
- [42] 王淑芳, 邹才能, 董大忠, 等. 四川盆地富有机质页岩硅质生物成因及对页岩气开发的意义[J]. *北京大学学报(自然科学版)*, 2014, 50(3): 476-486.
- WANG Shufang, ZOU Caineng, DONG Dazhong, et al. Biogenic silica of organic-rich shale in Sichuan Basin and its significance for shale gas[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2014, 50(3): 476-486.
- [43] 腾格尔, 刘文汇, 徐永昌, 等. 缺氧环境及地球化学判别标志的探讨——以鄂尔多斯盆地为例[J]. *沉积学报*, 2004, 22(2): 365-372.
- TONGER, LIU Wenhui, XU Yongchang, et al. The discussion on anoxic environments and its geochemical identifying indices[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2004, 22(2): 365-372.
- [44] 腾格尔, 卢龙飞, 俞凌杰, 等. 页岩有机质孔隙形成、保持及其连通性的控制作用[J]. *石油勘探与开发*, 2021, 48(4): 687-699.
- TENGER, LU Longfei, YU Lingjie, et al. Formation, preservation and connectivity control of organic pores in shale[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2021, 48(4): 687-699.
- [45] 李登华, 李建忠, 黄金亮, 等. 火山灰对页岩油气成藏的重要作用及其启示[J]. *天然气工业*, 2014, 34(5): 56-65.
- LI Denghua, LI Jianzhong, HUANG Jinliang, et al. An important role of volcanic ash in the formation of shale plays and its inspiration[J]. *Natural Gas Industry*, 2014, 34(5): 56-65.

(收稿日期 2024-03-07 改回日期 2024-05-25 编辑 雷永良)