

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2026.226>



四川盆地五峰组-龙马溪组页岩沉积作用

周晓峰¹, 杨学锋², 李熙喆³, 赵圣贤², 郭伟³, 梁萍萍³

1. 中国石油大学(北京)石油工程学院, 北京 102249

2. 中国石油西南油气田分公司页岩气研究院, 四川成都 610051

3. 中国石油勘探开发研究院, 北京 100083

摘要: 海相页岩沉积作用尚不清楚. 在四川盆地 7 口井五峰组-龙马溪组采集 9 块页岩分成 18 个研究单元, 利用岩心、光学显微镜、电子探针、MAPS 技术有序衔接开展沉积作用分析. 结果表明, 海相页岩为静水沉积、深水重力流沉积、深水牵引流沉积交互叠置, 各沉积类型岩石学标志不同. 静水沉积的典型标志为富孔有机黏粒复合体, 深水重力流沉积的典型标志为粗粒陆源石英与浅水介屑悬浮在含深水细粒物质中, 深水牵引流沉积发育富孔纯净有机质. 含放射虫页岩是开展海相页岩沉积分析的关键, 沉积环境与沉积类型结合是解释矿物和有机质及页岩纹层赋存形式与成因的约束条件, 分沉积类型开展储层评价是页岩气高效开发的有效路径. 建议页岩沉积和储层分析重视 MAPS 技术.

关键词: 海相页岩; 沉积作用; 岩石学证据; 五峰组-龙马溪组; 四川盆地; 非常规油气沉积学.

中图分类号: P581; P67

文章编号: 1000-2383(2026)07-2747-26

收稿日期: 2026-04-01

Sedimentation of Wufeng Formation-Longmaxi Formation Shale in Sichuan Basin

Zhou Xiaofeng¹, Yang Xuefeng², Li Xizhe³, Zhao Shengxian², Guo Wei³, Liang Pingping³

1. College of Petroleum Engineering, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China

2. Shale Gas Institute, Southwest Oil & Gasfield Company, PetroChina, Chengdu 610051, China

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

Abstract: The sedimentation of marine shale is still unclear. The 18 study units were selected from 9 core samples of the Wufeng-Longmaxi formations in 7 wells of the Sichuan Basin. The sedimentation of marine shale was analyzed in orderly connections such as core, optical microscopy, electron probe microscopy and MAPS technology. The results show that the marine shale is an alternation superposition of still-water sedimentation, deep-water gravity flow sedimentation and deep-water traction current sedimentation, with the difference in the petrological marks of each sedimentation. The typical mark of still-water sedimentation is the porous organic matter-clay aggregate. The typical mark of deep-water gravity flow sedimentation is the coarse-grained terrestrial quartz and shallow-water shell clastics suspended in deep-water fine-grained materials. The typical mark of deep-water traction current sedimentation is the porous organic matter. The radiolarian shales are the key for conducting marine sedimentary analysis. The combination of sedimentary environments and types is a reasonable constraint for explaining the occurrence and genesis of minerals and organic matter, as well as shale laminae. Fine reservoir evaluation based on sedimentation is an effective path for shale gas development. It is recommended to pay attention to the MAPS technology in the

基金项目: 中国石油天然气股份有限公司科技管理部项目(No.2021DJ1901).

作者简介: 周晓峰(1973—), 男, 讲师, 博士, 主要从事油气储层沉积成岩研究. ORCID:0009-0001-8063-311X. E-mail:zhouxf@cup.edu.cn

引用格式: 周晓峰, 杨学锋, 李熙喆, 赵圣贤, 郭伟, 梁萍萍, 2026. 四川盆地五峰组-龙马溪组页岩沉积作用. 地球科学, 51(7):2747-2772.

Citation: Zhou Xiaofeng, Yang Xuefeng, Li Xizhe, Zhao Shengxian, Guo Wei, Liang Pingping, 2026. Sedimentation of Wufeng Formation-Longmaxi Formation Shale in Sichuan Basin. *Earth Science*, 51(7):2747-2772.

analysis of shale sedimentation and reservoir evaluation.

Key words: marine shale; sedimentation; petrological evidence; Wufeng-Longmaxi formations; Sichuan Basin; unconventional petroleum sedimentology.

0 引言

海洋深水沉积作用主要包括静水沉积作用、深水重力流沉积作用和深水牵引流沉积作用,形成细粒沉积和粗粒沉积,粗粒沉积通常为优质储层并形成常规油气藏,细粒沉积既是常规油气藏的烃源岩又是非常规油气的载体(高振中,2006;施振生等,2024).深水沉积作用类型的研究历程与油气工业密切相关,深水粗粒沉积中发现油气藏及其巨大资源潜力促进了深水沉积理论体系的发展.深水重力流沉积的浊流理论在质疑与否定中被重新解释,如经典鲍马序列的正递变砂砾岩为典型浊流沉积,块状层理砂岩被重新解释为砂质碎屑流沉积,交错层理砂岩和平行层理砂岩被重新解释为深水牵引流沉积(Shanmugam,2013).Gao 和 Eriksson 发现第一例古生代深水牵引流沉积以来,国内外陆续发现了多例深水牵引流沉积并建立了多个沉积模式(高振中等,2006).静水沉积经常被深水重力流和深水牵引流改造,深水重力流和深水牵引流也相互改造沉积物,形成3种沉积交互叠置(高振中等,2006).综观以往的研究成果发现,深水重力流沉积和深水牵引流沉积的研究对象主要集中在粗粒沉积,以野外露头、岩心和手标本的观察与描述为主,辅以光学显微镜和电子显微镜观测,提取岩石颜色、沉积构造、矿物组构等关键岩石学证据,为沉积作用分析提供第一性资料.

细粒沉积是美国页岩革命后黑色页岩的常用代名词,这意味着石油天然气工业界的认知转变.黑色页岩曾经是烃源岩的代名词,重视分析有机质类型、有机质丰度、有机质成熟度等生成油气能力或潜力的参数.美国页岩革命引发全球页岩油气勘探开发的热潮,黑色页岩由传统烃源岩转变为源储一体的非常规油气载体,研究重点转变为有机质、矿物组分、孔隙等岩石学信息并重,重视有机孔的形成机制和控制因素,强调地质甜点和工程甜点一体化储层质量评价(刘成林等,2026).沉积岩的储层质量通常由沉积作用和成岩作用共同控制,其中沉积作用是内因,控制着成岩作用的类型、强度及方向(赵建华和金之钧,2021),因此,

开展沉积作用类型研究是寻找优质储层发育区和高效勘探开发页岩油气的前提条件.然而,页岩颗粒细且被有机质浸染,导致露头、岩心、手标本等总体呈黑色而缺乏岩石结构和构造信息;复杂的沉积作用叠加多样化的成岩作用,给通过光学显微镜和电子显微镜技术识别微纳矿物颗粒是碎屑还是成岩胶结物以及有机质是干酪根残余还是迁移有机质带来很大难度,进而难以量化岩石的组分和结构以及成岩作用特征,这些客观情况使得海相页岩深水沉积作用研究依然薄弱.

传统观点默认海相页岩为海洋水体表层富氧、深层缺氧环境的静水沉积,表层富氧水体初级生产力高,提供了充裕的有机质和内碎屑,深层缺氧水体有利于有机质保存,通常应用主量元素、微量元素、同位素等地球化学方法定量描述深层水体的氧化还原性质和有机质的富集规律以及生物硅的含量(王淑芳等,2014;邱振等,2021).但是,海相页岩不仅有丰富的浮游和游泳生物,也产出宏体底栖生物,加之生物化石及其碎片的定向性排列,说明海底存在周期性或间歇性的水动力条件(程立雪等,2013).卢斌等(2021)总结了水槽实验模拟页岩为深水牵引流沉积的研究进展,施振生等(2024,2025)依据岩石薄片鉴定沉积结构和构造类型认为四川盆地五峰组-龙马溪组页岩气甜点段为静水沉积、深水重力流沉积和深水牵引流沉积的交互叠置.

近年来氩离子抛光技术和纳米分辨率MAPS(Modular Automated Processing System)岩石图像数据体采集技术的引入,为页岩储层沉积作用分析提供了第一性资料,笔者研究团队通过纳米岩石证据在四川盆地五峰组-龙马溪组陆续发现了静水沉积(周晓峰等,2022a,2026a)、深水牵引流沉积(Zhou *et al.*,2024,2025)和深水重力流沉积(周晓峰等,2025).本文以四川盆地五峰组-龙马溪组页岩为研究对象,主要研究内容包括:(1)观测岩石学特征,清晰地描述矿物和有机质的赋存状态及相互关系;(2)开展岩石学表征,分析矿物和有机质的成因;(3)解析页岩的沉积成岩作用过程,消除“成岩过滤器”的影响,恢复沉积时期的原始面貌,归纳出各种沉积作用的岩石学标志.五峰组-龙马

溪组页岩分布在包括四川盆地在内的中国华南地区,而且同时代的页岩也遍及北非和阿拉伯地区(刘成林等,2026),因此,本文的研究方法和成果不仅助推中国乃至全球海相页岩油气的高效勘探开发,也有助于发展和完善细粒沉积学理论.

1 地质背景

四川盆地在经历晋宁运动成为稳定的地台后,先后受到多期构造运动的改造,经历了克拉通盆地、前陆盆地和断陷盆地等多个构造演化阶段,形成具有“周缘活动、内部稳定、晚期和早期构造解耦”独特发育过程和特征的叠合盆地(刘树根等,2018).晚奥陶世临湘期至五峰期,四川盆地由浅水陆棚演化为深水陆棚,沉积物由泥灰岩相变为黑色页岩.晚奥陶世末期,在火山频发、气温骤冷、生物绝灭等地质事件作用下,盆地发育一套厚度不足 1 m 但分布广泛的含介屑页岩,成为上奥陶统五峰组-下志留统龙马溪组的界线地层观音桥层(周晓峰等,2025).早志留世,水体快速变深,在水体表层富氧初级生产力高、深层缺氧有利于有机质保存(施振生和周天琪,2024)及深水牵引流频发(Zhou *et al.*, 2024, 2025)的深水陆棚环境,沉积了龙马溪组黑色页岩(图 1a).从晚奥陶世临湘期至早志留世龙马溪期,四川盆地经历了水体由浅变深再变

浅的完整旋回,在五峰组-龙马溪组界限附近形成了总有机碳含量大于 2%、厚度 20~80 m 的黑色页岩(图 1b),为页岩气提供了充裕的物质基础.

四川盆地五峰组-龙马溪组总体经历了两次抬升夹一次沉降(刘树根等,2018).志留纪末期,五峰组-龙马溪组埋藏深度超过 1 500 m,地温超过 60 ℃,干酪根生烃.泥盆纪-中二叠世,四川盆地持续地缓慢抬升,干酪根生烃中断.晚二叠世-白垩纪,盆地快速沉降,五峰组-龙马溪组最大埋藏深度超过 6 500 m,有机质过成熟,形成页岩气(周晓峰等,2026a).有机质热演化过程划分为 4 个阶段,依次为沉积有机质(简称“沉有机质”)经干酪根、油前沥青、固体沥青和石油转化为焦沥青和烃气(图 2).新生代,四川盆地多阶段隆升过程普遍具有 1 000~5 000 m 地表剥蚀,目前五峰组-龙马溪组埋藏深度介于 1 500~5 500 m,断、褶和隆、凹相间,致使页岩气差异富集(杨锐等,2025).

2 研究思路

在四川盆地威远地区和泸州地区 7 口井五峰组-龙马溪组共采集 9 块岩心样品,其中 4 块样品属于五峰组(2 块样品属于观音桥层),5 块样品属于龙马溪组(表 1 和图 3),采样井位见图 1.S-1(图 3a)和 S-2(图 3b)含丰富粗粒石英和介屑,S-3 发育 2 个厚度分

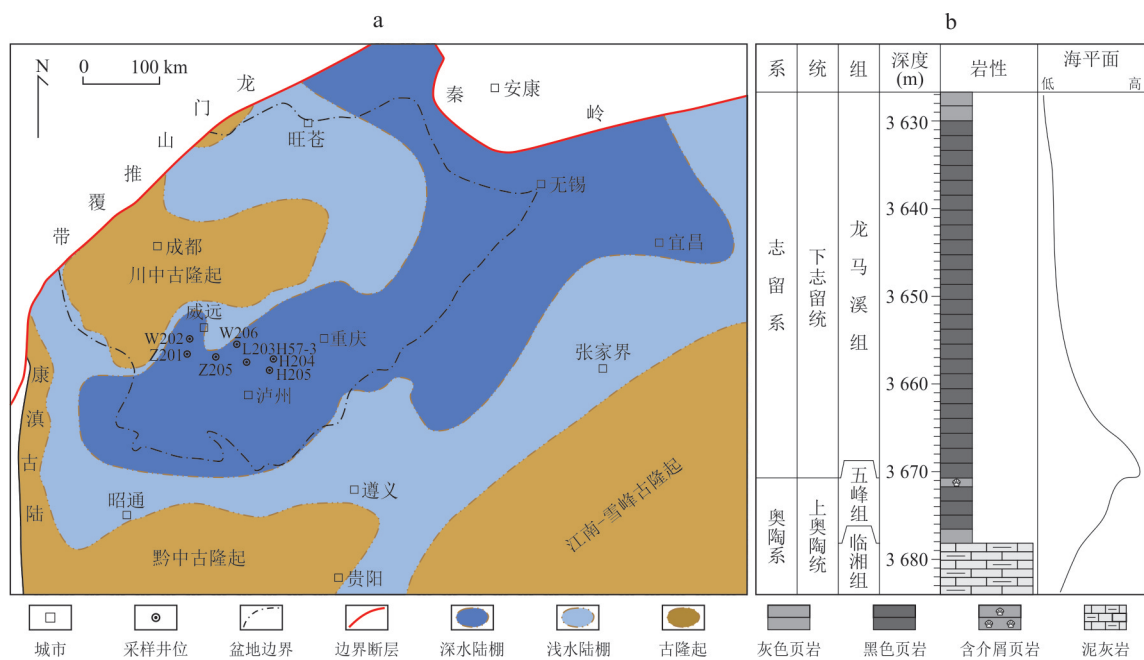


图 1 四川盆地及邻区五峰组-龙马溪组沉积相及地层柱状图(据周晓峰等,2026a 修改)

Fig.1 Sedimentary facies map and stratigraphic column of the Wufeng-Longmaxi formations in the Sichuan Basin and its peripheral area(modified from Zhou *et al.*, 2026a)

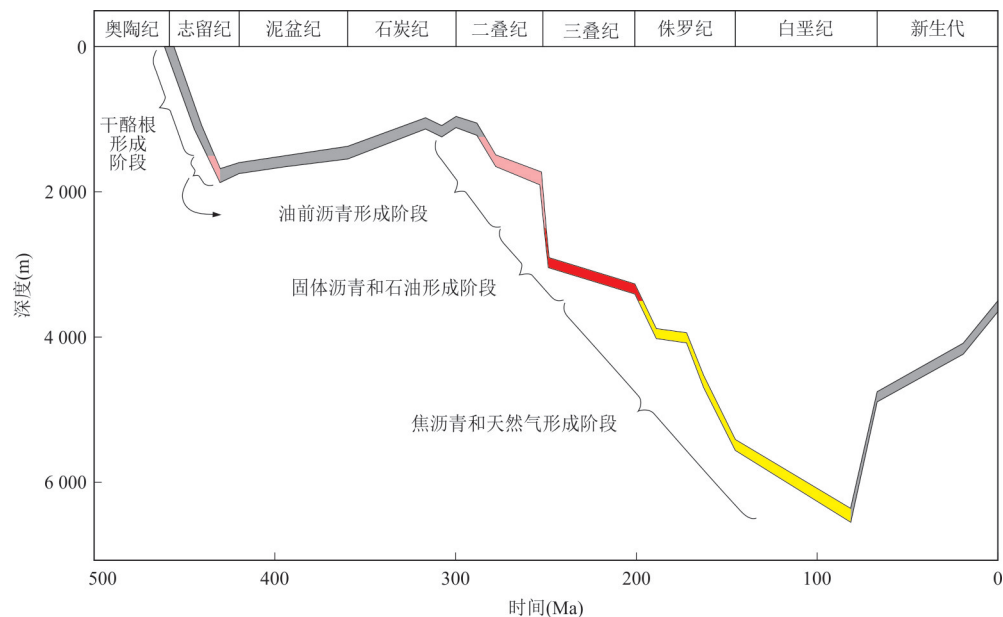


图2 四川盆地五峰组-龙马溪组埋藏史-有机质热演化史(据周晓峰等,2026a)

Fig.2 Burial history and thermal evolution history of the organic matters in the Wufeng-Longmaxi formations of the Sichuan Basin (modified from Zhou *et al.*, 2026a)

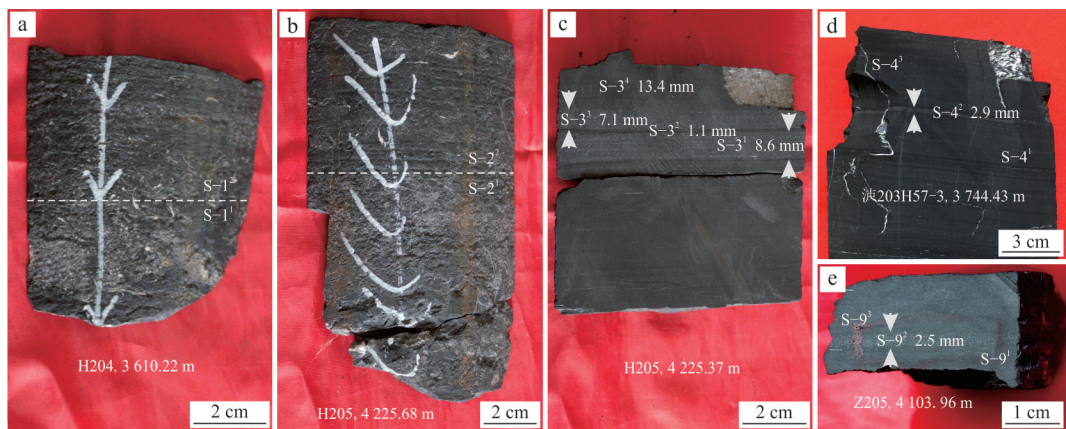


图3 四川盆地五峰组-龙马溪组页岩岩心典型特征

Fig.3 Typical features of the shale cores in the Wufeng-Longmaxi formations of the Sichuan Basin
a~b. 白色虚线之下页岩含丰富粗粒石英碎屑,之上页岩含丰富介屑;c~e. 放射虫纹层(箭头之间)

别为 8.6 mm (S-3¹) 和 7.1 mm (S-3³) 含放射虫黑色页岩纹层(图 3c), S-4 发育 1 个厚度 2.9 mm 含放射虫黑色页岩纹层 (S-4²) (图 3d), S-9 发育 1 个厚度 2.5 mm 含放射虫黑色页岩纹层 (S-9²) (图 3e), 其他岩样均为无任何组构的黑色页岩.

将含丰富粗粒碎屑的 S-1、S-2、S-3、S-4、S-9 划归第一岩样组, 其他黑色页岩划归第二岩样组. 岩心观察的基础上, 第一岩样组通过光学显微镜、电子探针显微镜和 MAPS 技术的有序衔接开展岩石学表征, 第二岩样组直接应用 MAPS 技术采集纳米分辨率的岩石图像数据体开展岩石学表征. MAPS 技术

是将页岩样品的氩离子抛光面全部或部分划分为一系列规整网格, 对每一个网格扫描成像, 对所有网格的图像进行拼接, 形成一幅二维大视域扫描图像数据体, 在一定的范围内连续地放大或缩小图像数据体寻找和发现典型纳米岩石图像(周晓峰等, 2022a, 2025, 2026a, 2026b; Zhou *et al.*, 2024, 2025).

S-1、S-2 和 S-3 岩样磨制宽×高为 5 cm×7 cm 的岩石薄片, S-4 和 S-9 岩样磨制宽×高为 2.5 cm×5 cm 的岩石薄片, 含丰富粗粒碎屑的页岩纹层尽可能位于岩石薄片的中部. 通过光学显微镜和电子探针显微镜观测岩石学特征, 在 S-2 岩样选择含丰富

表 1 四川盆地五峰组-龙马溪组页岩样品基本信息				
Table 1 Primary information of the shale samples in the Wufeng-Longmaxi formations of the Sichuan Basin				
井名	层位	深度(m)	样品编码	岩心描述
H204	五峰组	3 610.22	S-1 ²	介屑丰富的黑色页岩
	观音桥层		S-1 ¹	石英碎屑丰富的黑色页岩
H205	五峰组	4 225.68	S-2 ²	介屑丰富的黑色页岩
	观音桥层		S-2 ¹	石英碎屑丰富的黑色页岩
	龙马溪组	4 225.37	S-3 ⁴	黑色页岩
			S-3 ³	7.1 mm 含放射虫黑色页岩纹层
			S-3 ²	1.1 mm 黑色页岩纹层
			S-3 ¹	8.6 mm 含放射虫硅质页岩纹层
L203H57-3	五峰组	3 744.43	S-4 ³	黑色页岩
			S-4 ²	2.9 mm 含放射虫黑色页岩纹层
			S-4 ¹	黑色页岩
	龙马溪组	3 743.76	S-5	黑色页岩
W202	龙马溪组	2 570.03	S-6	黑色页岩
W206	龙马溪组	3 791.84	S-7	黑色页岩
Z201	龙马溪组	3 666.21	S-8	黑色页岩
Z205	五峰组	4 103.96	S-9 ³	黑色页岩
			S-9 ²	2.5 mm 含放射虫黑色页岩纹层
			S-9 ¹	黑色页岩

粗粒石英的 S-2¹ 和含丰富浅水介屑的 S-2² 各采集 1 个长×宽×厚为 1 cm×1 cm×0.5 cm 的样品制作氩离子抛光片;在 S-3、S-4 和 S-9 岩样各采集 1 个长×宽×厚为 1 cm×1 cm×0.5 cm 的样品制作氩离子抛光片,含放射虫页岩纹层位于氩离子抛光片中部.其他黑色页岩岩样分别采集 1 个长×宽×厚为 1 cm×1 cm×0.5 cm 的样品制作氩离子抛光片.在 S-3 的氩离子抛光片中,将 S-3¹、S-3²、S-3³、S-3⁴ 分别作为独立单元,各采集 1 个宽×高为 400 μm×400 μm、分辨率为 4 nm MAPS 岩石图像数据体(4 nm MAPS);在 S-4 和 S-9 氩离子抛光片中,将 S-4¹、S-4²、S-4³ 和 S-9¹、S-9²、S-9³ 分别作为独立单元,各采集 1 个宽×高为 400 μm×400 μm 的 4 nm MAPS;其他岩样的氩离子抛光片分别采集 1 个宽×高为 400 μm×400 μm 的 4 nm MAPS.岩心和光学显微镜观察 S-1 和 S-2 粗粒石英和介屑以及 S-3¹、S-3³、S-4²、S-9² 放射虫硅壳(简称“硅壳”),电子探针显微镜波谱图像和元素面扫描图像观测粒径大于 15 μm 矿物,4 nm MAPS 能够清晰地观测微纳矿物、有机质和有机孔及相互关系.

岩石薄片的磨制由北京天和信矿业技术有限公司完成,氩离子抛光在中国石油勘探开发研究院廊坊分院国家能源页岩气研究和开发中心完成,氩离子抛光仪型号:Fischione Model 1060.岩石薄片

和氩离子抛光片制作过程中,样品的顶、底与地下自然状态保持一致.岩石薄片的镜下观察在中国石油大学(北京)油气资源与探测国家重点实验室完成,光学显微镜型号为 Nikon LV4500POL.波谱图像和元素面扫描图像采集在清华大学材料实验室完成,电子探针显微镜型号为 JXA-8230.4 nm MAPS 采集在中国石油勘探开发研究院廊坊分院国家能源页岩气研究和开发中心完成,扫描电镜型号:Fei Helios 650.镜下观察和采集图像或图像数据体时,保持样品处于自然状态,确保采集到的矿物和有机质的赋存状态仅仅是自然现象的放大,这有助于观测地层条件下页岩岩石学特征和压实作用信息.

采用“相面法”估算矿物、有机质及孔隙的体积百分含量.对于含粗粒碎屑颗粒的 S-2¹、S-2²、S-3¹、S-3³、S-4²、S-9²,首先根据光学显微镜和电子探针显微镜鉴定粗粒碎屑的含量,然后依据 4 nm MAPS 确定细粒矿物和有机质以及有机孔的含量.对于 S-1¹ 和 S-1² 细粒矿物和有机质及有机孔的含量,参考 S-2¹ 和 S-2².其他黑色页岩直接通过离线版图像编辑器(ATLAS™ BROWSER-BASED VIEWER)鉴定 4 nm MAPS 矿物和有机质及有机孔的含量,以能够清晰观察蜂窝状介孔有机质为基本条件,以计算机屏幕的大小作为约束,把 400 μm×400 μm 的 4 nm MAPS 划分为 200 个宽×高为 40 μm×20 μm

的网格,采用“相面法”估算每个网格中矿物、有机质和有机孔的面积,不同网格的相同岩石单元的面积相加得到其在 4 nm MAPS 中所占面积,该面积与 4 nm MAPS 面积之比的百分数视为各岩石单元在页岩中的体积百分含量.在 MAPS 岩石图像数据体中,陆源石英和长石的衬度相似,难以区分,笼统地估算为陆源石英.莓状黄铁矿的赋存状态可以辅助鉴别深水沉积作用类型,因此,将含量不足 0.1% 的莓状黄铁矿的含量视为 0.1% (含量低于 0.1% 的矿物未做统计).

3 岩石学特征解析页岩形成过程

通过岩心、光学显微镜、电子探针显微镜、

MAPS 技术的有序衔接,观测岩石学特征,开展岩石学表征,解析四川盆地五峰组-龙马溪组海相页岩为静水沉积(图 4~图 8)、深水重力流沉积(图 9~图 11)和深水牵引流沉积(图 12~图 14).其中, S-4¹、S-4²、S-4³、S-5、S-7、S-9¹、S-9²、S-9³ 等为静水沉积,岩相为硅岩和硅质页岩; S-1¹、S-1²、S-2¹、S-2² 等为深水重力流沉积,岩相为硅质页岩; S-3¹、S-3²、S-3³、S-3⁴、S-6、S-8 等为深水牵引流沉积,岩相为硅岩(表 2 和图 15).

3.1 静水沉积作用分析

S-4² 为含放射虫硅岩和 S-9² 为含放射虫硅质页岩,其他为无任何组构的黑色硅岩和硅质页岩.以 S-9 为例,详细描述 S-9² 及 S-9¹ 和 S-9³ 岩石学特征,重点寻找指示沉积环境的岩石学

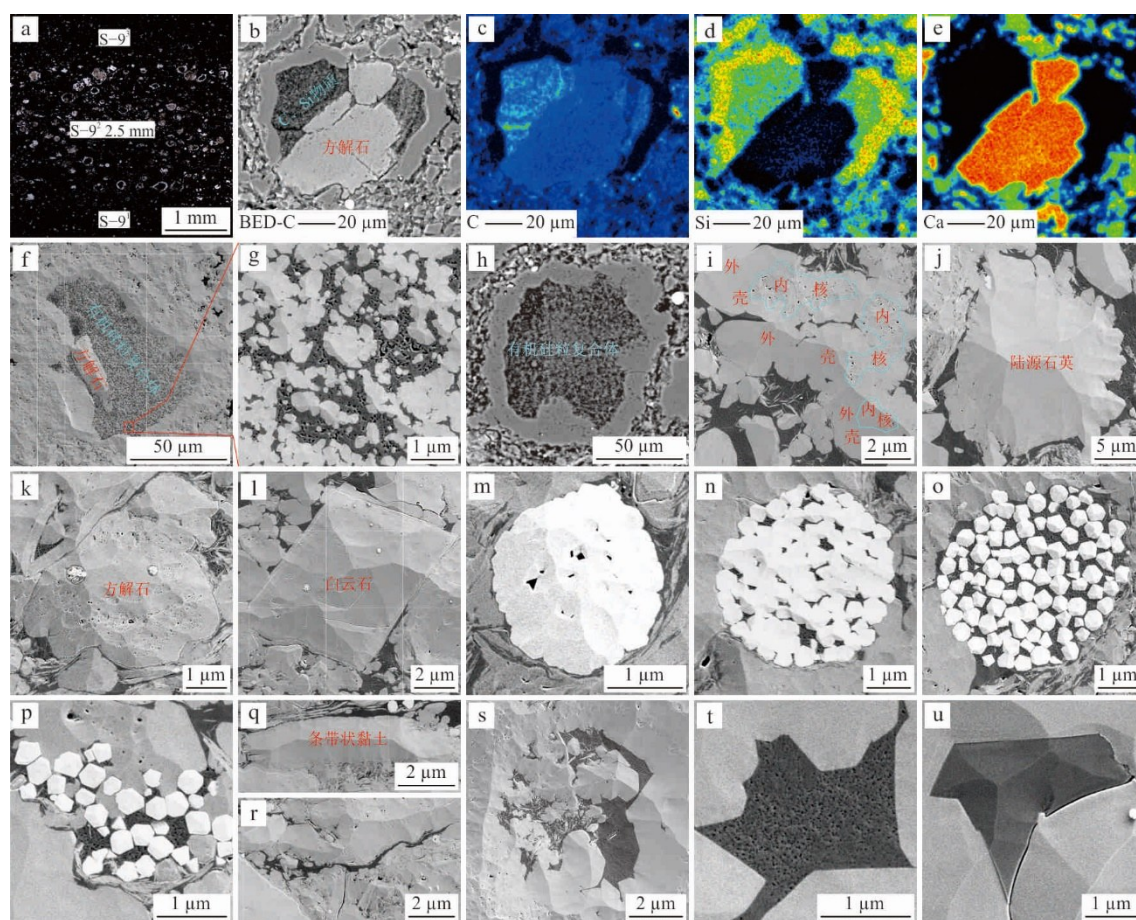


图 4 四川盆地五峰组 S-9² 含放射虫硅岩层典型岩石学特征

Fig. 4 Typical petrological features of the radiolarian silicalite coded as S-9² in the Wufeng Formation of the Sichuan Basin

a. S-9² 亮纹层及 S-9¹、S-9³ 暗纹层,硅壳呈亮色环带,硅壳腔黑色、黄色、灰色、灰白色,单偏光;b. 残缺硅壳,保存较完整硅壳腔充填物,波谱图像;c~e. 图 b 的 C、Si、Ca 元素面扫描图像,颜色由黑色经蓝、绿、黄至红色表示元素含量逐渐升高;f. 完整硅壳具有 3 个圈层结构,内、外圈层缺乏孔隙,中间圈层富孔隙,硅壳腔充填有机硅粒复合体和方解石;g. 富孔隙有机硅粒复合体;h. 完整硅壳,硅壳腔充填有机硅粒复合体;i. “内核外壳”结构的壳屑,内核富孔隙,外壳无孔隙;j. 陆源石英碎屑,缺乏孔隙;k. 不规则方解石;l. 菱形白云石;m. 过度生长的莓状黄铁矿;n. 晶粒线状接触的莓状黄铁矿;o. 晶粒点状接触的莓状黄铁矿;p. 变形的晶粒漂浮的莓状黄铁矿;q. 条带状黏土;r. 条带状无孔隙纯净有机质;s. 硅质骨架颗粒间富孔隙有机硅粒复合体、富孔隙和无孔隙纯净有机质,据周晓峰等(2022a);t. 团块状富孔隙纯净有机质;u. 团块状无孔隙纯净有机质

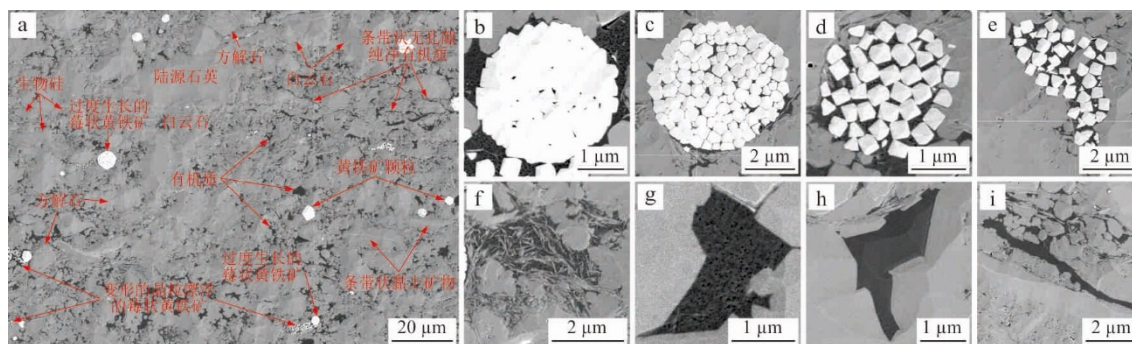
图5 四川盆地五峰组 S-9¹硅岩和 S-9³硅质页岩典型岩石学特征

Fig.5 Typical petrological features of the silicalite coded as S-9¹ and the siliceous shale coded as S-9³ in the Wufeng Formation of the Sichuan Basin

a. S-9¹岩石学特征全貌,生物硅和陆源石英、方解石、白云石、黄铁矿等组成岩石骨架,黏土和有机质分布在骨架间;b. 过度生长的莓状黄铁矿;c. 晶粒线状接触的莓状黄铁矿;d. 晶粒点状接触的莓状黄铁矿;e. 变形的晶粒漂浮的莓状黄铁矿;f. 团块状富孔隙有机黏粒复合体;g. 团块状富孔隙纯净有机质;h. 团块状无孔隙纯净有机质;i. 条带状无孔隙纯净有机质

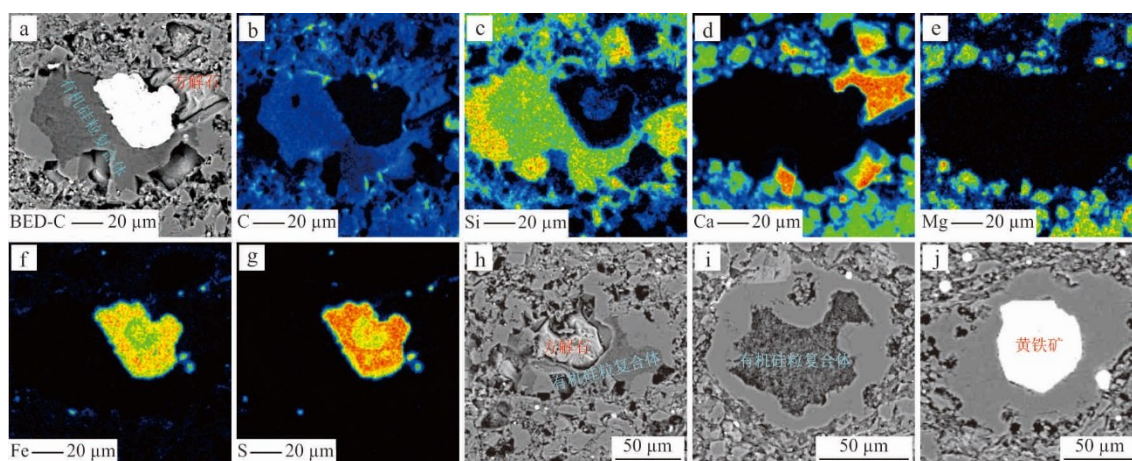
图6 四川盆地五峰组 S-4²含放射虫硅岩中硅壳腔充填物典型岩石学特征

Fig.6 Typical petrological features of the fillings in the siliceous shells' cavities from the radiolarian silicalite coded as S-4² in the Wufeng Formation of the Sichuan Basin

a. 残缺硅壳腔方解石、有机硅粒复合体和黄铁矿,波谱图像;b~g. 图a的C、Si、Ca、Mg、Fe、S元素面扫描图像,颜色由黑色经蓝、绿、黄至红色表示元素含量逐渐升高;h. 残缺硅壳腔方解石和有机硅粒复合体;i. 完整硅壳腔有机硅粒复合体;j. 完整硅壳腔黄铁矿

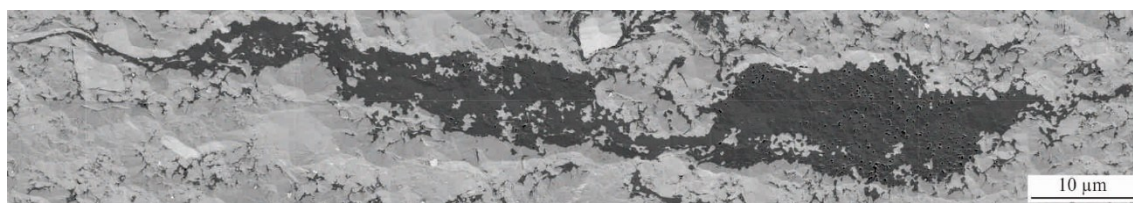


图7 四川盆地龙马溪组 S-7 硅岩中笔石典型岩石学特征

Fig.7 Typical petrological features of the graptolite from the silicalite coded as S-7 in the Longmaxi Formation of the Sichuan Basin

信息,进而开展静水沉积作用分析.

3.1.1 静水沉积岩石学特征 岩心切面上,S-9²纹层中放射虫化石呈密集的笔尖大小白色斑点(图3e).光学显微镜下,硅壳为黑色背景中的亮色环带,

宽度一般10~50 μm;硅壳腔黑色、黄色、灰色、灰白色等,直径分布在40~120 μm之间(图4a).从波谱图像(图4b)和元素面扫描图像(图4c~4e)可以看出,硅壳腔充填方解石和不能分辨的细粒C、Si物质.从纳

沉积作用现象		沉积作用过程划分				子过程 同生成岩	埋藏成岩子过程（有机质演化过程）				烃气
沉积作用现象		沉降阶段	水体沉降子过程			子过程 同生成岩	成岩阶段 浅埋藏	成岩阶段 中埋藏早期	成岩阶段 中埋藏晚期	成岩阶段 深埋藏	烃气
			上部亚阶段	中部亚阶段	下部亚阶段						
微生物硅、硅壳沉降											
方解石沉降											
硅壳腔充填方解石											
陆源石英、长石和黏土沉降											
有机黏粒复合体											
生物硅溶解—沉淀											
方解石溶解											
硅壳腔方解石溶孔有机硅粒复合体											
硅壳腔方解石溶孔黄铁矿											
过度生长莓状黄铁矿沉降											
晶粒线状接触莓状黄铁矿沉降											
晶粒点状接触莓状黄铁矿沉降											
晶粒漂浮状莓状黄铁矿沉降											
菱形白云石											
干酪根硅粒复合体											
干酪根黏粒复合体											
油前沥青硅粒复合体											
油前沥青黏粒复合体											
油前沥青											
固体沥青石油硅粒复合体											
固体沥青石油											
生烃增压缝充填石油											
富孔隙焦沥青黏粒复合体											
富孔隙焦沥青硅粒复合体											
无孔隙焦沥青化石油											
生烃增压缝充填无孔隙焦沥青化石油											

注：虚线表示深层上部稀氧水体沉积物中黄铁矿形成于水—沉积物界面同生成岩子过程

图 8 四川盆地五峰组-龙马溪组静水沉积形成过程

Fig.8 Still-water sedimentation process in the Wufeng-Longmaxi formations of the Sichuan Basin

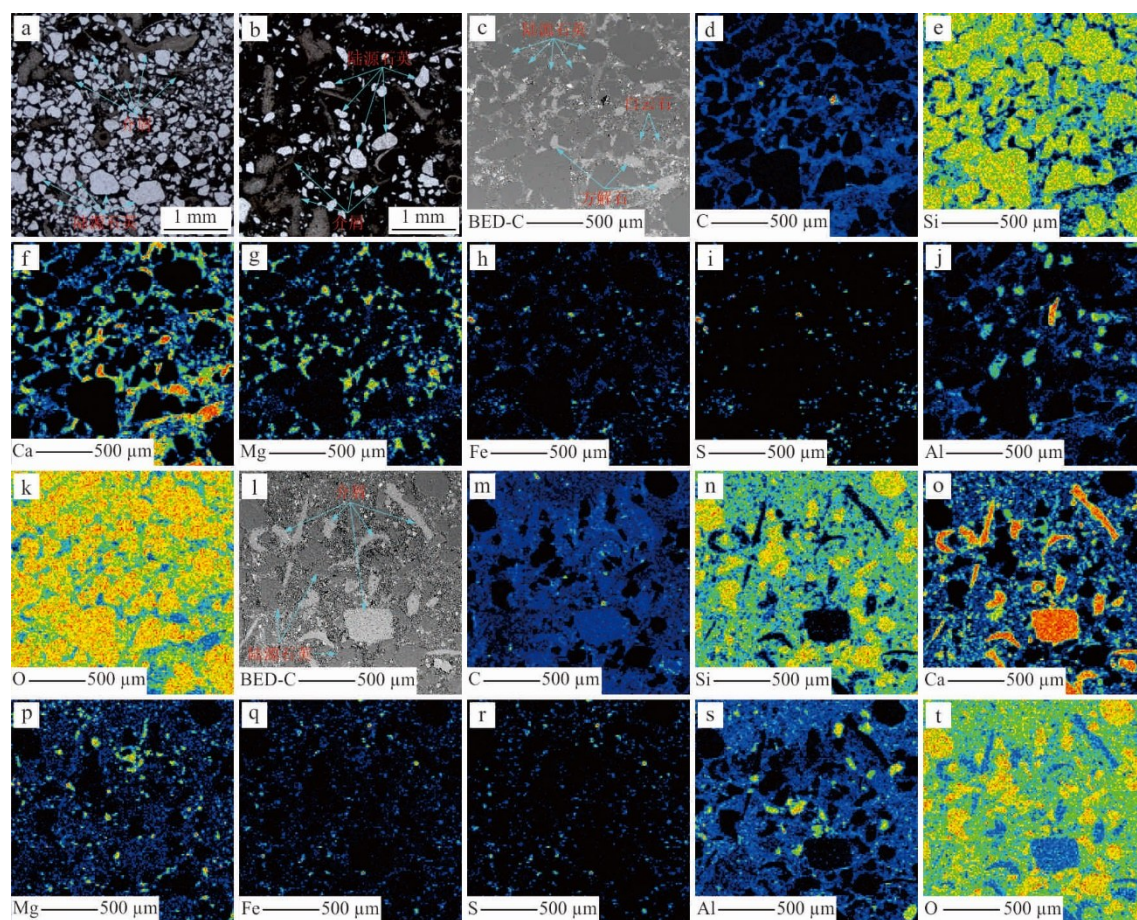


图9 四川盆地五峰组 S-1 和 S-2 硅质页岩光学显微镜和电子探针显微镜图像

Fig.9 Optical and electron probe microscope images of the siliceous shales coded as S-1 and S-2 in the Wufeng Formation of the Sichuan Basin

a. 粗粒碎屑漂浮在黑色细粒物质中,粗粒陆源石英碎屑的含量高于粗粒浅水介屑的含量,单偏光;b. 粗粒碎屑漂浮在黑色细粒物质中,粗粒浅水介屑的含量高于粗粒陆源石英碎屑的含量,单偏光;c. 粗粒陆源石英碎屑含量高,波谱图像;d~k. 图c的C、Si、Ca、Mg、Fe、S、Al、O元素面扫描图像;l. 粗粒陆源石英碎屑和浅水介屑含量偏低,波谱图像;m~t. 图l的C、Si、Ca、Mg、Fe、S、Al、O元素面扫描图像.图d至图k和图m至图t中,颜色由黑色经蓝、绿、黄至红色表示元素含量逐渐升高;在Si、O元素面扫描图中,绿、黄、红色区域为石英;在Ca元素面扫描图中,红色区域为方解石;在Mg元素面扫描图中,绿、黄、红色区域为白云石

米岩石图像可知,细粒C、Si物质为有机质和硅质颗粒的混合物(简称“有机硅粒复合体”)(图4f、4g).经光学显微镜、电子探针和4 nm MAPS联用发现,光学显微镜下硅壳腔黑色为有机质含量过高的有机硅粒复合体和/或黄铁矿,黄色为有机质和硅粒含量相近的有机硅粒复合体,灰色为硅粒含量过高的有机硅粒复合体,灰白色为方解石.根据硅壳保存程度,放射虫化石依次划分为完整硅壳、残缺硅壳和壳屑,完整硅壳的放射虫骨骼至少保存三分之二、腔内充填物基本完整(图4f、4h),残缺硅壳的放射虫骨骼保存不足三分之二、腔内充填物保存较完整或不完整(图4b),壳屑是无腔体的放射虫骨骼残片(图4i).硅壳有3个圈层(图4f),中间圈层为富孔隙放射虫硅质骨骼,内圈层为无孔隙非晶质二氧化

硅次生加大边,外圈层为无孔隙石英次生加大边(周晓峰等,2026b).壳屑具有“内核外壳”结构(图4i),内核为富孔隙放射虫硅质骨屑,外壳为石英次生加大边(周晓峰等,2026b).硅壳、壳屑、陆源石英(图4j)、方解石(图4k)、白云石(图4l)、莓状黄铁矿(图4m~4p)等组成含放射虫硅质页岩的骨架,黏土、有机质和黏土的混合物(简称“有机黏粒复合体”)和无杂质的有机质(简称“纯净有机质”)分布在骨架间(图4q~4u).黏土以条带状或有机黏粒复合体的形式出现,条带状黏土通常夹在数个矿物颗粒之间(图4q),有机黏粒复合体为团块状且富含机孔(图4s).纯净有机质进一步划分为富孔隙纯净有机质(图4s、4t)和无孔隙纯净有机质,无孔隙纯净有机质再进一步细分为团块状纯净有机质(图4s、4u)

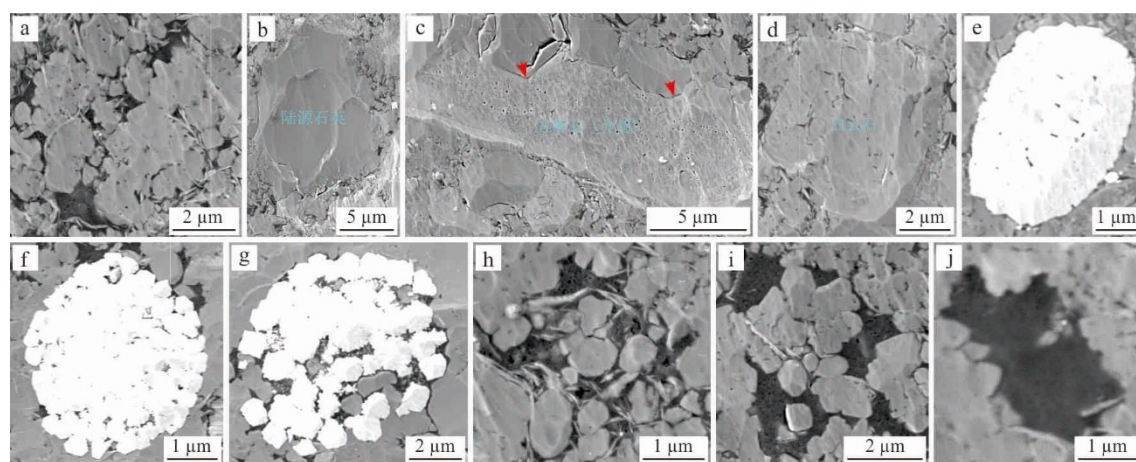


图 10 四川盆地五峰组 S-2 硅质页岩细粒物质的典型纳米岩石图像

Fig.10 Typical nanoscale petrological images of fine grains from the siliceous shale coded as S-2 in the Wufeng Formation of the Sichuan Basin

a. 具有孔隙的泥级石英的聚合体间充填富孔隙有机黏粒复合体; b. 陆源石英碎屑颗粒; c. 方解石(介屑)压溶现象明显(红色箭头); d. 边缘受损的菱形白云石; e. 过度生长的莓状黄铁矿; f. 强烈压溶的晶粒线状接触的莓状黄铁矿; g. 变形的莓状黄铁矿; h. 富孔隙有机黏粒复合体; i. 富孔隙纯净有机质; j. 无孔隙纯净有机质

和条带状纯净有机质(图 4r). 图 4s 中硅质骨架颗粒间富孔隙有机黏粒复合体、富孔隙纯净有机质和无孔隙纯净有机质的详细信息见周晓峰等(2022a). 富孔隙有机黏粒复合体系沉积有机质和黏土的混合物(简称“沉有机黏粒复合体”)热演化的原地产物, 富孔隙纯净有机质为焦沥青化迁移油前沥青, 无孔隙纯净有机质为焦沥青化迁移石油(周晓峰等, 2022a, 2026a). 由表 2 可知, S-9² 中生物硅、陆源石英、方解石、白云石、黏土、黄铁矿、富孔隙有机硅粒复合体、富孔隙有机黏粒复合体、富孔隙纯净有机质、无孔隙纯净有机质的体积百分含量依次为 58.7%、4.1%、13.1%、5.2%、6.1%、0.6%、4.2%、5.1%、2.1%、0.8%.

S-9¹ 硅岩和 S-9³ 硅质页岩的岩石学特征相似, 生物硅、陆源石英、方解石、白云石、莓状黄铁矿等组成岩石骨架, 黏土、有机黏粒复合体和纯净有机质分布在骨架间(图 5). 由表 2 可知, S-9¹ 和 S-9³ 中生物硅、陆源石英、方解石、白云石、黏土、黄铁矿、富孔隙有机黏粒复合体、富孔隙纯净有机质、无孔隙纯净有机质的体积百分含量分别为 60.1%、4.8%、15.4%、6.3%、4.6%、0.6%、5.7%、1.8%、0.7% 和 55.6%、5.6%、17.6%、8.2%、3.9%、0.6%、4.9%、2.3%、1.3%.

S-4² 和 S-9² 硅壳和壳外岩石学特征相似, 但硅壳腔充填物有所不同. S-9² 硅壳腔充填有机硅粒复合体和方解石(图 4b~4f)或有机硅粒复合体(图

4h), S-4² 硅壳腔充填方解石、有机硅粒复合体和黄铁矿(图 6a~6g)或方解石和有机硅粒复合体(图 6h)或有机硅粒复合体(图 6i)或黄铁矿(图 6j). 由表 2 可知, S-5 和 S-7 方解石含量小于 5%, S-4¹、S-4²、S-4³ 方解石含量分布在 5%~10% 之间, S-9¹、S-9²、S-9³ 方解石含量分布在 10%~20% 之间.

S-7 发现笔石化石, 呈近水平条带状有机质且含有少量石英、黏土等杂质, 富孔隙且分布非均质性强; 围岩压实作用弱、笔石体宽度大的微区, 孔隙密度大且具有三角形或不规则形貌; 围岩压实作用强、笔石体窄的微区, 缺乏孔隙(图 7). 笔石是奥陶系—志留系的标准生物化石之一, 在黑色页岩新鲜断面笔石发光, 风化过后笔石变成白色, 极其醒目. 笔石的有机成分是几丁质或胶原蛋白质, 类似Ⅲ型干酪根, 生烃潜力有限, 有机孔主要是笔石的原有生物组织孔在成岩过程中扩容形成(席斌斌等, 2023), 差异压实作用增加了孔隙分布的非均质性.

3.1.2 静水沉积形成过程 残缺硅壳腔方解石和有机硅粒复合体(图 4b 和图 6h)或方解石、有机硅粒复合体和黄铁矿(图 6a)指示, 这些充填物形成于水—沉积物界面之上, 即硅壳沉降阶段. 前期工作(周晓峰等, 2026b)发现, 充填方解石溶解孔隙的有机硅粒复合体系微生物及其诱导形成的硅质微粒, 这表明有机硅粒复合体形成于含一定溶解氧的海洋水体. 黄铁矿是缺氧硫化水体淀出的代表性矿物(张光荣等, 2020), 这标志着硅壳腔黄铁矿形成于

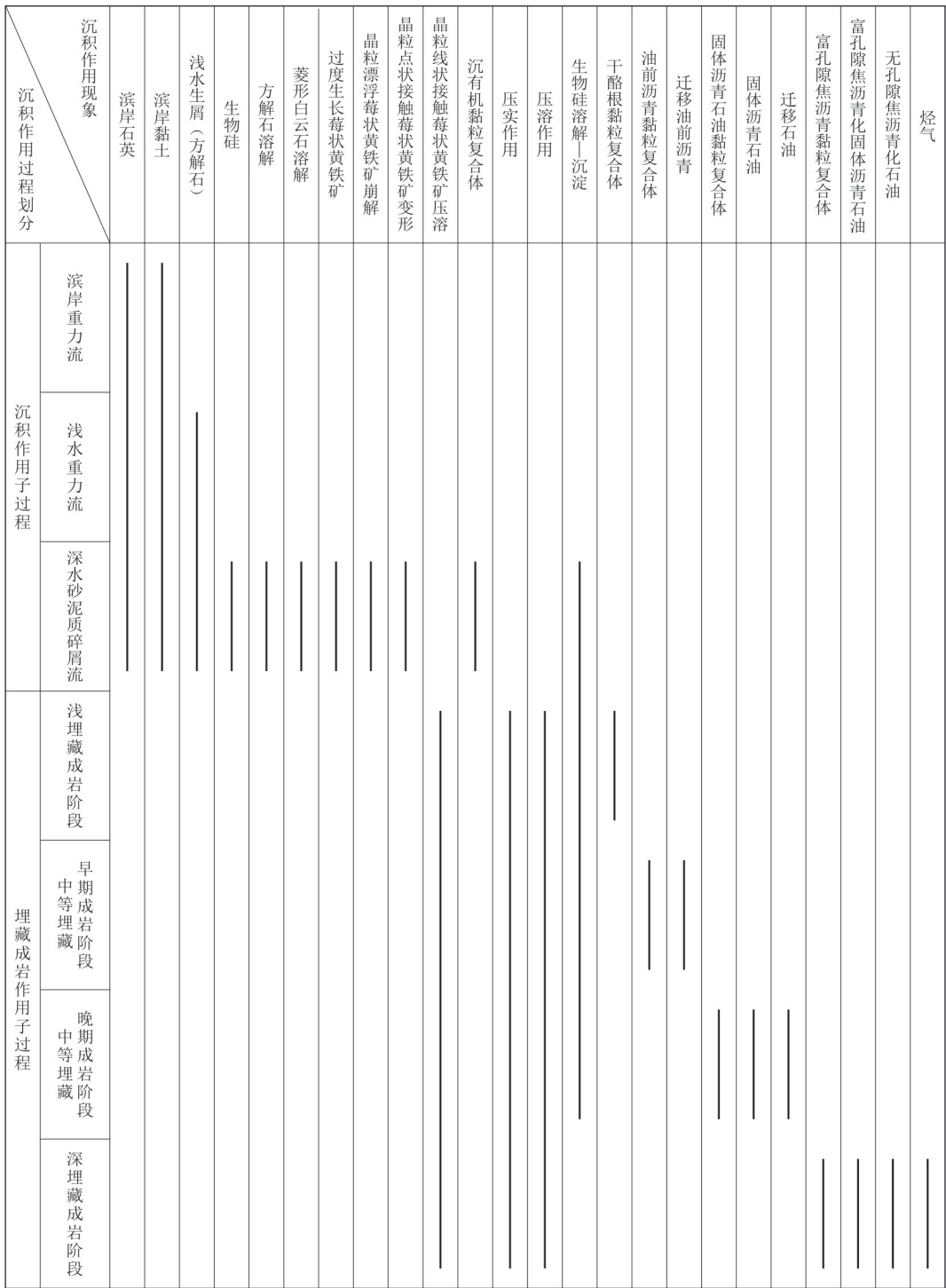


图 11 四川盆地五峰组-龙马溪组重力流沉积作用过程(据周晓峰等,2025)

Fig.11 Gravity flow sedimentation process in the Wufeng-Longmaxi formations of the Sichuan Basin (after Zhou *et al.*, 2025)

缺氧硫化水体. 岩石学特征解析可知, 有机硅粒复合体的形成时间早于黄铁矿, 且它们都充填方解石溶解孔隙.

硅壳腔方解石为海洋表层分泌钙碳酸盐微生物新陈代谢的产物(周晓峰等, 2022b, 2026b). 方解石沉降过程中发生的最显著变化就是溶解(肖开迅

等, 2024), 碳酸盐补偿深度(Carbonate Compensate Depth, CCD)、碳酸盐溶跃深度(Carbonate Lyso-cline Depth, CLD)、碳酸盐饱和深度(Carbonate Sat-urability Depth, CSD)是研究方解石溶解的 3 个重要深度界面(周晓峰等, 2022b). CSD 是钙碳酸盐从饱和和变为不饱和和方解石明显溶解的转折深度. CLD

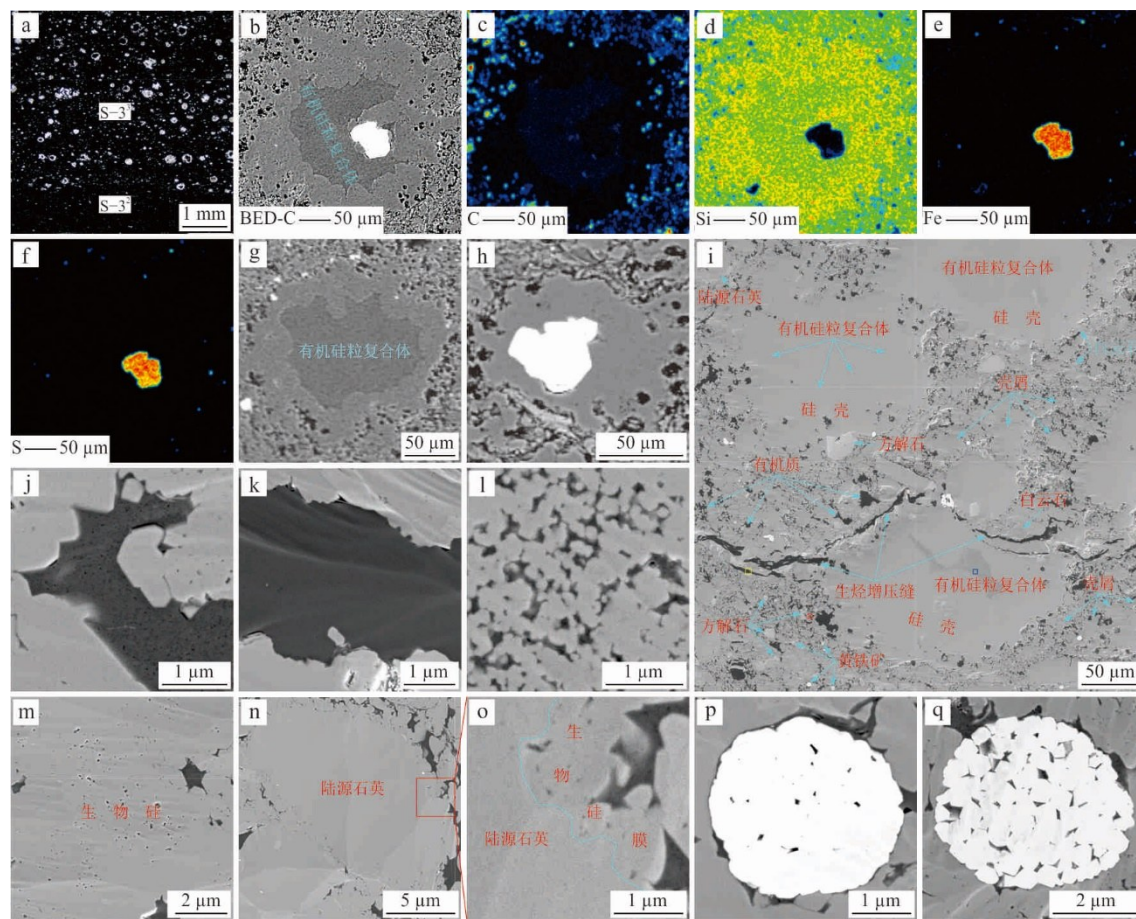


图 12 四川盆地龙马溪组 S-3¹ 和 S-3³ 含放射虫硅岩典型岩石学特征

Fig.12 Typical petrological features of the radiolarian silicalites coded as S-3¹ and S-3³ in the Longmaxi Formation of the Sichuan Basin

a. S-3² 黑色硅岩纹层和 S-3³ 含放射虫硅岩纹层, 单偏光; b. 硅壳腔有机硅粒复合体和黄铁矿, 波谱图像; c~f. 图 b 的 C、Si、Fe、S 元素面扫描图像, 颜色由黑色经蓝、绿、黄至红色表示元素含量逐渐升高; g. 硅壳腔有机硅粒复合体; h. 硅壳腔黄铁矿; i. 含放射虫硅岩纳米岩石图像, 红框为图 j 的位置, 黄框为图 k 的位置, 蓝框为图 l 的位置; j. 骨架间富孔隙纯净有机质; k. 生烃增压缝充填无孔隙纯净有机质; l. 硅壳腔有机质镶嵌在硅质微粒中; m. 生物硅发育孔隙; n~o. 陆源石英碎屑表面的泥级生物硅膜; p. 过度生长的莓状黄铁矿; q. 晶粒线状接触的莓状黄铁矿

是方解石溶解的突跃面, 其上方解石溶解弱, 其下方解石溶解量大. CCD 似陆地雪线, 其以浅的海底沉积物富方解石, 其以深的海底沉积物贫方解石, 实际操作通常视方解石含量 2%、或 10%、或 20% 为 CCD (肖开迅等, 2024). 本次研究以页岩中方解石含量 5% 作为 CCD.

根据硅壳腔充填物提供的海洋环境信息, 结合前期工作 (周晓峰等, 2022a, 2022b, 2026a, 2026b), 将静水沉积形成过程划分为 3 个子过程、6 个阶段和 3 个亚阶段 (图 8). 3 个子过程依次为水体沉降子过程、水-沉积物界面同生成岩子过程、埋藏成岩子过程, 其中水体沉降子过程进一步划分为表层沉降阶段和深层沉降阶段, 埋藏成岩子过程进一步划分为浅埋藏成岩阶段、中埋藏早期成岩阶段、中埋藏晚

期成岩阶段、深埋藏成岩阶段. 表层沉降阶段为 CSD 以浅富氧水体沉降阶段, 深层沉降阶段进一步细分为深层上部亚阶段 (CSD-CLD 以深的稀氧水体)、深层中部亚阶段 (CLD 以深-CCD 的缺氧硫化水体)、深层下部亚阶段 (CCD 以深的缺氧硫化水体). 根据方解石含量和硅壳腔充填物特征可知, S-9¹、S-9² 和 S-9³ 沉积的海底深度位于 CSD-CLD 以深的稀氧水体, S-4¹、S-4² 和 S-4³ 沉积的海底深度位于 CLD 以深-CCD 的缺氧硫化水体, S-5 和 S-7 沉积的海底深度位于 CCD 以深的缺氧硫化水体. 下面简要阐释静水沉积形成过程.

海洋表层氧、养料和光照充裕, 硅质微生物 (放射虫)、分泌钙碳酸盐微生物繁盛. 放射虫死亡后, 残留硅壳, 硅壳腔随即被微生物分泌的方解石全充

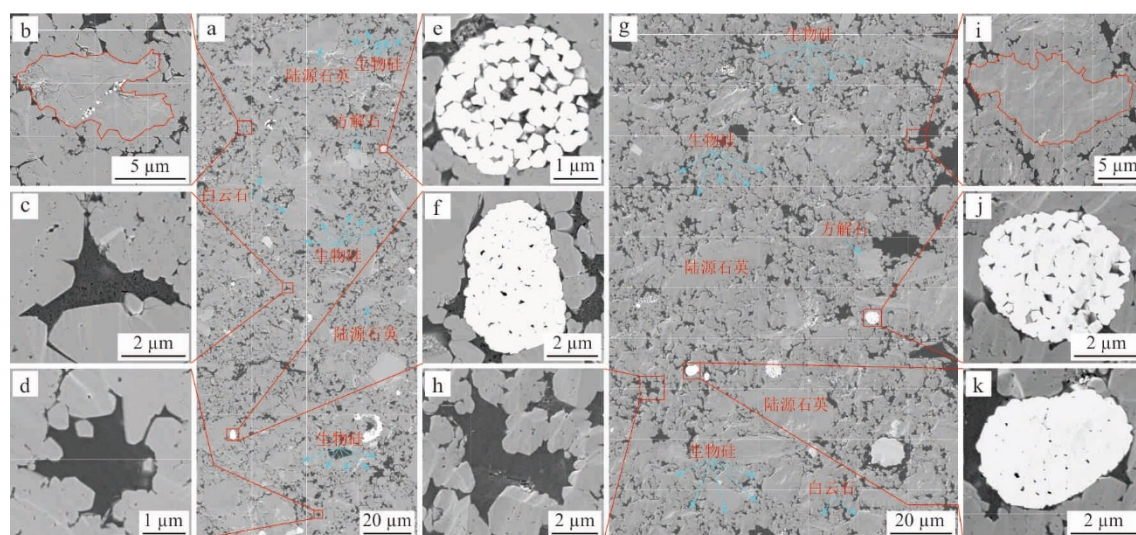


图13 四川盆地龙马溪组 S-3²和 S-3⁴硅岩典型岩石学特征

Fig.13 Typical petrological features of the silicalites coded as S-3² and S-3⁴ in the Longmaxi Formation of the Sichuan Basin
a~f. S-3²的纳米岩石图像. g~k. S-3⁴的纳米岩石图像. a. S-3²硅岩纹层纳米岩石特征全貌; b. 富黏土团块(红线圈定), 表面发育生物硅膜; c. 富孔隙纯净有机质; d. 无孔隙纯净有机质; e. 晶粒线状接触的莓状黄铁矿; f. 过度生长的莓状黄铁矿; g. S-3⁴硅岩纹层纳米岩石特征全貌; h. 微纳生物硅和富孔隙纯净有机质; i. 富黏土团块(红线圈定), 表面发育生物硅膜; j. 晶粒线状接触的莓状黄铁矿; k. 过度生长的莓状黄铁矿

填. 海底深度决定了静水沉积物中硅壳腔充填物的组成特征. 海底位于深层上部水体, 方解石溶解, 硅壳腔出现方解石溶孔; 水体含氧量降低至稀氧状态, 方解石溶孔适宜微生物活动, 并诱导硅质微粒沉淀, 形成微生物硅粒复合体. 微生物硅粒复合体占据硅壳腔方解石溶解孔隙的现象一直持续到 CLD 以深缺氧水体, 如 S-9², 方解石含量介于 10%~20%, 硅壳腔充填方解石和有机硅粒复合体. 海底位于深层中部缺氧水体, 莓状黄铁矿淀出, 硅壳腔方解石溶解孔隙充填黄铁矿颗粒, 如 S-4², 方解石含量介于 5%~10%, 硅壳腔充填物为方解石、有机硅粒复合体和黄铁矿. 海底位于深层下部缺氧水体, 沉积物中方解石含量不足 5%, 如 S-5 和 S-7.

海洋有机质依据粒径大小划分为溶解有机质和颗粒有机质, 其中溶解有机质是海洋最大的有机碳储库(蔡进功等, 2019). 溶解有机质是微生物的残体、分泌物及降解物经过化学和生物化学合成作用形成的一类性质稳定、不易分解、分子量较高、结构复杂的有机物, 具有溶解性、电离性、胶体性和较大比表面积等化学活性, 极易与化学活性相似的黏土矿物相互结合形成有机黏粒复合体(蔡进功等, 2019). 纳米岩石学证据证实, 四川盆地五峰组-龙马溪组岩石骨架颗粒间焦沥青黏粒复合体是沉有机黏粒复合体热演化的产物(周晓峰等, 2026a).

硅壳、硅壳腔充填物、壳屑、微纳生物硅、陆源

石英、方解石、黏土、笔石、有机黏粒复合体等悬浮沉降海底, 形成富沉有机黏粒复合体的含放射虫硅质软泥; 除放射虫化石外的其他物质悬浮沉降海底, 则形成富沉有机黏粒复合体的硅质软泥.

水-沉积物界面同生成岩子过程, S-9¹、S-9²和 S-9³硅质软泥的孔隙水淀出莓状黄铁矿和菱形白云石, S-4¹、S-4²、S-4³、S-5 和 S-7 淀出菱形白云石.

浅埋藏成岩阶段, 沉有机黏粒和硅粒复合体分别转化为干酪根黏粒和硅粒复合体. 中埋藏早期成岩阶段, 干酪根黏粒和硅粒复合体分别转化为油前沥青黏粒和硅粒复合体, 并产生迁移油前沥青, 部分油前沥青充填莓状黄铁矿晶间孔. 中埋藏晚期成岩阶段, 油前沥青黏粒和硅粒复合体分别转化为固体沥青石油黏粒和硅粒复合体, 油前沥青转化为固体沥青石油, 并形成石油和生烃增压缝. 深埋藏成岩阶段, 固体沥青石油黏粒和硅粒复合体转化为富孔隙焦沥青黏粒和硅粒复合体(富孔隙有机黏粒和硅粒复合体), 固体沥青石油转化为富孔隙焦沥青(富孔隙纯净有机质), 石油转化为无孔隙焦沥青(无孔隙纯净有机质), 生烃增压缝充填的石油转化为条带状无孔隙纯净有机质. 油前沥青挤入莓状黄铁矿晶间孔及其生成石油体积膨胀, 导致晶粒漂浮的莓状黄铁矿变形(压实作用对变形也有贡献).

硅质微生物的骨骼在矿物学上称为蛋白石 A, 由胶态 SiO₂、硅石和水组成, 其中胶态 SiO₂ 球粒在

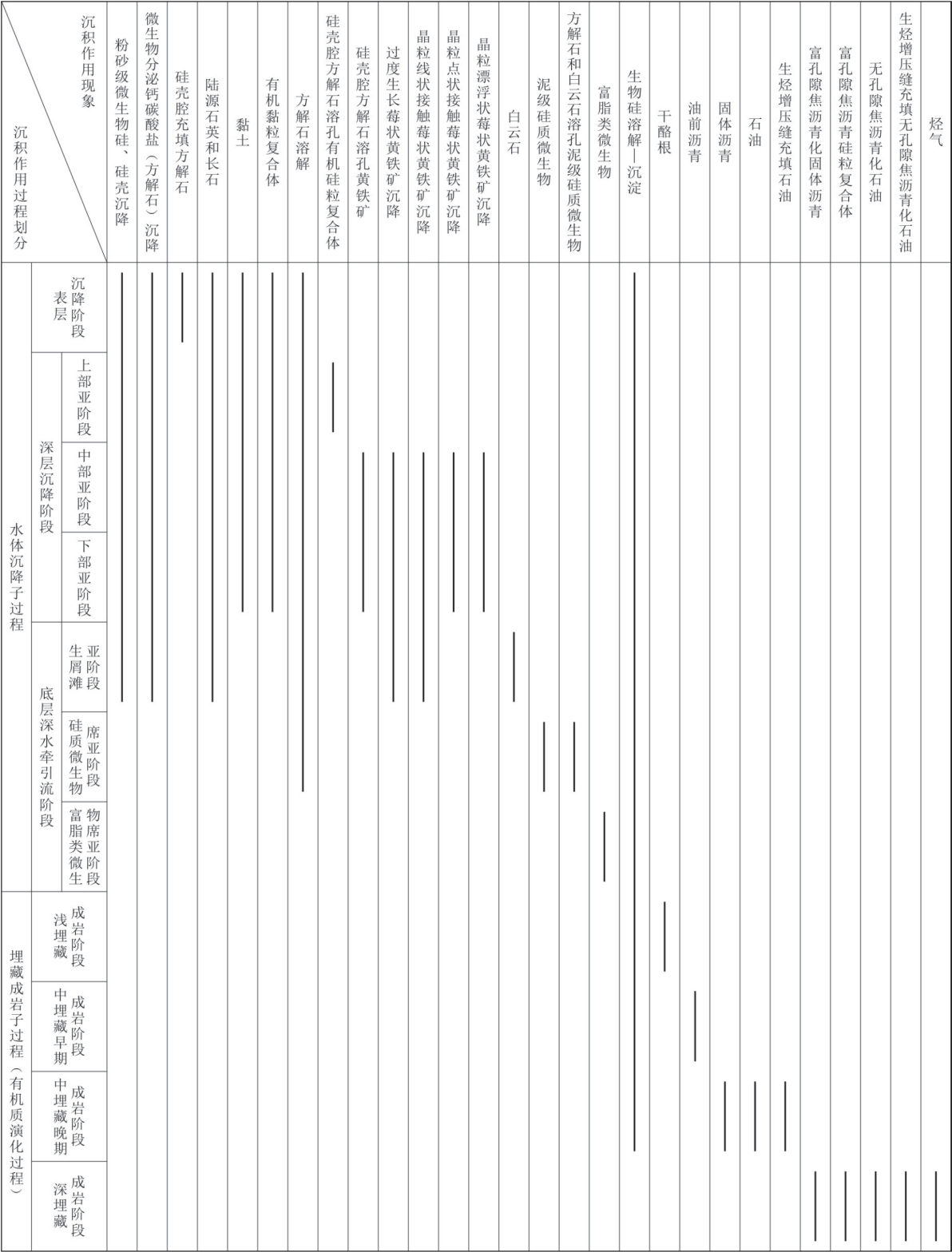


图 14 四川盆地龙马溪组 S-3¹和 S-3³含放射虫硅岩深水牵引流沉积作用过程

Fig.14 Deep-water traction current sedimentation process of the radiolarian silicalites coded as S-3¹ and S-3³ in the Longmaxi Formation of the Sichuan Basin

三维空间做规则的最紧密堆积,球粒间充填硅石和少量水(周晓峰等,2026b).硅质微生物死亡后,蛋白石 A 开启溶解-沉淀反应,胶态 SiO₂经蛋白石 CT、蛋白石 C 至中埋藏晚期成岩阶段转变为富孔隙石

表 2 四川盆地五峰组-龙马溪组被研究页岩矿物和有机质含量(体积百分含量,%)

Table 2 Statistics of minerals and organic matter from the shale samples studied in the Wufeng-Longmaxi formations of the Sichuan Basin($v, \%$)

样品 编码	沉积作用类型	生物硅	陆源石英	方解石	白云石	黏土矿物	黄铁矿-1	黄铁矿-2	黄铁矿-3
S-1 ²	深水重力流沉积	43.1	16.8	27.6	2.7	3.3	0.1	0.1	/
S-1 ¹		21.9	38.3	31.2	1.9	2.0	0.1	0.1	/
S-2 ²		31.4	16.2	28.3	13.6	3.2	0.1	0.1	/
S-2 ¹		11.2	45.3	27.2	10.9	0.4	0.1	0.1	/
S-3 ⁴	深水牵引流沉积	76.1	7.0	2.2	1.6	0.5	0.1	0.1	/
S-3 ³		78.4	3.0	1.7	0.7	0.4	0.1	0.1	/
S-3 ²		71.4	8.2	3.1	1.2	0.8	0.1	0.1	/
S-3 ¹		80.4	2.5	1.9	1.5	0.9	0.1	0.1	/
S-4 ³	静水沉积	59.3	6.8	7.5	7.1	11.1	0.1	0.1	0.1
S-4 ²		60.6	6.1	7.2	8.5	8.3	0.1	0.1	0.1
S-4 ¹		58.8	5.6	9.1	9.7	8.9	0.1	0.1	0.1
S-5	静水沉积	61.2	7.2	4.3	7.1	8.5	0.2	0.2	0.2
S-6	深水牵引流沉积	78.8	2.9	2.4	1.9	0.4	0.1	0.1	/
S-7	静水沉积	60.4	8.5	4.7	7.1	6.4	0.2	0.3	0.3
S-8	深水牵引流沉积	72.4	4.4	2.9	2.2	2.6	0.1	0.1	/
S-9 ³	静水沉积	55.6	5.6	17.6	8.2	3.9	0.2	0.1	0.1
S-9 ²		58.7	4.1	13.1	5.2	6.1	0.2	0.1	0.1
S-9 ¹		60.1	4.8	15.4	6.3	4.6	0.2	0.1	0.1
S-1 ²	深水重力流沉积	/	0.1	0.1	5.2	/	/	0.6	0.3
S-1 ¹		/	0.1	0.1	4.1	/	/	/	0.2
S-2 ²		/	0.1	0.1	5.7	/	/	0.7	0.5
S-2 ¹		/	0.1	0.1	3.5	/	/	0.7	0.4
S-3 ⁴	深水牵引流沉积	/	/	/	/	/	/	11.8	0.6
S-3 ³		/	/	/	/	2.2	/	13.1	0.3
S-3 ²		/	/	/	/	/	/	14.5	0.6
S-3 ¹		/	/	/	/	3.4	/	8.5	0.7
S-4 ³	静水沉积	0.1	/	0.1	6.1	/	/	0.5	1.1
S-4 ²		0.1	/	0.1	4.6	2.4	/	1.3	0.5
S-4 ¹		0.1	/	0.1	5.9	/	/	0.7	0.8
S-5	静水沉积	0.2	/	0.1	6.3	/	/	2.9	1.6
S-6	深水牵引流沉积	/	/	/	/	/	/	13.1	0.3
S-7	静水沉积	0.2	/	0.1	3.9	/	2.2	5.1	0.6
S-8	深水牵引流沉积	/	/	/	/	/	/	12.8	2.5
S-9 ³	静水沉积	0.1	/	0.1	4.9	/	/	2.3	1.3
S-9 ²		0.1	/	0.1	5.1	4.2	/	2.1	0.8
S-9 ¹		0.1	/	0.1	5.7	/	/	1.8	0.7

注:“/”指含量小于0.1.零星黄铁矿颗粒和硅壳腔黄铁矿未做统计.黄铁矿-1.过度生长的莓状黄铁矿;黄铁矿-2.晶粒线状接触的莓状黄铁矿;黄铁矿-3.晶粒点状接触的莓状黄铁矿;黄铁矿-4.晶粒漂浮的莓状黄铁矿;黄铁矿-5.晶粒接触关系多样的莓状黄铁矿;有机质-1.富孔隙有机黏粒复合体;有机质-2.富孔隙有机硅粒复合体;有机质-3.富孔隙笔石;有机质-4.富孔隙纯净有机质;有机质-5.无孔隙纯净有机质.

英,溶解的硅石沉淀为富孔隙石英的次生加大边,形成硅质生物化石的圈层结构(周晓峰等,2026b).

S-9¹、S-9²和 S-9³沉积于 CSD-CLD 以深的稀氧水体,莓状黄铁矿是同生成岩子过程的自生矿物(图 8,虚线).S-4¹、S-4²、S-4³、S-5 和 S-7 沉积于缺氧硫化水体,莓状黄铁矿是深层缺氧硫化水体淀出的矿物,硅壳腔黄铁矿系方解石溶解孔隙的充填物.若将从水体沉降而来的矿物称之为碎屑,在同生成

岩石过程和埋藏成岩子过程中从孔隙水淀出的自生矿物称之为胶结物,则S-9¹、S-9²和S-9³中黄铁矿为胶结物,而S-4¹、S-4²、S-4³、S-5和S-7中黄铁矿为碎屑。

3.2 深水重力流沉积作用分析

3.2.1 深水重力流沉积岩石学特征 岩心观察发现,粗粒陆源石英碎屑和浅水介屑疏密不等地悬浮在黑色页岩中,粗粒陆源石英碎屑密度大的团块呈断续条带,介屑破碎度高且水平或杂乱分布(图 3a、3b)。光学显微镜下观察可知,陆源石英碎屑和浅水介屑(方解石)的粒径大小相差悬殊、分选差,悬浮在黑色物质中(图 9a、9b)。电子探针波谱图像和元素面扫描图像可知,黑色物质为细粒石英、方解石、白云石、黄铁矿、黏土、有机质等混杂堆积,因相互屏蔽且被有机质浸染而难以分辨(图 9c~9t)。

S-2¹和S-2²纳米岩石图像数据体观察可以看出,细粒石英划分为泥级石英和粉砂级石英,泥级石英内部通常有孔隙且数量不一的颗粒构成聚合体(图 10a),而粉砂级颗粒缺乏孔隙(图 10b)。具有孔隙的泥级石英颗粒是生物硅溶解-沉淀的产物(周晓峰等,2026b),而缺乏孔隙的细粒石英为陆源碎屑(Zhou *et al.*, 2024, 2025;周晓峰等,2025)。

方解石压溶现象明显(图 10c),白云石的菱形边缘不完整(图 10d),常见过度生长的莓状黄铁矿(图 10e)、强烈压溶的晶粒线状接触的莓状黄铁矿(图 10f)和其他物质挤入而变形的晶粒漂浮、点状、线状接触甚至压溶融合同时出现的莓状黄铁矿(图 10g),缺乏晶粒点状接触的莓状黄铁矿和漂浮的莓状黄铁矿。有机质划分为有机黏粒复合体和纯净有机质,有机黏粒复合体发育有机孔(图 10h),纯净有机质进一步细分为富孔隙纯净有机质(图 10i)和无孔隙纯净有机质(图 10j)。

3.2.2 深水重力流沉积形成过程 融合岩石学特征,将S-1和S-2表征为由4个子系统组成的结构复杂但总体表现为细粒物质中悬浮粗粒碎屑的深水砂泥质碎屑流沉积。4个子系统为陆源碎屑子系统、浅水生屑子系统、深水生屑子系统和有机质子系统(周晓峰等,2025)。陆源碎屑子系统主要为粒径不一的石英和少量黏土,浅水生屑子系统主要为形貌各异的方解石(介屑),深水生屑子系统主要为具有孔隙的泥级生物硅和少量方解石及白云石,有机质子系统由富孔隙有机黏粒复合体、富孔隙纯净有机质和无孔隙纯净有机质组成。细粒陆源石英和黏土、浅水生屑、深水生屑和有机质混杂堆积,粗粒陆源

石英和浅水生屑悬浮其中。深水重力流沉积的形成过程可以划分为2个子过程和7个阶段(图 11),其中沉积子过程进一步划分为滨岸重力流形成阶段、浅水重力流形成阶段、深水砂泥质碎屑流形成阶段,埋藏成岩子过程进一步划分为浅埋藏成岩阶段、中埋藏早期成岩阶段、中埋藏晚期成岩阶段、深埋藏成岩阶段。

第1阶段为滨岸重力流形成阶段。S-1和S-2采集于奥陶系-志留系界线地层观音桥层。奥陶纪-志留纪之交,火山活动、冰期、生物灭绝等一系列重大地质事件叠加(孔维亮等,2025),这是重力流频发的地质背景。在滨岸环境,成分和结构成熟度高的砂质沉积物和黏土为主的泥质沉积物被再造为碎屑颗粒粒径大小混杂的重力流。

第2阶段为浅水重力流形成阶段。滨岸重力流流经浅海时,侵蚀浅水介屑滩,介屑卷入重力流,砂、泥质混杂的重力流转换为砂、泥、介屑混杂的浅水重力流。重力流也可以起始于浅海,形成浅水生屑大小混杂的重力流。

第3阶段为深水砂泥质碎屑流形成阶段。浅水重力流进入深水,侵蚀富有机质的海底软泥,形成深水重力流沉积物。富有机质的海底软泥主要由细粒的生物硅、有机黏粒复合体、不规则方解石、菱形白云石、莓状黄铁矿、黏土等组成,这造成深水重力流沉积物兼有砂质碎屑流和泥质碎屑流的流态特征(简称为“砂泥质碎屑流沉积”),其中长条状生屑的顺层排列是砂质碎屑流的典型特征,而杂乱排列是泥质碎屑流的典型特征(Shanmugam, 2013;周晓峰等,2025)。重力流作用下,抗碰撞和剪切能力强的过度生长的莓状黄铁矿和晶粒线状接触的莓状黄铁矿保留下来,晶粒点状接触的莓状黄铁矿被其他细粒物质挤入而变形,晶粒漂浮的莓状黄铁矿解体而消失。

在水-沉积物界面,砂泥质碎屑流沉积物缺乏莓状黄铁矿和菱形白云石的生长空间,未发生明显的成岩作用,因此,砂泥质碎屑流缺乏同生成岩子过程。在埋藏成岩子过程,生物硅发生溶解-沉淀反应,沉有机质转化为焦沥青,详述见3.1.2。成分和结构成熟度低、压实作用强度高,晶粒线状接触的莓状黄铁矿以及方解石(介屑)压溶作用强烈。

3.3 深水牵引流沉积作用分析

S-8和S-6硅岩是在四川盆地自贡和威远地区发现的深水牵引流沉积(Zhou *et al.*, 2024, 2025)。深水牵引流搅动海底沉积物并带离黏土,导致富黏土

的沉积物转化为具有网状流体运移通道的凝絮体,流体富氧和养料为微生物繁盛提供了物质基础,富黏土沉积物逐渐转变为缺乏黏土的深水牵引流沉积(微生物席)(Zhou *et al.*, 2024).深水牵引流带离从深层水体沉降而来的黏土和有机质,形成粉砂级生物硅为主的生屑毯,为微生物席的发展提供了有利条件(Zhou *et al.*, 2025).最近又发现了1个深水牵引流沉积的硅岩岩样,由2层含放射虫硅岩纹层(S-3¹和S-3³)和2层黑色硅岩纹层(S-3²和S-3⁴)互层(图3c).这些深水牵引流沉积都具有“两高一缺一”特征,即高脆性矿物含量(>80%)、高有机质含量(>15%)、缺黏土(<5%)、无有机黏粒复合体(表2).以S-3的4层深水牵引流沉积为例,首先详细描述S-3¹和S-3³含放射虫硅岩纹层的岩石学特征,再描述S-3²和S-3⁴黑色硅岩纹层的岩石学特征,进而开展深水牵引流沉积形成过程分析.

3.3.1 深水牵引流沉积岩石学特征 S-3岩心纵切面上,S-3¹和S-3³放射虫化石呈密集的笔尖大小白色斑点(图3c).光学显微镜下,硅壳为黑色背景中的亮色环带(图12a).波谱图像和元素面扫描图像可以看出,硅壳腔充填有机硅粒复合体和黄铁矿(图12b~12f)或有机硅粒复合体(图12g)或黄铁矿(图12h).硅壳、壳屑、陆源石英碎屑、方解石、白云石、黄铁矿等组成岩石骨架的轮廓,泥级生物硅镶嵌在轮廓之中,它们共同形成岩石骨架,有机质分布在骨架间和充填生烃增压缝(图12i).骨架间有机质都是富孔隙纯净有机质(图12j),生烃增压缝充填无孔隙纯净有机质(图12k).硅壳腔有机硅粒复合体中,硅质的含量明显高于有机质的含量,表现为有机质镶嵌在硅粒中(图12l).生物硅颗粒发育孔隙(图12m),陆源石英表面有生物硅膜(图12n、12o).莓状黄铁矿以过度生长的(图12p)和晶粒线状接触的(图12q)为主,缺乏晶粒点状接触的和漂浮的.

S-3²和S-3⁴黑色硅岩纹层中,微纳生物硅聚合体和粉砂级陆源石英、方解石、白云石、莓状黄铁矿、富黏土团块等组成岩石骨架,骨架间充填富孔隙纯净有机质和无孔隙纯净有机质,可见过度生长的和晶粒线状接触的莓状黄铁矿,缺乏有机黏粒复合体以及晶粒点状接触的和漂浮的莓状黄铁矿(图13).与S-6和S-8硅岩反复比对可知,S-3¹和S-3³含放射虫硅岩的沉积作用过程与S-8相似,S-3²和S-3⁴硅岩的沉积作用过程与S-6相似.

深水牵引流沉积的方解石含量都小于5%

(表2),这表明海底深度在CCD之下.

3.3.2 深水牵引流沉积形成过程 通过剖析岩石学特征,结合前期工作(Zhou *et al.*, 2024, 2025),以S-3¹和S-3³为例,将深水牵引流沉积的形成过程划分为2个子过程、7个阶段、6个亚阶段(图14),海洋水体沉降子过程进一步划分为表层沉降阶段(CSD之上富氧水体)、深层沉降阶段、底层深水牵引流阶段,深层沉降阶段更进一步细分为上部亚阶段(CSD-CLD以深的稀氧水体)、中部亚阶段(CLD以深-CCD的缺氧硫化水体)和下部亚阶段(CCD以深的缺氧硫化水体),底层深水牵引流阶段更进一步细分为生屑毯亚阶段、硅质微生物席亚阶段、富脂类微生物席亚阶段.埋藏成岩子过程进一步划分为浅埋藏成岩阶段、中埋藏早期成岩阶段、中埋藏晚期成岩阶段、深埋藏成岩阶段.

沉降子过程中表层和深层沉降阶段与静水沉积相似,详述见3.1.2.深层下部水体的生物硅(硅壳及其腔充填物)、陆源石英、方解石、黏土、莓状黄铁矿、有机黏粒复合体等沉降到底层深水牵引流时,黏土和有机黏粒复合体被水流带走,晶粒点状和漂浮状接触的莓状黄铁矿被水流打散而消失;水流搬运少量白云石,也不排除搬运有其他少量粉砂级颗粒,这些垂向沉降和横向搬运的以粉砂级生物硅为主的颗粒沉积下来,形成海底生屑毯.生屑毯孔隙网络发达,水流顺畅,为硅质微生物繁衍生息创造了有利条件.水流带来氧和养料,是硅质微生物出现的基础;生屑滩内缺乏黏土,为硅质微生物活动提供了适宜环境;生屑滩具有较大的颗粒表面积,为硅质微生物繁盛创造了优质的底栖场所,生屑毯转化为硅质微生物席.硅质微生物占据了大量的孔隙空间,导致孔隙变小和减少,水流受阻,氧和养料供给不足,难以维持硅质微生物生长,富脂类微生物取而代之,形成富脂类微生物席.随着富脂类微生物的生命活动,几乎所有孔隙被占据,导致水流改道.失去氧和养料以及生长空间,富脂类微生物席生长停止.此刻,富脂类微生物转化为深水牵引流沉积的沉有机质.

在水-沉积物界面,停止生长的微生物席致密,缺乏莓状黄铁矿和菱形白云石的生长空间,未发生明显的成岩作用,因此,深水牵引流沉积缺乏同生成岩子过程.

深水牵引流沉积的埋藏成岩子过程与静水沉积和深水重力流沉积的埋藏成岩子过程相似,详述

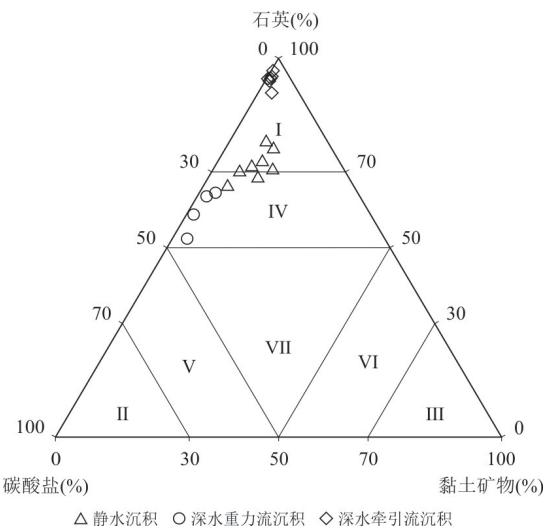


图 15 四川盆地五峰组-龙马溪组被研究页岩岩相分类
Fig.15 Classification of the shale lithofacies from the shale samples studied in the Wufeng-Longmaxi formations of the Sichuan Basin
I. 硅岩; II. 碳酸盐岩; III. 黏土岩; IV. 硅质页岩; V. 碳酸盐质页岩; VI. 黏土质页岩; VII. 混合页岩

见 3.1.2.S-3² 和 S-3⁴ 的深水牵引流沉积作用过程见 Zhou *et al.* (2024), 不再赘述。

3.4 深水沉积作用岩石学鉴别标志

通过岩石学特征解析四川盆地五峰组-龙马溪组页岩深水沉积形成过程,提取静水沉积、深水重力流沉积和深水牵引流沉积的岩石学鉴别标志。

静水沉积作用的岩石学鉴别标志:①岩石骨架颗粒间发育富孔隙有机黏粒复合体;②莓状黄铁矿类型齐全,包括过度生长的、晶粒线状接触的、晶粒点状接触的、晶粒漂浮的等,其中晶粒漂浮的莓状黄铁矿在埋藏成岩子过程中由于油前沥青挤入晶间孔和生油膨胀导致晶粒滑动、移位变为不规则形状;③笔石呈近水平条带,内部可见石英、黏土等少量杂物,笔石中有机孔发育程度与压实作用密切相关。①和②同时出现在静水沉积中,③在 4 nm MAPS 具有随机性。

深水重力流沉积作用的岩石学鉴别标志:①粗粒陆源石英和浅水介屑悬浮在黑色细粒物质中;②黑色细粒物质中发育生物硅和有机黏粒复合体;③过度生长的莓状黄铁矿和/或晶粒线状接触的莓状黄铁矿和/或矿物挤入晶间孔形成晶粒接触关系复杂(线状、点状、漂浮)的莓状黄铁矿,缺乏晶粒点状接触的和漂浮的莓状黄铁矿。

深水牵引流沉积作用的岩石学鉴别标志:

①岩石骨架颗粒间充填富孔隙的纯净有机质,缺乏有机黏粒复合体;②数量不多但普遍见过度生长的莓状黄铁矿和晶粒线状接触的莓状黄铁矿,缺乏晶粒点状接触的和漂浮的莓状黄铁矿;③陆源石英颗粒表面发育生物硅膜。

4 讨论

4.1 沉积环境与沉积作用

主要讨论海洋水体氧化还原性质和方解石沉淀与溶解条件及它们之间的相互关系。

地球海洋经历了从缺氧状态向富氧状态的转变,早期缺氧水体具有“硫化楔”化学结构,现代富氧水体的沉积物孔隙水具有氧化带、NO₂⁻、Mn²⁺、Fe²⁺、H₂S、CH₄等化学分带(李超等,2015)。地球海洋逐渐富氧可以理解为生物光合作用释放的氧气不断氧化还原性物质,而局部范围或较短时间尺度的海洋氧化还原状态则主要受区域内有机质和各种氧化剂间的供给平衡控制(李超等,2015)。溶解氧是最为重要的氧化剂,通常采用富氧(充氧、需氧)、稀氧(贫氧、次氧)、缺氧(缺氧硫化、硫化)等术语描述海洋氧化还原状态(程立雪等,2013)。古海洋氧化还原状态通常依据页岩地球化学信息推断(邱振等,2021),不足之处:(1)默认古海洋为静水环境,表层水体富氧,深水稀氧或缺氧;(2)主量元素、微量元素、TOC、同位素、生标化合物等地球化学数据与矿物和有机质的关系极为复杂,多解性较强。本次研究发现硅壳腔是一个“时间胶囊”,根据其中充填的矿物和有机质可以推断海洋水体氧化还原性质的变化,方解石为表层富氧水体分泌钙碳酸盐微生物的新陈代谢产物,有机硅粒复合体是稀氧水体微生物及其诱导沉淀硅粒的赋存状态,黄铁矿系深水缺氧环境沉淀的标志矿物。结合沉积作用可知,S-9²沉积时期的海底为稀氧环境,S-4²沉积时期的海底为缺氧硫化环境;S-3¹和 S-3³沉积时期的深层水体为缺氧硫化环境,海底为富氧或稀氧环境。

地球海洋的CSD、CLD、CCD在显生宙总体上是逐渐加深的,但不同海洋或同一海洋的不同海域 CCD变化很悬殊,这种变化的成因机制仍需进一步探索(肖开迅等,2024)。硅壳腔充填物成因分析表明,奥陶纪-志留纪之交四川盆地所在海域的CSD位于表层富氧水体,CLD介于深水稀氧水体至缺氧水体,CCD位于深水缺氧水体,CLD与 CCD不仅与方解石溶解度随水深增加而增大有关,更与缺氧硫

化的酸性水体和深水牵引流密切相关。S-9²沉积时期的海底环境为CLD之下的稀氧水体, S-4²为CLD之下的缺氧水体, S-3¹和S-3³沉积时期的深水环境为CCD之下的缺氧水体(静水环境)、海底环境为CCD之下的富氧或稀氧水体(深水牵引流环境)。

根据含放射虫页岩岩石学特征提供的水体氧化还原状态和方解石沉积与溶解信息, 推断黑色页岩的沉积环境。S-9²和S-9¹与S-9³的黏土、有机黏粒复合体、方解石含量相近, 为静水沉积, 表层为CSD之上的富氧环境和海底为CLD之下的稀氧环境。S-4²和S-4¹与S-4³的黏土、有机黏粒复合体、方解石含量相近, 为静水沉积, 表层为CSD之上的富氧环境、海底为CLD之下的缺氧硫化环境。S-5和S-7富有机黏粒复合体且方解石含量小于4%, 为静水沉积, 海底缺氧硫化且处于CCD以深环境。S-3¹、S-3²、S-3³、S-3⁴、S-6、S-8发育富孔隙纯净有机质, 缺乏黏土和有机黏粒复合体, 方解石含量小于4%, 为深水牵引流沉积, 沉积环境为表层水体富氧和深水经稀氧至缺氧以及海底为富氧或稀氧。

深水重力流沉积中, 陆源石英碎屑的高含量稀释深水方解石, 浅水介屑的高含量稀释深水方解石和增加方解石的总量但无法分辨浅水介屑和深水方解石, 这两个因素叠加导致目前尚难以判断深水重力流沉积是稀氧还是缺氧环境以及CLD之下还是CCD之下的沉积物。

4.2 矿物和有机质赋存状态与成因

石英、方解石、白云石、黏土、莓状黄铁矿等矿物和有机质的成因是海相页岩储层形成机理研究的核心内容, 虽然成果颇丰, 但认识并不一致。硅岩和硅质页岩是四川盆地五峰组-龙马溪组页岩气优质储层的主要岩相, 含量最高的微纳石英被认为是沉降子过程的生物硅(陈增裕等, 2023)、同生成岩子过程-埋藏成岩子过程的自生矿物(Loucks and Reed, 2014; 赵建华和金之钧, 2021)或生物硅重结晶(卢龙飞等, 2022)。方解石和白云石是页岩中常见矿物, 形成时间贯穿沉积和成岩过程(Loucks and Reed, 2014; 赵建华和金之钧, 2021; 卢龙飞等, 2022)。黏土被默认为是由蒙皂石转化的伊蒙混层和伊利石(赵建华和金之钧, 2021; 卢龙飞等, 2022; 陈增裕等, 2023), 莓状黄铁矿源自缺氧水体(张光荣等, 2020)。有机质可以划分为富孔隙有机质和无孔隙有机质, 富孔隙有机质有原地有机质(残余干酪根)(Loucks *et al.*, 2012)和迁移有机质(焦沥青化石

油)(Bernard *et al.*, 2012; Loucks and Reed, 2014)之分, 相应地, 无孔隙有机质有腐殖质(Loucks *et al.*, 2012; 席斌斌等, 2023)和原地有机质之说(Bernard *et al.*, 2012; Loucks and Reed, 2014)。究其原因, 默认海相页岩为静水沉积和缺乏纳米岩石学证据支撑是造成认知多解性的根源。结合前期工作(周晓峰等, 2022a, 2022b, 2025, 2026a, 2026b; Zhou *et al.*, 2024, 2025), 本次研究通过沉积类型约束和纳米岩石学证据支撑更加合理地解释四川盆地五峰组-龙马溪组页岩中矿物和有机质的赋存状态与成因。

将沉降子过程的自生矿物称为碎屑, 同生成岩子过程和埋藏成岩子过程的自生矿物称为胶结物; 泥质沉积物中的有机质称为沉有机质, 之后沉有机质热演化形成页岩中各种次生有机质。生物硅次生加大边发生在沉降子过程至埋藏成岩子过程(周晓峰等, 2022a, 2025, 2026b; Zhou *et al.*, 2024, 2025), 因此, 其是碎屑和胶结物混合体, 称为碎屑-胶结物。

四川盆地五峰组-龙马溪组页岩中, 石英包括陆源石英碎屑、生物硅及其加大边、有机硅粒复合体。陆源石英碎屑缺乏孔隙, 静水沉积和深水重力流沉积的陆源石英碎屑表面缺乏矿物膜, 而深水牵引流沉积的陆源石英碎屑表面具有生物硅膜。生物硅分为硅壳、壳屑、微纳生物硅, 硅壳具有3个圈层: 富孔隙放射虫硅质骨骼壳及其内、外表面的无孔隙硅质次生加大边, 壳屑和微纳生物硅具有内核外壳双层结构, 内核为富孔隙生物硅质骨骼, 外壳为无孔隙石英次生加大边; 生物硅的结构是蛋白石A在沉降子过程至中埋藏晚期成岩阶段发生溶解-沉淀作用的表现形式, 不受沉积作用类型的影响。静水沉积的生物硅形成于表层富氧水体和深水稀氧环境, 深水牵引流沉积的生物硅形成于表层富氧水体、深水稀氧环境以及深水牵引流作用时期, 深水重力流沉积的生物硅可能来自静水沉积或深水牵引流沉积。在有机硅粒复合体中, 硅粒系微生物诱导沉淀。

方解石是海洋表层富氧水体分泌钙碳酸盐微生物的新陈代谢产物, 有4个证据: ①完整和残缺硅壳腔方解石, 指示方解石是沉降子过程形成的碎屑; ②粒径普遍大于15 μm, 远大于岩石骨架间孔隙的直径; ③深水重力流沉积和深水牵引流沉积中, 方解石溶解孔隙充填微纳生物硅(Zhou *et al.*, 2024, 2025); ④静水沉积中, 海底深度在CCD以深形成的页岩方解石含量低, 在CLD之下但在CCD之上缺

氧水体形成的页岩方解石含量中等,而在CLD之下稀氧水体的页岩方解石含量高.对于五峰组观音桥层,浅水介屑含量高于深水方解石含量,目前尚不能分辨细粒浅水介屑(方解石)和深水方解石.

菱形白云石系静水沉积物孔隙水中淀出的自生矿物(周晓峰等,2022b,2025).深水牵引流改造静水沉积物,菱形白云石因溶解出现孔隙,继而被微纳硅质生物所占据.深水重力流掏蚀静水沉积物,菱形白云石发生碰撞和化学溶解,内部因溶解出现孔隙,边缘因溶解失去菱形形貌,因颗粒相互撞击出现凹坑.

黏土矿物被默认为是由蒙皂石转化形成的伊蒙混层和伊利石(赵建华和金之钧,2021;卢龙飞等,2022;陈增裕等,2023).本次研究从3个方面说明黏土矿物可能是陆源云母蚀变的产物:①不同方法测试和观察结果融合,初步推断伊利石主要为云母的蚀变产物.黏土矿物定量分析的传统方法是全岩和黏土X-衍射分析测试,测试结果为四川盆地五峰组-龙马溪组页岩黏土矿物主要为伊蒙混层和伊利石(王秀平等,2015).矿物扫描结果显示,黏土矿物以伊利石为主,兼有少量绿泥石和高岭石,伊利石以浸染状分布或条带状散布在页岩中(周晓峰等,2022a).4 nm MAPS观察发现,条带状伊利石为条带状云母蚀变的产物,浸染状分布的伊利石呈片状且与条带状伊利石有着千丝万缕的联系(周晓峰等,2022a);②目前页岩黏土矿物的研究思路多继承砂岩黏土矿物的研究思路,但镜下观察结果却明显不同.砂岩中黏土X-衍射测试结果都能在镜下找到,如蒙皂石显絮凝状,高岭石集合体以蠕虫状和书页状产出,绿泥石集合体多表现为碎屑颗粒表面的黏土矿物膜,伊利石以丝状相互缠绕在一起形成孔隙桥塞(蔡来星等,2023).在页岩储层中,黏土矿物紧密堆积或被有机质包裹,很难系统地观察到全貌,新鲜断面仅见到条带状或片状伊利石.在成岩过程中新生的伊利石通常为发丝状或板条状(蔡来星等,2023),因此片状或条带状伊利石显然不大可能是从孔隙水淀出的新生矿物,更可能是云母蚀变的产物;③五峰组-龙马溪组发育为数不少的斑脱岩纹层,X-衍射鉴定为伊利石和伊蒙混层(王玉满等,2020).新鲜断面镜下观察发现,斑脱岩纹层的围岩并没有观察到蒙皂石或伊利石增加的迹象,这表明火山灰沉积时限很短,对上、下的泥质沉积物并没有明显影响,不大可能给围岩提供足够的物源.

Wilkin *et al.* (1996)发现莓状黄铁矿的粒径大小是反映现代深水氧化还原状态的可靠指标,平均粒径 $(5.0 \pm 1.7) \mu\text{m}$ 的莓状黄铁矿形成于缺氧硫化水体,平均粒径 $(7.7 \pm 4.1) \mu\text{m}$ 的莓状黄铁矿反映氧化水体,依据平均粒径-标准偏差和平均粒径-偏态交会图编制了查验深水氧化还原性质的图版.之后,图版广泛用于查明页岩沉积时期水体的氧化还原性质(张光荣等,2020).近年来,有学者认为利用这种方法恢复古海洋氧化还原状态存在的问题(黄元耕,2018;王东升等,2022).综观以往的研究成果可知,缺乏对古海水氧化还原结构和页岩沉积过程的认知,是通过已知现代水体氧化还原状态和莓状黄铁矿粒径建立的图版推断古海水氧化还原状态出现偏差的根本原因.本次研究发现,S-9¹、S-9²和S-9³为底水稀氧环境的静水沉积,莓状黄铁矿形成于水-沉积物界面同生成岩子过程;其他静水沉积为底水缺氧环境的产物,莓状黄铁矿形成于沉降子过程,但平均粒径分布在 $3.6 \sim 6.7 \mu\text{m}$ 重叠区间(张光荣等,2020;王东升等,2022)可能是以往研究未发现海底稀氧环境的主要原因.页岩缺乏晶粒点状接触的和漂浮的莓状黄铁矿为深水重力流沉积或深水牵引流沉积,不能应用莓状黄铁矿粒径的相关信息判断沉积环境.

有机黏粒复合体是静水沉积和深水重力流沉积中沉有机质的主要表现形式,页岩气储层中的富孔隙焦沥青黏粒复合体是沉有机黏粒复合体热演化形成的次生原地有机黏粒复合体,富孔隙焦沥青是迁移油前沥青经固体沥青石油形成的,无孔隙焦沥青是石油转化而来.深水牵引流沉积中,富孔隙焦沥青是沉有机质经原地油前沥青和固体沥青石油转化的,无孔隙焦沥青是石油转化的.由此可以看出,缺乏沉积作用类型约束,沉有机黏粒复合体可能被笼统视作静水沉积,深水牵引流沉积的原地富孔隙焦沥青可能被视为焦沥青化迁移油前沥青.矿物的赋存状态与成因分析可知,方解石为碎屑,微纳生物硅为碎屑-胶结物;白云石在静水沉积的形成时间为水-沉积物界面同生成岩子过程,在深水重力流沉积和深水牵引流沉积为再搬运的碎屑,因此,判断与这些矿物接触的有机质为迁移有机质(Loucks and Reed,2014)是不符合实际地质情况的.

4.3 纹层赋存形式及成因

除含放射虫页岩和深水重力流沉积外,四川盆地五峰组-龙马溪组页岩大都是块状黑色细粒沉积.

施振生等(2024, 2025)通过梳理光学显微镜观察到的页岩层理或纹理或明暗纹层现象,借鉴粗粒沉积层理成因,认为五峰组-龙马溪组页岩为静水沉积、深水重力流沉积、深水牵引流沉积的交互叠置,这些认识有助于推动海相页岩深水沉积研究,从而一举打破静水沉积(半远洋-远洋沉积)的垄断地位。本次研究发现,通过岩石学证据能够获得更加合理的页岩深水沉积作用解释。

S-3¹、S-3²、S-3³、S-3⁴和S-4¹、S-4²、S-4³及S-9¹、S-9²、S-9³等具有水平纹理的含放射虫页岩和黑色页岩中,S-3¹、S-3²、S-3³、S-3⁴为深水牵引流沉积,S-4¹、S-4²、S-4³和S-9¹、S-9²、S-9³为静水沉积,可以看出,相似纹理的海相页岩可能是相同的沉积作用类型,也可能是不同的沉积作用类型。无论是哪种纹理,缺乏黏土和有机黏粒复合体的页岩是深水牵引流沉积,富黏土和有机黏粒复合体但缺乏粗粒陆源石英碎屑和浅水生屑的页岩是静水沉积,富黏土、有机黏粒复合体、粗粒陆源石英碎屑或浅水介屑的页岩是深水重力流沉积。

含放射虫页岩纹层可能是静水沉积或深水牵引流沉积。如果深水重力流改造含放射虫硅质软泥,则可能形成具有深水重力流沉积性质的含放射虫页岩纹层。粒径较粗的陆源石英、浅水介屑、方解石、生物硅等含量偏高的页岩纹层,岩心或光学显微镜下为亮纹层,反之为暗纹层。季节变化引起的分泌钙碳酸盐微生物和硅质生物的数量变化,势必通过静水沉积纹层的明暗变化反映出来;深水牵引流流速大小的变化,或深水重力流携带的碎屑颗粒的粗细变化,可以通过页岩纹层的明暗突变或递变表现出来,也就是说,明、暗纹层不能直接判断沉积作用类型。

对于粗碎屑含量偏高的页岩,通过岩心、光学显微镜、电子探针显微镜和4 nm MAPS的有序衔接,观测岩石学特征,开展岩石学表征,剖析沉积作用类型。对于黑色块状页岩,直接通过4 nm MAPS观测岩石学特征,结合从粗粒碎屑含量高的页岩提炼的不同沉积作用类型的岩石学鉴别标志,判断无任何组构特征(块状)黑色页岩的沉积作用类型。硅壳腔的时间胶囊属性是通过岩石学特征解析海相页岩深水沉积作用的关键。

4.4 深水沉积作用与储层精细评价

储层质量是页岩油气勘探开发的灵魂。综合甜点段有机质类型、有机质丰度、有机质成熟

度、矿物组成、脆性、力学参数、物性、含气量、厚度等参数开展页岩储层评价,在页岩油气“评层选区”阶段具有重要意义。随着页岩油气大规模开发对提质增效的迫切需求,以沉积作用类型作为约束条件开展储层精细评价势在必行。

深水牵引流沉积是四川盆地五峰组-龙马溪组优质页岩储层,硅质、富孔隙有机质含量高,黏土矿物含量低。深水重力流沉积的颗粒粒径大小相差悬殊,成分和结构成熟度低,压实作用强烈,有机质承担上覆地层压力,有机孔的密度降低、孔径减小,是较差的页岩储层。静水沉积的脆性矿物(石英、方解石、白云石)和塑性矿物(黏土)以及富孔隙有机质(富孔隙有机硅粒复合体、富孔隙有机黏粒复合体和富孔隙纯净有机质)含量变化大,其中脆性矿物含量高、富孔隙有机质含量高、黏土含量低者为好储层,脆性矿物含量高、富孔隙有机质含量偏低、黏土含量偏低者为较好储层,脆性矿物含量偏低、富孔隙有机质含量偏低、黏土含量高者为较差储层。

通过储层精细评价,标定深水牵引流沉积(优质储层)在甜点段的分布位置,预测优质储层在横向上的分布区域,圈定水平井铂金靶体,作为页岩气大规模开发提质增效的首选目标。标定脆性矿物含量高、富孔隙有机质含量高、黏土含量低的静水沉积(较好储层)在甜点段的分布位置,圈定黄金靶体,作为页岩气大规模开发增储上产的关键目标。

在缺乏4 nm MAPS但全岩和TOC数据较多时,石英>70%、TOC>10%、碳酸盐<5%、黏土<5%的硅岩视为深水牵引流沉积或优质储层,石英>50%、TOC>5%、碳酸盐>5%、5%<黏土<15%的硅岩和硅质页岩视为静水沉积或较好储层。

5 问题与展望

本文综合笔者研究团队成果,通过岩心、光学显微镜、电子探针显微镜和MAPS技术的有序衔接,观测岩石学特征,开展岩石学表征,解析四川盆地五峰组-龙马溪组海相页岩深水沉积作用,为进一步深化认识页岩沉积作用类型提供典型岩石学标志,为提质增效大规模勘探开发页岩油气提供储层精细评价的有效方法路径,发展和完善细粒沉积学理论。然而,仍有若干问题值得进一步思考。

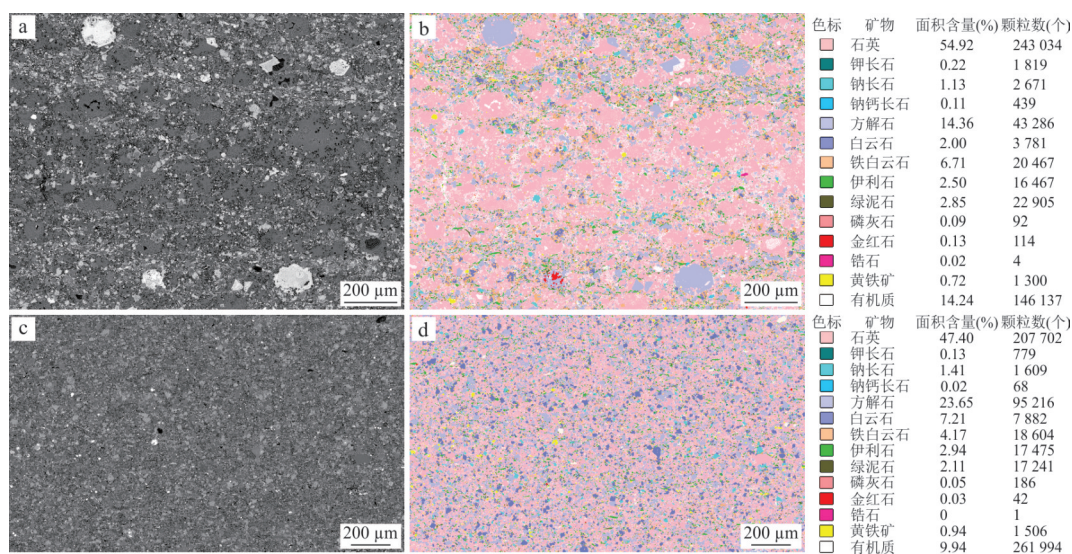
(1)泥页岩中有机质是石油和天然气的物质来源,其丰度、类型和热成熟度是常规和非常规油气系统的关键参数。根据H/C和O/C原子比或岩石

热解的氢指数(HI)和氧指数(OI)可以将泥页岩中有机质划分为4种干酪根类型,而有机岩石学方法根据有机质的反射率、形态、结构以及荧光性可以将泥页岩中有机质划分为多种显微组分,干酪根类型和显微组分可以建立对应关系:I型干酪根以藻类体或沥青质体为主,生烃能力高;II型干酪根以沥青质体为主,生烃能力中等;III型干酪根生烃能力差,以生气为主,对应显微组分为镜质体;IV型干酪根基本无生烃能力,以惰质组为主(刘贝,2023).热模拟实验发现,I或II型干酪根的热演化路径为油前沥青、固体沥青和石油、焦沥青和烃气(周晓峰等,2022a),根据页岩气储层的高分辨率MAPS观察到,I或II型干酪根可能是静水沉积或深水重力流沉积的沉有机黏粒复合体转化的干酪根黏粒复合体(周晓峰等,2022a,2025,2026a),也可能是深水牵引流沉积中缺乏黏土或其他杂质的沉有机质转化的纯净干酪根(Zhou *et al.*,2024,2025);干酪根黏粒复合体的次生有机质包括原位次生有机质和迁移次生有机质,其中原位次生有机质随热演化过程依次为油前沥青黏粒复合体、固体沥青石油黏粒复合体、焦沥青黏粒复合体,迁移次生有机质依次为油前沥青、固体沥青石油和石油、焦沥青化固体沥青石油和焦沥青化石油;纯净干酪根热演化依次形成油前沥青、固体沥青石油和石油、焦沥青化固体沥青石油和焦沥青化石油,其中,原地油前沥青和迁移油前沥青的地球化学成分相似,它们热演化形成的固体沥青石油或焦沥青的化学成分相似,故目前无法分辨原位和迁移油前沥青、固体沥青石油以及焦沥青化固体沥青石油(周晓峰等,2022a,2025,2026a;Zhou *et al.*,2024,2025).随着页岩油气勘探开发的持续推进和高分辨率MAPS的推广与普及,干酪根黏粒复合体、纯净干酪根、油前沥青黏粒复合体、固体沥青石油黏粒复合体、蜂窝状介孔焦沥青黏粒复合体等本文出现的有机质类型的名词,可能成为专业术语,这些有机质类型与I至IV型干酪根和各种显微组分的匹配关系可能是今后一段时间的研究方向,同步扫描透射X射线显微镜技术(Bernard *et al.*,2012)、扫描电镜-激光拉曼联用方法(鲍芳等,2021)、脉冲可协调红外光源与原子力显微镜结合的AFM-IR技术(赵建华等,2025)可能是甄别目前尚无法辨识的原位和迁移有机质的关键技术方法.

(2)莓状黄铁矿赋存状态的多样化为页岩纹层

沉积成岩作用分析提供了有效信息.静水沉积物中,莓状黄铁矿赋存状态的类型完整,包括晶粒融合在一起的过度生长的莓状黄铁矿、晶粒线状接触的莓状黄铁矿、晶粒点状接触的莓状黄铁矿、晶粒漂浮的莓状黄铁矿,在二维平面上它们都具有圆形、近圆形或椭圆形形貌;埋藏成岩过程中,抗压性弱的晶粒漂浮的莓状黄铁矿发生形变成为不规则状黄铁矿晶粒集合体,其中挤入有机质和其他矿物而内部结构出现显著调整,但抗压性强的其他赋存状态的莓状黄铁矿的形貌和内部结构几乎没有发生改变,晶间孔主要充填次生有机质.深水牵引流和深水重力流有一定的流速和破坏作用,可以将上覆水体沉降而来的或水-沉积物界面附近沉积物中的晶粒漂浮的莓状黄铁矿崩解而消失,导致沉积物及页岩的纹层中缺乏形貌不规则、内部充填有机质和其他矿物的黄铁矿集晶.随着MAPS技术在页岩沉积成岩过程分析中的推广和应用,本文关于黄铁矿赋存状态类型的名词可能规范化为描述页岩纳米岩石学特征的术语.

(3)关于 $400\text{ }\mu\text{m}\times 400\text{ }\mu\text{m}$ 范围的MAPS岩石图像数据体对页岩岩相是否具有代表性?答案是肯定的.图16为S-9²和S-9³的背散射图像、QEMSCAN矿物扫描图像数据体及矿物含量和矿物颗粒数量定量分析统计结果,可以看出,在任意一个 $400\text{ }\mu\text{m}\times 400\text{ }\mu\text{m}$ 网格中各种矿物和有机质是相对均匀的.由图16b推算S-9²的 $400\text{ }\mu\text{m}\times 400\text{ }\mu\text{m}$ 网格中矿物和有机质的颗粒总数为47 858个,含量高于1%的矿物的颗粒数由高到低依次是石英(23 146个)、方解石(4 122个)、绿泥石(2 181个)、铁白云石(1 949个)、伊利石(1 568个)、白云石(360个)、钠长石(254个)、黄铁矿(123个),有机质颗粒数为13 917个.由图16d推算S-9³的 $400\text{ }\mu\text{m}\times 400\text{ }\mu\text{m}$ 网格中矿物和有机质的颗粒总数为42 020个,含量高于1%的矿物的颗粒数由高到低依次是石英(13 846个)、方解石(6 347个)、铁白云石(1 240个)、伊利石(1 165个)、绿泥石(1 149个)、白云石(525个)、钠长石(107个)、黄铁矿(100个),有机质颗粒数为17 466个.相比于300个颗粒记点统计确定砂岩岩相而言,通过颗粒数超40 000个的 $400\text{ }\mu\text{m}\times 400\text{ }\mu\text{m}$ MAPS开展“相面法”估算页岩岩相是可行的.对于含大量粗颗粒的深水重力流沉积和含放射虫页岩,需要通过光学显微镜、电子探针显微镜和MAPS技术的有序衔接定岩相.

图 16 S-9²和S-9³的背散射图像和矿物扫描图像及结果Fig.16 Backscatter images and mineral scanning images and their results of S-9² and S-9³

a. S-9², 背散射图像; b. 图 a 的矿物扫描图像及矿物与有机质的含量和颗粒数; c. S-9³, 背散射图像; d. 图 c 的矿物扫描图像及矿物与有机质的含量和颗粒数. 背散射图像和矿物扫描图像采集于中国科学院地质与地球物理研究所微纳结构和岩心分析实验室, 仪器型号为 QEMSCAN 650F, 分辨率 1 μm

(4)传统观点认为海相页岩为海洋表层富氧、深层缺氧环境的静水沉积, 表层富氧水体初级生产力高, 提供了充裕的有机质和内碎屑(生物硅和钙), 深层缺氧水体有利于有机质保存, 通常采用地球化学方法定量描述深层水体的氧化还原状态、有机质的富集规律和生物硅的含量(王淑芳等, 2014; 邱振等, 2021). 然而, 笔者团队通过观测纳米岩石学特征, 开展纳米岩石学表征, 查明各种矿物和有机质的赋存状态及相互关系, 正演沉积成岩过程, 解析四川盆地五峰组-龙马溪组海相页岩纹层为静水沉积、深水牵引流沉积和深水重力流沉积, 并提炼出了识别各种沉积作用的典型纳米岩石学标志. 建议重视 MAPS 岩石图像数据体作为第一性资料, 尤其是含放射虫硅质页岩的 MAPS 岩石图像数据体可以作为解开页岩形成过程的金钥匙, 其他资料的应用需要以纳米岩石学特征的解析作为基础, 唯有如此才能更加合理地解释海相页岩深水沉积作用及精细评价页岩储层.

(5)MAPS 岩石图像数据体是新事物, 以其作为第一性资料开展页岩沉积成岩作用研究刚刚起步, 目前尚难以判断各种沉积作用的更多详细信息, 如静水沉积作用的富氧、稀氧和缺氧的具体水体深度, 深水牵引流是内波、内潮汐还是等深流和流速大小以及底栖微生物的生存环境, 深水重力流的流速以及是否存在不同

重力流的流态转化, CSD、CLD、CCD 具体深度等等. 这些问题在通过 MAPS 岩石图像数据体解析和室内实验模拟海相页岩深水沉积的资料不断积累的过程中才能够逐步得以解决.

6 结论

(1)四川盆地五峰组-龙马溪组页岩为静水沉积、深水重力流沉积和深水牵引流沉积的交互叠置, 含放射虫硅岩和硅质页岩纹层是开展海相页岩深水沉积作用分析的首选岩相.

(2)静水沉积的岩石学鉴别标志: ①岩石骨架颗粒间发育富孔隙有机黏粒复合体; ②莓状黄铁矿类型齐全; ③近水平条带状笔石. 深水重力流沉积的岩石学鉴别标志: ①粗粒陆源石英和浅水介屑悬浮在细粒物质中; ②细粒物质由石英、方解石、白云石、黄铁矿、黏土、有机质等组成, 有机黏粒复合体是有机质的常见赋存形式; ③普遍可见过度生长的莓状黄铁矿、晶粒线状接触的莓状黄铁矿和矿物挤入晶间孔形成晶粒接触关系复杂的莓状黄铁矿. 深水牵引流沉积的岩石学鉴别标志: ①岩石骨架颗粒间充填富孔隙纯净有机质; ②过度生长的莓状黄铁矿和晶粒线状接触的莓状黄铁矿; ③陆源石英颗粒表面发育生物硅膜.

(3)海洋沉积环境与沉积作用类型结合是合理

解释矿物和有机质赋存状态与成因以及页岩纹层赋存形式与成因的约束条件,分沉积作用类型开展储层精细评价是页岩气提质增效开发的有效路径。

References

- Bao, F., Yu, L. J., Rui, X. Q., et al., 2021. Microstructure and Electron Microscope-Raman Study on Pore Heterogeneity of Organic Matter in Shale. *Petroleum Geology and Experiment*, 43(5): 871–879 (in Chinese with English abstract).
- Bernard, S., Horsfield, B., Schulz, H. M., et al., 2012. Geochemical Evolution of Organic-Rich Shales with Increasing Maturity: A STXM and TEM Study of the Posidonia Shale (Lower Toarcian, Northern Germany). *Marine and Petroleum Geology*, 31(1): 70–89. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2011.05.010>
- Cai, J. G., Zeng, X., Wei, H. L., et al., 2019. From Water Body to Sediments: Exploring the Depositional Processes of Organic Matter and Their Implications. *Journal of Palaeogeography*, 21(1): 49–66 (in Chinese with English abstract).
- Cai, L. X., Yang, T., Tian, J. C., et al., 2023. Advances in Studies of Development and Growth Mechanisms of Clay Minerals in Tight Sandstone Reservoirs. *Acta Sedimentologica Sinica*, 41(6): 1859–1889 (in Chinese with English abstract).
- Chen, Z. Y., Liu, R., Tan, X. C., et al., 2023. Implications of Multi-Source Quartz on Shale-Gas Enrichment in the Wufeng-Longmaxi Shale of Changning Area in Southern Margin of Sichuan Basin, China. *Journal of Palaeogeography*, 25(4): 920–930 (in Chinese with English abstract).
- Cheng, L. X., Wang, Y. J., Chen, H. D., et al., 2013. Sedimentary and Burial Environment of Black Shales of Sinian to Early Palaeozoic in Upper Yangtze Region. *Acta Petrologica Sinica*, 29(8): 2906–2912 (in Chinese with English abstract).
- Gao, Z. Z., He, Y. B., Liu, C. X., et al., 2006. History, Status and Prospect of Study on Deep-Water Traction Current Deposits. *Journal of Palaeogeography*, 8(3): 331–338 (in Chinese with English abstract).
- Huang, Y. G., 2018. Ecological Modeling of Marine and Terrestrial Paleocommunities in South China and Xinjiang during Permian and Triassic and Marine Redox Variations (Dissertation). China University of Geosciences, Wuhan, 69–73 (in Chinese with English abstract).
- Kong, W. L., Qiu, Z., Zhang, J. Q., et al., 2025. Volcanic Activity and Extraordinarily High Organic Matter Deposition across Ordovician-Silurian Transition: A Case Study from South China. *Earth Science*, 50(12): 4583–4603 (in Chinese with English abstract).
- Li, C., Cheng, M., Algeo, T. J., et al., 2015. A Theoretical Prediction of Chemical Zonation in Early Oceans (>520 Ma). *Scientia Sinica Terrae*, 45(12): 1829–1838 (in Chinese).
- Liu, B., 2023. Organic Matter in Shale: Types, Thermal Evolution and Organic Porosity. *Earth Science*, 48(12): 4641–4657 (in Chinese with English abstract).
- Liu, C. L., Zhang, J. Y., Hu, Z. Q., et al., 2026. A Review of Coupling Modes between Shale Gas Geological and Engineering Sweet Spots in Worldwide Typical Sedimentary Basins. *Acta Geoscientica Sinica*, 1–16 (in Chinese with English abstract). <https://link.cnki.net/urlid/11.3474.P.20260604.1311.002>
- Liu, S. G., Deng, B., Sun, W., et al., 2018. Sichuan Basin: A Superimposed Basin Formed under the Control of Peripheral Activities. *Chinese Journal of Geology*, 53(1): 308–326 (in Chinese with English abstract).
- Loucks, R. G., Reed, R. M., 2014. Scanning-Electron-Microscope Petrographic Evidence for Distinguishing Organic-Matter Pores Associated with Depositional Organic Matter versus Migrated Organic Matter in Mudrocks. *Gulf Coast Association of Geological Societies Journal*, 3: 51–60. <http://www.gcags.org/Journal/2014.GCAGS.Journal/GCAGS.Journal.2014.vol3.p51-60>
- Loucks, R. G., Reed, R. M., Ruppel, S. C., et al., 2012. Spectrum of Pore Types and Networks in Mudrocks and a Descriptive Classification for Matrix-Related Mudrock Pores. *AAPG Bulletin*, 96(6): 1071–1098. <https://doi.org/10.1306/08171111061>
- Lu, B., Qiu, Z., Zhou, C. M., et al., 2021. Progress and Prospects in the Physical Simulation of Mudstone Deposition. *Acta Sedimentologica Sinica*, 39(4): 781–793 (in Chinese with English abstract).
- Lu, L. F., Liu, W. X., Wei, Z. H., et al., 2022. Diagenesis of the Silurian Shale, Sichuan Basin: Focus on Pore Development and Preservation. *Acta Sedimentologica Sinica*, 40(1): 73–87 (in Chinese with English abstract).
- Qiu, Z., Wei, H. Y., Liu, H. L., et al., 2021. Accumulation of Sediments with Extraordinary High Organic Matter Content: Insight Gained through Geochemical Characterization of Indicative Elements. *Oil & Gas Geology*, 42(4): 931–948 (in Chinese with English abstract).
- Shanmugam, G., 2013. New Perspectives on Deep-Water Sandstones: Implications. *Petroleum Exploration and Development*, 40(3): 294–301 (in Chinese with English abstract).
- Shi, Z. S., Zhou, T. Q., 2024. Advances and Perspectives in

- the Study of the Genetic Mechanism and Organic Matter Enrichment Models of Marine Fine-Grained Sediment. *Oil & Gas Geology*, 45(4): 910—928 (in Chinese with English abstract).
- Shi, Z. S., Zhang, Y. X., Zeng, F. H., et al., 2025. Main Sedimentary Structure Types of Marine Fine-Grained Terrigenous Clastic Rocks and Their Significance for Shale Gas. *Journal of Palaeogeography*, 27(1): 32—54 (in Chinese with English abstract).
- Wang, D. S., Zhang, J. C., Li, Z., et al., 2022. Formation Mechanism of Framboidal Pyrite and Its Theory Inversion of Paleo-Redox Conditions. *Geology in China*, 49(1): 36—50 (in Chinese with English abstract).
- Wang, S. F., Zou, C. N., Dong, D. Z., et al., 2014. Biogenic Silica of Organic-Rich Shale in Sichuan Basin and Its Significance for Shale Gas. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 50(3): 476—486 (in Chinese with English abstract).
- Wang, X. P., Mou, C. L., Wang, Q. Y., et al., 2015. Diagenesis of Black Shale in Longmaxi Formation, Southern Sichuan Basin and Its Periphery. *Acta Petrolei Sinica*, 36(9): 1035—1047 (in Chinese with English abstract).
- Wang, Y. M., Wang, H. Y., Shen, J. J., et al., 2020. New Discovery and Geological Significance of Thick-Bedded Porphyrite in the Upper Member of Longmaxi Formation of Lower Silurian in Northern Sichuan-Western Hubei Area. *Acta Petrolei Sinica*, 41(11): 1309—1323 (in Chinese with English abstract).
- Wilkin, R. T., Barnes, H. L., Brantley, S. L., 1996. The Size Distribution of Framboidal Pyrite in Modern Sediments: An Indicator of Redox Conditions. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 60(20): 3897—3912. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(96\)00209-8](https://doi.org/10.1016/0016-7037(96)00209-8)
- Xi, B. B., Pan, A. Y., Bao, F., et al., 2023. In-Situ Thermal Simulation Experiment of Single Organic Matter Pore Evolution in Shale. *Petroleum Geology and Experiment*, 45(5): 1016—1025 (in Chinese with English abstract).
- Xiao, K. X., Hu, X. M., Jiang, J. X., et al., 2024. Carbonate Compensation Depth (CCD) Is a Potential Key to Decipher the Cenozoic Surface Carbon Cycle. *Scientia Sinica Terrae*, 54(6): 1769—1785 (in Chinese).
- Yang, R., He, Z. L., Dong, T., et al., 2025. What Are the Key Factors Controlling the Occurrence and Enrichment of Deep Marine Shale Gas in the Middle-Upper Yangtze Region? *Earth Science*, 50(12): 5012—5019 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, G. R., Nie, H. K., Tang, X., et al., 2020. Pyrite Type and Its Effect on Shale Gas Accumulation: A Case Study of Wufeng-Longmaxi Shale in Sichuan Basin and Its Periphery. *Petroleum Geology and Experiment*, 42(3): 459—466 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, J. H., Jin, Z. J., 2021. Mudstone Diagenesis: Research Advances and Prospects. *Acta Sedimentologica Sinica*, 39(1): 58—72 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, J. H., Liu, K. Y., Zhao, S. H., et al., 2025. Response of Organic Matter Pore Development to Functional Groups in Overmature Marine Shale: Insights from AFM-IR Spectroscopy. *Petroleum Exploration and Development*, 52(2): 395—407 (in Chinese with English abstract).
- Zhou, X. F., Guo, W., Li, X. Z., et al., 2022a. Mutual Relation between Organic Matter Types and Pores with Petrological Evidence of Radiolarian Siliceous Shale in Wufeng-Longmaxi Formation, Sichuan Basin. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)*, 46(5): 12—22 (in Chinese with English abstract).
- Zhou, X. F., Li, X. Z., Guo, W., et al., 2022b. Characteristics, Formation Mechanism and Influence on Physical Properties of Carbonate Minerals in Shale Reservoir of Wufeng-Longmaxi Formations, Sichuan Basin. *Natural Gas Geoscience*, 33(5): 775—788 (in Chinese with English abstract).
- Zhou, X. F., Guo, W., Li, X. Z., et al., 2024. Deciphering Nano-Resolution Petrological Characteristics of the Siliceous Shale at the Bottom of the Longmaxi Formation in the Zigong Area, Sichuan Basin, China: Deep-Water Microbialites. *Minerals*, 14(10): 1020. <https://doi.org/10.3390/min14101020>
- Zhou, X. F., Guo, W., Li, X. Z., et al., 2025. Formation Process of the Guanyinqiao Bed of Upper Ordovician Wufeng Formation in Sichuan Basin and Its Adjacent Area through Petrological Evidence. *Journal of Palaeogeography*, 27(6): 1452—1465 (in Chinese with English abstract).
- Zhou, X. F., Guo, W., Li, X. Z., et al., 2026a. Nanoscale Petrological Characterization Elucidating Hydrocarbon Generation and Pore Formation during the Thermal Evolution of Organic Matters in Shale: Taking the Shale Gas Sweet Spot Section in the Longmaxi Formation of the Huang 202 Block in Yuxi Gas Field of the Sichuan Basin as an Example. *Natural Gas Geoscience*, 37(6): 1176—1194 (in Chinese with English abstract).
- Zhou, X. F., Guo, W., Li, X. Z., et al., 2026b. Deciphering Nano-Resolution Petrological Characterization of Radiolarian Siliceous Shale in Wufeng Formation, Sichuan Basin, China. *Acta Geologica Sinica*, 100(3): 1030—1049 (in Chinese with English abstract).
- Zhou, X. F., Zhao, J., Yan, B. N., et al., 2025. Deep-Water Traction Current Sedimentation in the Lower Si-

lurian Longmaxi Formation Siliceous Shales, Weiuyan Area, Sichuan Basin, China, Using Nano-Resolution Petrological Evidence. *Minerals*, 15(7): 723. <https://doi.org/10.3390/min15070723>

中文参考文献

- 鲍芳, 俞凌杰, 芮晓庆, 等, 2021. 页岩中有机质孔隙非均质性的微观结构及电镜-拉曼联用研究. *石油实验地质*, 43(5): 871-879.
- 蔡进功, 曾翔, 韦海伦, 等, 2019. 从水体到沉积物: 探寻有机质的沉积过程及其意义. *古地理学报*, 21(1): 49-66.
- 蔡来星, 杨田, 田景春, 等, 2023. 致密砂岩储层中黏土矿物发育特征及其生长机理研究进展. *沉积学报*, 41(6): 1859-1889.
- 陈增裕, 刘睿, 谭秀成, 等, 2023. 四川盆地南缘长宁地区五峰组-龙马溪组页岩内多源石英对页岩气富集的意义. *古地理学报*, 25(4): 920-930.
- 程立雪, 王元君, 陈洪德, 等, 2013. 上扬子地区震旦系-早古生界黑色页岩的沉积和埋藏环境. *岩石学报*, 29(8): 2906-2912.
- 高振中, 何幼斌, 刘成鑫, 等, 2006. 深水牵引流沉积的研究历程、现状与前景. *古地理学报*, 8(3): 331-338.
- 黄元耕, 2018. 华南及新疆地区二叠纪至三叠纪海洋、陆地古群落模拟及海洋氧化还原环境变化研究 (博士学位论文). 武汉: 中国地质大学, 69-73.
- 孔维亮, 邱振, 张家强, 等, 2025. 奥陶纪-志留纪转折期火山活动与异常高有机质沉积: 以中国华南地区为例. *地球科学*, 50(12): 4583-4603.
- 李超, 程猛, Algeo, T. J., 等, 2015. 早期地球海洋水化学分带的理论预测. *中国科学: 地球科学*, 45(12): 1829-1838.
- 刘贝, 2023. 泥页岩中有机质: 类型、热演化与有机孔隙. *地球科学*, 48(12): 4641-4657.
- 刘成林, 张婧瑶, 胡宗全, 等, 2026. 全球典型沉积盆地页岩气地质-工程甜点耦合模式综述. *地球学报*, 1-16. <https://link.cnki.net/urlid/11.3474.P.20260604.1311.002>
- 刘树根, 邓宾, 孙玮, 等, 2018. 四川盆地: 周缘活动主控下形成的叠合盆地. *地质科学*, 53(1): 308-326.
- 卢斌, 邱振, 周川闽, 等, 2021. 泥页岩沉积物理模拟研究进展与发展趋势. *沉积学报*, 39(4): 781-793.
- 卢龙飞, 刘伟新, 魏志红, 等, 2022. 四川盆地志留系页岩成岩特征及其对孔隙发育与保存的控制. *沉积学报*, 40(1): 73-87.
- 邱振, 韦恒叶, 刘翰林, 等, 2021. 异常高有机质沉积富集过程与元素地球化学特征. *石油与天然气地质*, 42(4): 931-948.
- Shanmugam, G., 2013. 深水砂体成因研究新进展. *石油勘探与开发*, 40(3): 294-301.
- 施振生, 周天琪, 2024. 海相细粒沉积成因机制与有机质富

- 集模式研究进展. *石油与天然气地质*, 45(4): 910-928.
- 施振生, 张亚雄, 曾番惠, 等, 2025. 海相细粒陆源碎屑岩主要沉积构造类型及页岩气意义. *古地理学报*, 27(1): 32-54.
- 王东升, 张金川, 李振, 等, 2022. 草莓状黄铁矿的形成机制探讨及其对古氧化-还原环境的反演. *中国地质*, 49(1): 36-50.
- 王淑芳, 邹才能, 董大忠, 等, 2014. 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. *北京大学学报(自然科学版)*, 50(3): 476-486.
- 王秀平, 牟传龙, 王启宇, 等, 2015. 川南及邻区龙马溪组黑色岩系成岩作用. *石油学报*, 36(9): 1035-1047.
- 王玉满, 王红岩, 沈均均, 等, 2020. 川北-鄂西地区下志留统龙马溪组上段厚层斑脱岩的新发现及地质意义. *石油学报*, 41(11): 1309-1323.
- 席斌斌, 潘安阳, 鲍芳, 等, 2023. 页岩中单体有机质孔隙演化的原位热模拟实验. *石油实验地质*, 45(5): 1016-1025.
- 肖开迅, 胡修棉, 蒋璟鑫, 等, 2024. 碳酸盐补偿深度(CCD)是解密新生代表层碳循环的潜在钥匙. *中国科学: 地球科学*, 54(6): 1769-1785.
- 杨锐, 何治亮, 董田, 等, 2025. 中上扬子海相深层页岩气赋存和富集的关键因素是什么? *地球科学*, 50(12): 5012-5019.
- 张光荣, 聂海宽, 唐玄, 等, 2020. 页岩中黄铁矿类型及其对页岩气富集的影响: 以四川盆地及其周缘五峰组-龙马溪组页岩为例. *石油实验地质*, 42(3): 459-466.
- 赵建华, 金之钧, 2021. 泥岩成岩作用研究进展与展望. *沉积学报*, 39(1): 58-72.
- 赵建华, 刘可禹, 赵生辉, 等, 2025. 海相过成熟页岩有机质孔隙与分子官能团的响应关系: 来自基于原子力显微镜红外光谱的证据. *石油勘探与开发*, 52(2): 395-407.
- 周晓峰, 郭伟, 李熙喆, 等, 2022a. 四川盆地五峰组-龙马溪组有机质类型与有机孔配置的放射虫硅质页岩岩石学证据. *中国石油大学学报(自然科学版)*, 46(5): 12-22.
- 周晓峰, 李熙喆, 郭伟, 等, 2022b. 四川盆地五峰组-龙马溪组页岩储层中碳酸盐矿物特征、形成机制及对储层物性影响. *天然气地球科学*, 33(5): 775-788.
- 周晓峰, 郭伟, 李熙喆, 等, 2025. 岩石学证据约束四川盆地及邻区上奥陶统五峰组观音桥层形成过程. *古地理学报*, 27(6): 1452-1465.
- 周晓峰, 郭伟, 李熙喆, 等, 2026a. 纳米岩石证据约束页岩有机质热演化生烃成孔过程——以四川盆地渝西气田黄202区块龙马溪组页岩气甜点段为例. *天然气地球科学*, 37(6): 1176-1194.
- 周晓峰, 郭伟, 李熙喆, 等, 2026b. 四川盆地五峰组放射虫硅质页岩纳米岩石特征解析. *地质学报*, 100(3): 1030-1049.