

文章编号: 1671-1505(2026)03-0918-16 DOI:10.7605/gdxb.2026.121

川东红星地区二叠系页岩硅质成因及其地质意义*

高山林¹ 李 雄² 刘皓天² 王惠君³

1 中国石油化工股份有限公司油田勘探开发事业部, 北京 100728

2 中国石油化工股份有限公司江汉油田分公司, 湖北潜江 433124

3 中国石油化工股份有限公司江汉油田分公司勘探开发研究院, 湖北武汉 430223

摘 要 硅质矿物的成因类型对页岩储集层的品质具有差异化控制作用, 但现有储集层评价体系多以石英总量为参数, 忽视了不同成因硅质的储集层效应差异。以川东红星地区二叠系吴家坪组二段(吴二段)和茅口组四段(茅四段)页岩为对象, 综合应用扫描电镜—能谱分析、X 射线衍射和主微量元素测试等方法, 系统开展了 2 段地层的硅质来源判别、成因及其地质意义探讨。结果表明: (1) 红星地区吴二段和茅四段均发育碎屑石英和以放射虫来源为主的生物成因石英(结构保存型与结构改造型), 热液成因硅质缺失; 在吴二段硅质中, 碎屑硅绝对含量为 21.7%, 生物硅绝对含量为 21.22%, 为碎屑—生物混合来源, 而茅四段以生物硅为主导(20.71%), 碎屑硅含量极低(3.34%)。(2) 提出了 2 种硅质的差异富集模式, 其中吴二段为深水陆棚相, 兼具陆源输入与高生产力双重优势, 形成“叠加型富集模式”, 而茅四段碳酸盐矿物极度富集, 陆源输入极弱, 导致生物硅相对占比被动升高, 形成“碳酸盐稀释控制型模式”。(3) 生物硅含量对页岩有机质富集、孔隙保存和可压裂性均具有正向效应, 红星地区吴二段页岩工程靶窗从富有机碳中硅岩相调整为富有机碳高硅岩相后, 测试日产气量由 $11.67 \times 10^4 \text{ m}^3$ 提高至 $26.64 \times 10^4 \text{ m}^3$, 验证了生物硅含量在“工程甜点”优选中的关键作用。建议完善包括不同成因硅质含量和岩石力学参数的甜点综合评价体系, 进一步指导川东二叠系页岩气甜点的精准选层与高效开发。

关键词 硅质来源 硅质成因 生物硅 储集层可压裂性 页岩 二叠系 四川盆地

第一作者简介 高山林, 男, 1966 年生, 博士, 教授级高级工程师, 从事含油气盆地分析及勘探管理。E-mail: gaoshanlin@sinopec.com。

通讯作者简介 王惠君, 女, 1993 年生, 博士(后), 工程师, 主要从事沉积储集层研究。E-mail: 18062704718@163.com。

中图分类号: P588.22 文献标志码: A

Silica genesis and geological significance of the Permian shales in Hongxing area, eastern Sichuan Basin

GAO Shanlin¹ LI Xiong² LIU Haotian² WANG Huijun³

1 Petroleum Exploration and Production Branch of Sinopec, Beijing 100728, China

2 Sinopec Jiangnan Oilfield Company, Hubei Qianjiang 433124, China

谨以此文纪念冯增昭先生诞辰 100 周年。

* 国家科技重大专项(编号: 2025ZD1400403)、中国博士后科学基金项目(编号: 2024M753623)和中石化科技项目(编号: P24050)共同资助。[Co-funded by the Major National Science and Technology Project of China (No. 2025ZD1400403), the China Postdoctoral Science Foundation (No. 2024M753623), and the Sinopec Science and Technology Project (No. P24050)]

收稿日期: 2026-04-08 改回日期: 2026-04-29

3 Research Institute of Exploration and Development, Sinopec Jiangnan Oilfield Company, Wuhan 430223, China

Abstract The genetic type of siliceous minerals exerts differential controls on shale reservoir quality; however, current reservoir evaluation frameworks predominantly employ total quartz content as a proxy, neglecting the distinct reservoir effects associated with silica of different origins. This study systematically investigates the silica origin, genesis, and geological significance of Permian shales from the Wujiaping Formation Member 2 (Wu-2 Member) and Maokou Formation Member 4 (Mao-4 Member) in the Hongxing area, eastern Sichuan Basin, using an integrated approach combining scanning electron microscopy with energy-dispersive spectroscopy (SEM-EDS), X-ray diffraction (XRD), and major-trace element geochemistry. The key findings are as follows: (1) Both members contain detrital quartz and biogenic quartz – the latter encompassing structurally preserved (radiolarian fossils) and structurally recrystallized (microcrystalline quartz aggregates) varieties – while hydrothermal silica is absent. The Wu-2 Member is characterized by mixed detrital-biogenic silica (absolute detrital silica content: 21.7%; absolute biogenic silica content: 21.22%), whereas the Mao-4 Member is dominated by biogenic silica (absolute content 20.71%) with negligible detrital input (absolute content 3.34%). (2) Two contrasting silica enrichment models are proposed: a “superimposed enrichment model” for the Wu-2 Member, where deep-water shelf conditions sustained both substantial terrigenous supply and elevated bioproductivity; and a “carbonate dilution-controlled model” for the Mao-4 Member, where pervasive carbonate minerals accumulation overwhelmingly diluted siliceous components, passively elevating the relative proportion of biogenic silica. (3) Biogenic silica content serves as positive effects for evaluating organic matter enrichment, pore preservation, and reservoir fracability. Shifting the target window in the Hongxing area from carbon-rich, medium-silica lithofacies to carbon-rich, high-silica lithofacies increased daily test gas production from $11.67 \times 10^4 \text{ m}^3$ to $26.64 \times 10^4 \text{ m}^3$, demonstrating the pivotal role of biogenic silica content in engineering sweet-spot selection. A comprehensive evaluation framework integrating different genetic silica content and rock mechanical parameters is therefore recommended to guide precise layer selection and efficient development of Permian shale gas in the eastern Sichuan Basin.

Key words silica origin, silica genesis, biogenic silica, reservoir fracability, shale, Permian, Sichuan Basin

About the first author GAO Shanlin, born in 1966, is a Ph.D. and research professor. He is mainly engaged in analysis and exploration management of oil and gas basins. E-mail: gaoshanlin@sinopec.com.

About the corresponding author WANG Huijun, born in 1993, is a Ph.D. and engineer. She is mainly engaged in research on sedimentary reservoir. E-mail: 18062704718@163.com.

页岩储集层强烈的非均质性是制约页岩油气富集规律和高效开发的核心要素，而这种非均质性源于其多样的沉积环境、复杂的矿物组成、差异化的成岩演化以及多期次的构造改造 (Zhao *et al.*, 2017a; 何涛华等, 2022; 高山林等, 2025)。硅质矿物是组成页岩的主要脆性矿物之一，其含量与分布直接影响到页岩的储集性能与压裂效果 (Zhang

et al., 2016; Yang *et al.*, 2018; Dong *et al.*, 2019), 因此被视为页岩储集层品质评价的重要指标。然而，总硅质含量相同的页岩因成因背景的差异而表现出截然不同的储集层物性和含气性 (Loucks and Ruppel, 2007; Milliken *et al.*, 2012), 表明硅质的形成过程可能是控制储集层品质差异的重要因素。前人研究认为，硅质的形成过程与有机质富集和孔

隙结构定型存在密切的联系(遇昊等, 2012; 易婷等, 2020; 杨雪等, 2024; 杜安业等, 2026), 进一步表明有必要从成因角度重新审视硅质矿物对页岩储集层的控制作用。

页岩中的硅质来源和成因类型具有显著的多样性, 主要包括陆源碎屑输入、生物硅质沉积、黏土矿物成岩转化及热液成因(赵建华等, 2016; Yang *et al.*, 2018; He *et al.*, 2020, 2023; 梁兴等, 2025; Nie *et al.*, 2025)。大量研究表明, 不同成因类型的硅质与总有机碳(TOC)及孔隙发育之间的关系存在显著差异, 且这一规律在海相和陆相页岩中具有的一致性。在海相页岩中, 生物硅通过提供有机质沉降载体和硅化封存等机制促进了有机质富集(Knapp *et al.*, 2020), 硅质矿物含量常与 TOC 呈正相关(Jin *et al.*, 2018), 与储集层的孔隙度及渗透率多呈正相关(王威等, 2024; 梁兴等, 2025); 在陆相页岩中同样如此, 如松辽盆地青山口组、鄂尔多斯盆地延长组、准噶尔盆地风城组页岩中的自生硅质均与 TOC 含量和孔隙度呈正相关(白斌等, 2022; 雷海艳等, 2022)。反之, 当页岩中的硅质以陆源碎屑为主时, 硅质含量与 TOC 含量及储集层物性的关系则表现为负相关或不相关, 例如, 四川盆地井研—资阳地区筇竹寺组海相页岩中的硅质主要为陆源长英质而非自生硅质, 随着长英质含量减少, TOC 含量反而呈增加趋势; 而在自生硅质占比较低的陆相页岩储集层中, 总硅质含量与 TOC 含量同样呈负相关(刘国恒等, 2019), 与孔隙发育程度的相关性也因陆源碎屑占比、成岩阶段、地层压力等的不同而存在差异(Peltonen *et al.*, 2009; Xin *et al.*, 2025)。系统辨识硅质成因来源并厘清其对有机质富集、孔隙发育和可压裂性的差异化控制机理, 是实现页岩气“甜点”精准评价和高效勘探开发的重要基础。

四川盆地东部红星地区二叠系页岩气勘探近年来取得了重大突破, 吴家坪组二段(吴二段)已提交页岩气探明储量 $1650 \times 10^8 \text{ m}^3$, 为中国首个千亿立方米的二叠系页岩气田, 而茅口组四段(茅四段)页岩在 2023 年也获得工业气流突破, HYM-1 井测试日产气量达 $6.45 \times 10^4 \text{ m}^3$, 表明川东地区茅口组页岩气具有较大的勘探潜力。尽管 2 套页岩层段均表现良好的天然气富集条件, 但目前对这 2 个层段的硅质来源类型、差异化富集机制及其对有

机质富集、储集层物性和可压裂性的控制作用尚缺乏系统研究, 从而制约了“甜点”层段的精准识别和水平井靶窗的科学优选, 成为二叠系页岩气勘探开发亟待解决的关键瓶颈。

针对上述问题, 本研究以川东红星页岩气田二叠系吴二段和茅四段页岩为研究对象, 综合应用薄片观察、扫描电镜-能谱分析(SEM-EDS)、全岩 X 射线衍射、压汞- N_2 吸附- CO_2 吸附联测和地球化学分析方法等, 系统识别不同成因类型硅质的形态特征和分布规律, 定量评估各类硅质的相对贡献, 揭示古沉积环境对成因类型的控制机制, 并阐明不同来源的硅对有机质富集、孔隙结构发育和储层可压裂性的差异化影响。本研究旨在建立基于硅质来源的页岩气“甜点”综合评价方法, 从而为川东地区二叠系页岩气的规模有效开发提供理论依据和技术支撑。

1 区域地质概况

1.1 构造背景

红星地区位于四川盆地东部(图 1-a), 构造上处于扬子克拉通东缘鄂西裂陷槽北段。区域构造样式以 NE-NEE 向石柱复式向斜为主体, 东、西两侧分别受齐岳山和方斗山复式背斜限制, 构成了“隔挡式”构造组合样式。燕山期构造运动以来, 在东南向挤压应力的作用下发育逆冲断裂及相关褶皱构造, 形成方斗山复背斜、石柱复向斜、齐岳山复背斜, 自北而南呈“S”形区域展布。红星地区吴二段和茅四段底界现今埋深 3000~5500 m, 主构造变形期早于二叠纪生气高峰期, 探区内主要发育三级、四级断层(如太平镇断层等), 断层普遍向上消失于嘉陵江组膏盐层中, 向下消失于志留系中, 保存条件良好。

1.2 沉积特征

根据层序界面识别标志, 红星地区二叠系可划分为 7 个三级层序(SQ1—SQ7)。早一中二叠世(SQ1—SQ2), 以台地相石灰岩、泥质灰岩沉积为主。茅四段沉积时期(SQ3), 区域性峨眉地裂运动作用于整个中上扬子地区, 研究区发生明显的构造沉积分异, 斜坡—陆棚相钙质、硅质泥页岩大量发育。SQ4 时期, 受东吴运动影响发生构造抬升, 转为滨岸沼泽与台地相, 发育煤层。吴二段沉积时

期 (SQ5), 受秦岭古特提斯洋俯冲影响, 再次转为以斜坡—陆棚沉积为主 (王惠君等, 2025), 硅质、钙质泥页岩广泛分布。长兴组沉积时期 (SQ6—SQ7), 以上斜坡灰岩沉积为主。

吴二段岩性以灰黑色硅质页岩为主, 夹钙质页岩和含生屑泥晶灰岩, 累计厚度 5~25 m, 可细分为①—⑤共 5 个小层 (图 1-b), 其中②小层厚 1.2~1.5 m, 以石灰岩为主, ①、③—⑤小层以黑色硅质页岩与钙质页岩不等厚互层为特征。茅四段同样可分为 5 个小层, 页岩累计厚度 14.6~28.8 m, 其中①—③小层以硅质—钙质页岩为主, ④—⑤小层以钙质页岩为主。

2 样品采集和测试

本研究对川东红星地区 HY-4 井吴二段和茅四段的页岩样品进行了系统采集, 其中, 吴二段共采集 9 个样品, 茅四段共采集 7 个样品。采样层涵盖各小层的典型岩性, 以确保样品的代表性。

针对页岩中石英的形态和类型, 通过薄片分析和氩离子抛光扫描电镜研究进行识别 (Metwally and Chesnokov, 2012)。本研究使用 Leica 偏光显

微镜在不同放大倍数下分析页岩样品的矿物学特征, 使用 Helios NanoLab 650 聚焦离子束扫描电镜和能谱探测器 (EDS) 进行高分辨率成像和元素分析。

为揭示石英成因机制, 对吴二段 9 个样品和茅四段 7 个样品进行主量元素和微量元素测试。主量元素采用 X 射线荧光光谱法 (XRF) 分析, 微量元素和稀土元素采用 Agilent 7700e 电感耦合等离子体质谱仪 (ICP-MS) 测定。使用 SmartLab 型 X 射线衍射仪 (XRD) 进行全岩矿物测试, 分析精度优于 2%。采用 CS844 碳硫分析仪测定总有机碳 (TOC) 含量, 分析精度为 ±0.1%。系列测试在中国石化江汉油田勘探开发研究院实验中心完成。

为明确石英对储集层物性的影响, 对吴二段 6 个样品进行压汞-N₂ 吸附-低温 CO₂ 吸附联测。低温低压 N₂ 吸附法可探测的最小孔径约为 0.35 nm, CO₂ 吸附法可用来表征微孔 (<2 nm) 的孔隙结构信息, 获得包括孔径分布、孔隙体积、孔隙比表面积等结构参数。N₂ 吸附实验和 CO₂ 吸附实验均采用 Autosorb-iQ3 比表面积及孔径分析仪, 高压压汞法采用 AutoPore 9510 型全自动压汞仪。相关测试

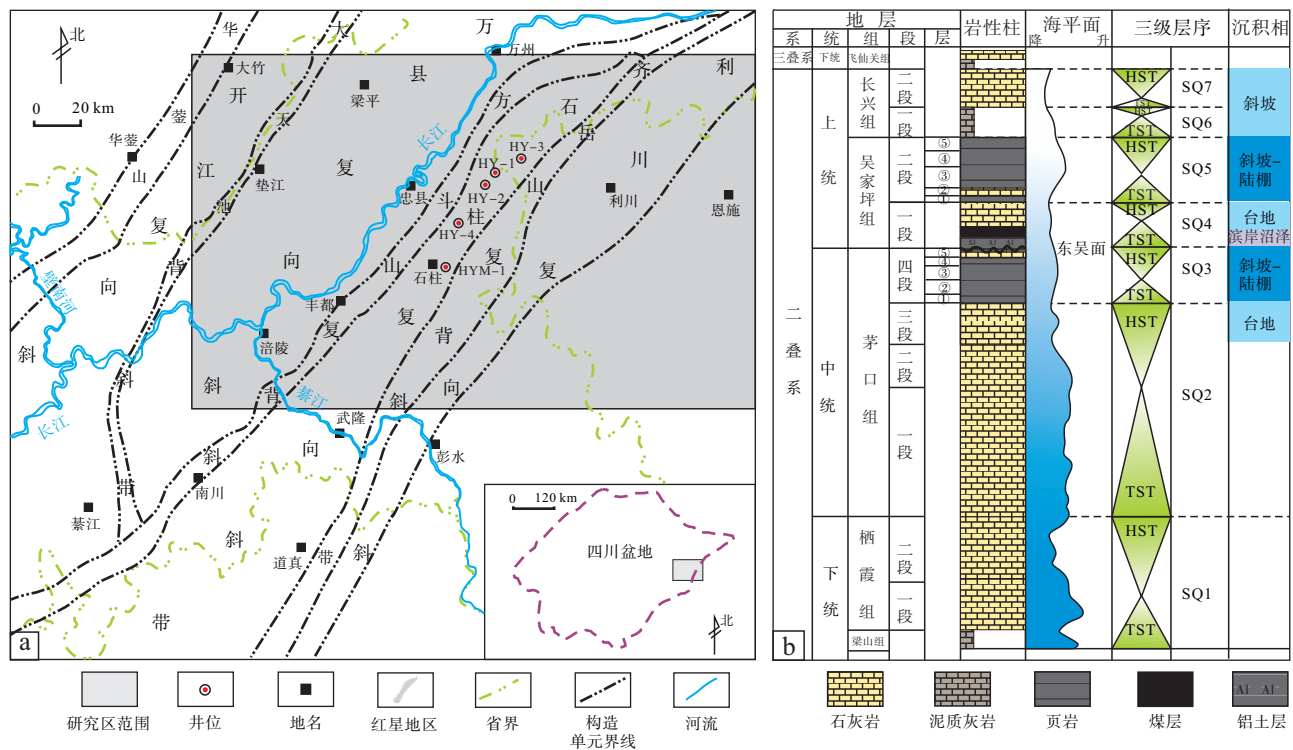


图 1 川东红星地区地理位置 (a) 及其二叠系综合柱状图 (b) (据包汉勇等, 2024; 有修改)

Fig. 1 Geographical location (a) and the Permian comprehensive column chart (b) of Hongxing area, eastern Sichuan Basin (modified from Bao et al., 2024)

在中国地质大学(武汉)资源学院构造与油气资源教育部重点实验室完成。吴二段9个样品和茅四段6个样品的孔隙度测试采用全直径岩心渗透率孔隙度仪,这一测试在中国石化江汉油田勘探开发研究院实验中心完成。

3 结果

3.1 页岩地球化学特征及矿物组成

红星地区吴二段 TOC 为 2.33%~8.35%, 中值 4.97%, 平均 4.89%; 茅四段 TOC 为 1.88%~5.08%, 中值 2.7%, 平均 2.98% (图 2-a)。两者均超过优质烃源岩评价下限 (TOC>2%), 且吴二段有机质丰度更高。2 个层段的有机质类型均为 II₁ 型, 以海相浮游藻类为主要母质来源, 具有较高的生烃潜力。成熟度方面, 等效镜质体反射率 R_0 为 3.04%~3.13%, 已进入过成熟干气阶段 ($R_0>2.0%$)。测试结果表明, 红星地区吴二段和茅四段页岩均具备良好的生气物质基础, 为研究区页岩气富集提供了有利的地球化学条件。

吴二段页岩以石英和碳酸盐矿物为主, 伴生有黏土矿物和黄铁矿 (表 1; 图 2-b)。其中, 石英含量为 30.4%~59.3%, 平均 42.65%; 长石含量为 1.7%~8.3%, 平均 5.06%; 硅质矿物 (石英+长石) 含量为 38.7%~62.4%, 平均 47.71%; 碳酸盐矿物 (方解石+白云石) 含量为 9.2%~31.2%, 平均 22.82%; 黏土矿物含量为 11.6%~31.3%, 平均 21.01%; 黄铁矿含量为 3.6%~19.0%, 平均 8.45%。

茅四段页岩以碳酸盐矿物为主, 石英含量低于吴二段。碳酸盐矿物含量为 52.5%~73.7%, 平均 66.46%; 石英含量为 24.6%~40.5%, 平均 29.40%;

长石含量为 1.38%~4.36%, 平均 2.72%; 硅质矿物含量为 26.03%~46.85%, 平均 32.12%; 黏土矿物含量极低, 为 0~4.1%, 平均仅 0.87%; 黄铁矿含量为 0~1.6%, 平均 0.5%。

3.2 硅质矿物类型

页岩中的硅元素 (Si) 赋存于多种矿物中, 包括石英、长石及黏土矿物等。其中, 长石和黏土矿物属于铝硅酸盐矿物, 其所含硅质与 Al 共生, 来源明确 (陆源碎屑)。石英 (SiO_2) 作为页岩中最主要的纯硅质矿物, 其来源既可为陆源碎屑输入, 也可为生物硅质沉积或成岩转化, 故硅质来源的判别是其成因解释的关键 (Nie *et al.*, 2021, 2025)。因此, 本研究综合运用扫描电镜 (SEM) 和能谱元素分析 (EDS) 技术, 系统识别了吴二段和茅四段页岩中的石英类型及其组成。

3.2.1 碎屑石英

碎屑石英属于陆源组分, 源自母岩风化剥蚀产物, 经流水或风力搬运进入沉积盆地 (Dong *et al.*, 2019)。扫描电镜观察显示, 碎屑石英颗粒呈次棱角一次圆状, 部分颗粒表面发育不规则凹坑和裂纹, 可能为搬运磨蚀或母岩破碎过程中形成的原始形态特征。EDS 分析表明, 碎屑石英主要由 Si 和 O 组成, Si/O 原子比接近理论值, 无明显杂质元素峰 (图 3-c, 3-f), 可以排除长石 (含 Al、K/Na/Ca) 及黏土矿物的干扰。在研究区的 2 个目的层中, 碎屑石英均有分布, 但出现频率较低 (图 3-a, 3-b, 3-d, 3-e), 初步表明沉积期陆源碎屑供给有限。

3.2.2 生物成因石英

基于生物原生结构的保存程度, 生物成因石英可进一步区分为结构保存型和结构改造型 2 个亚类 (Sun *et al.*, 2019)。结构保存型保留了硅质生物骨

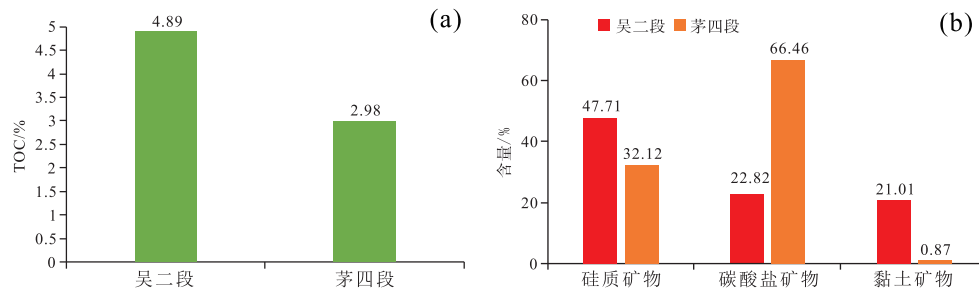


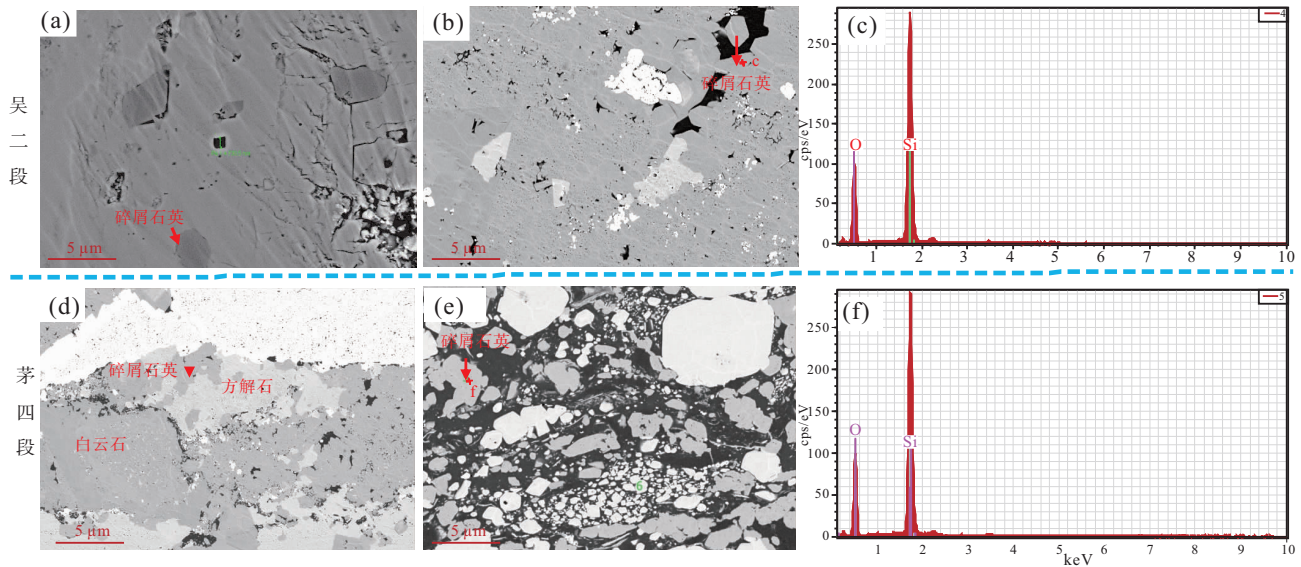
图 2 川东红星地区 HY-4 井吴二段和茅四段 TOC (a) 和矿物含量 (b) 柱状图

Fig. 2 Bar graph of TOC (a) and mineral content (b) of the Wu-2 Member and Mao-4 Member from Well HY-4 in Hongxing area, eastern Sichuan Basin

表 1 川东红星地区 HY-4 井吴二段和茅四段页岩 TOC 和矿物组成

Table 1 TOC and minerals content of the Wu-2 Member and Mao-4 Member shale from Well HY-4 in Hongxing area, eastern Sichuan Basin

编号	地层	埋深/m	TOC/%	矿物相对含量/%						
				石英	钾长石	斜长石	方解石	白云石	黄铁矿	黏土矿物
W1	吴二段	4269.05	3.88	49.0	0.0	1.7	26.6	3.6	7.5	11.6
W2	吴二段	4271.55	5.43	48.4	0.0	5.5	29.1	0.0	3.6	13.4
W3	吴二段	4272.44	8.35	59.3	0.0	3.1	13.4	3.4	8.7	12.1
W4	吴二段	4274.75	3.66	40.8	0.0	3.4	22.6	2.9	7.3	23.0
W5	吴二段	4275.84	2.33	36.2	5.7	0.0	28.5	0.2	5.3	24.1
W6	吴二段	4276.63	3.15	35.6	0.0	3.8	23.0	8.2	8.2	21.2
W7	吴二段	4277.75	4.97	30.4	3.1	5.2	13.0	3.9	19.0	25.4
W8	吴二段	4279.25	5.88	45.9	2.2	4.8	7.7	1.5	10.9	27.0
W9	吴二段	4280.25	6.34	38.3	2.8	4.2	12.4	5.4	5.6	31.3
M1	茅四段	4334.35	2.02	24.6	0.7	0.7	44.6	29.1	0.0	0.3
M2	茅四段	4338.67	1.88	24.9	2.0	2.4	59.4	10.9	0.5	0.0
M3	茅四段	4341.55	4.14	28.7	3.3	0.0	67.4	0.0	0.4	0.0
M4	茅四段	4344.25	5.08	26.4	3.5	0.0	69.2	0.5	0.4	0.0
M5	茅四段	4348.67	2.20	33.4	2.2	0.0	61.2	0.0	1.6	1.6
M6	茅四段	4352.00	2.85	27.1	2.0	0.0	70.3	0.0	0.4	0.1
M7	茅四段	4356.26	2.70	40.5	2.3	0.0	52.5	0.0	0.5	4.1



a, b—碎屑石英，吴二段，4275.50 m；d, e—碎屑石英，茅四段，4330.60 m；c, f—分别为吴二段和茅四段碎屑石英对应的能谱图

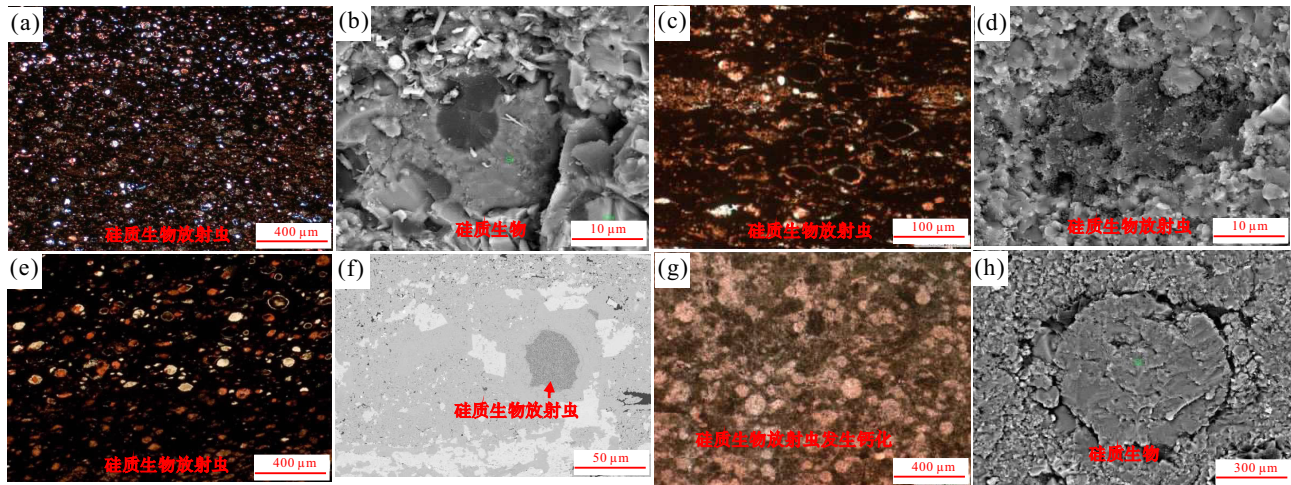
图 3 川东红星地区 HY-4 井吴二段和茅四段碎屑石英的 SEM 图像

Fig. 3 SEM images of detrital quartz of the Wu-2 Member and Mao-4 Member from Well HY-4 in Hongxing area, eastern Sichuan Basin

架的原始形态特征，而结构改造型则在成岩演化过程中经历了显著的溶解—再沉淀重结晶作用，呈现次生晶体结构。

结构保存型生物成因石英主要表现为完整或破

碎的硅质生物化石，包括放射虫个体、海绵骨针以及薄壳软体动物的硅质碎片，个体尺寸从数微米至数十微米不等(图 4-a, 4-c, 4-e, 4-g)。扫描电镜图像清晰显示了放射虫的多孔球形骨架等典型生



a, e—吴二段, 4268.83 m, 单偏光; b, f—吴二段, 4268.83 m, SEM 照片; c, g—茅四段, 4352.51 m, 单偏光;
d, h—4352.51 m, 茅四段, SEM 照片

图 4 川东红星地区 HY-4 井吴二段和茅四段结构保存型生物成因石英照片

Fig. 4 Photos of structure-preserved biogenic quartz of the Wu-2 Member and Mao-4 Member from Well HY-4 in Hongxing area, eastern Sichuan Basin

物结构特征(图 4-b, 4-d, 4-f, 4-h), 能谱分析确认这些生物化石主要由非晶态或低结晶度的蛋白石 (opal) 和微晶石英组成, Si 和 O 为主要组成元素, 偶见少量 Al、K 元素等黏土矿物伴生杂质。

结构改造型生物成因石英已失去可辨识的生物骨骼形态, 表现为分布不均的隐晶质至微晶质石英集合体。在扫描电镜下, 这类石英呈不规则团块状或弥散分布, 晶粒极细, 结晶度较低, 晶界模糊, 集合体尺寸多为 3~10 μm, 局部可见模糊的纹层构造 (Zhao *et al.*, 2017b)。高倍放大后观察显示, 集合体由大量纳米级至亚微米级 (<3 μm) 的细小石英晶粒紧密堆积而成(图 5-a, 5-c, 5-e, 5-g), 微晶石英与有机质呈紧密伴生关系, 或被有机质包裹, 或与有机质形成复合体(图 5-b, 5-d, 5-f, 5-h)。这种空间共生关系对有机质赋存和孔隙发育具有重要意义: 一方面, 硅化作用将有机质封存于微晶石英骨架的孔隙空间中, 有效隔绝了氧化流体的侵入, 有利于有机质的保存与富集 (详见第 3.4 节); 另一方面, 早期成岩阶段形成的微晶石英刚性骨架能够有效抵抗上覆地层的压实作用, 对有机质孔隙, 尤其是微孔和介孔起到重要的保护作用, 从而促进了储集层物性的保持 (详见第 3.5 节)。地层对比表明, 茅四段结构改造型生物成因石英的发育程度远超吴二段, 扫描电镜统计显示其视域占比明显更高。

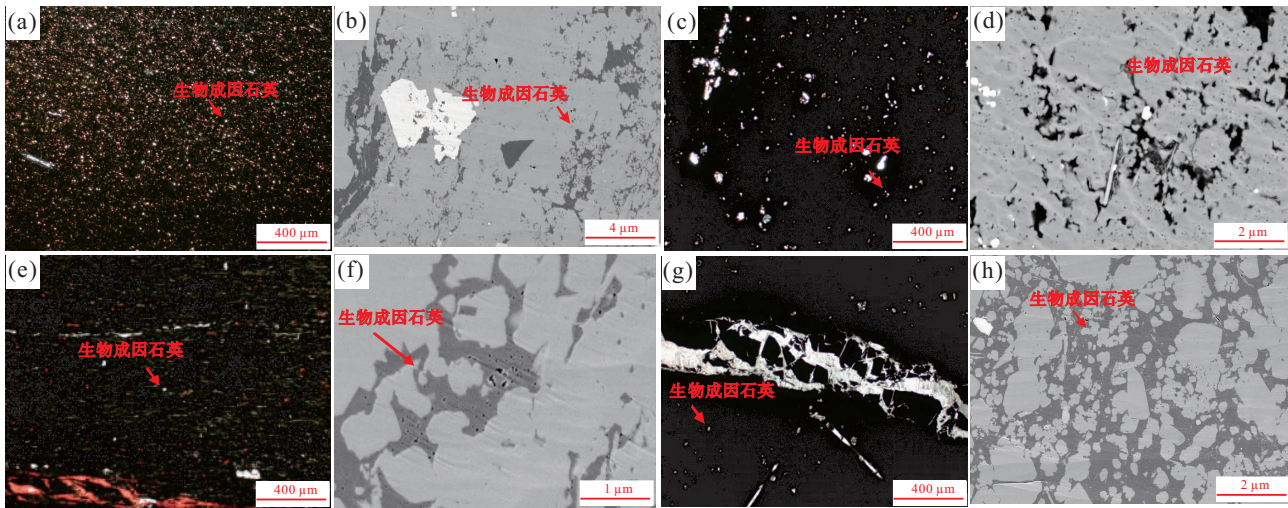
4 讨论

4.1 硅质矿物来源及成因

扫描电镜形貌观察和能谱分析虽能有效识别石英的微观形态特征和元素组成, 但对于定量区分不同成因硅质组分的相对贡献以及深入解析成因机制仍存在一定的局限性。地球化学方法通过主量元素、微量元素及其比值参数的系统分析, 可以定量评估碎屑硅、生物硅和成岩硅的含量, 从而揭示控制硅质来源的根本因素。

4.1.1 热液来源分析

热液活动是海洋环境中硅质沉积的潜在来源之一。热液成因硅质岩通常表现出富 Fe、Mn 而贫 Al 的地球化学特征, 故 Al-Fe-Mn 三元判别图解可快速判别硅质沉积物是否受热液影响 (Yamamoto, 1987)。结果表明, 红星地区吴二段和茅四段 MnO 含量均较低 (0.0024% ~ 0.3388%, 平均 0.0585%), $Al_2O_3/(Al_2O_3+Fe_2O_3)$ 值较高 (0.48~0.81), 所有样品点均位于非热液区域(图 6-a)。此外, 稀土元素 Eu 异常提供了独立的热液判别指标, 正常海水中 Eu 以+3 价形式存在, 而在高温热液环境 (>250 °C) 中 Eu^{3+} 可被还原为 Eu^{2+} 并优先富集于热液流体中, 导致热液成因硅质岩通常表现为正 Eu 异常 (Dubinin, 2004)。研究区二叠系页岩样品均未呈现正 Eu 异常(图 6-b), 指示硅质沉



a, e—吴二段, 4271.00 m, 单偏光; b, f—吴二段, 4271.00 m, SEM 照片; c, g—茅四段, 4334.92 m, 单偏光; d, h—茅四段, 4334.92 m, SEM 照片

图 5 川东红星地区 HY-4 井吴二段和茅四段结构改造型生物成因石英的照片

Fig. 5 Photos of structure-reconstructed biogenic quartz of the Wu-2 Member and Mao-4 Member from Well HY-4 in Hongxing area, eastern Sichuan Basin

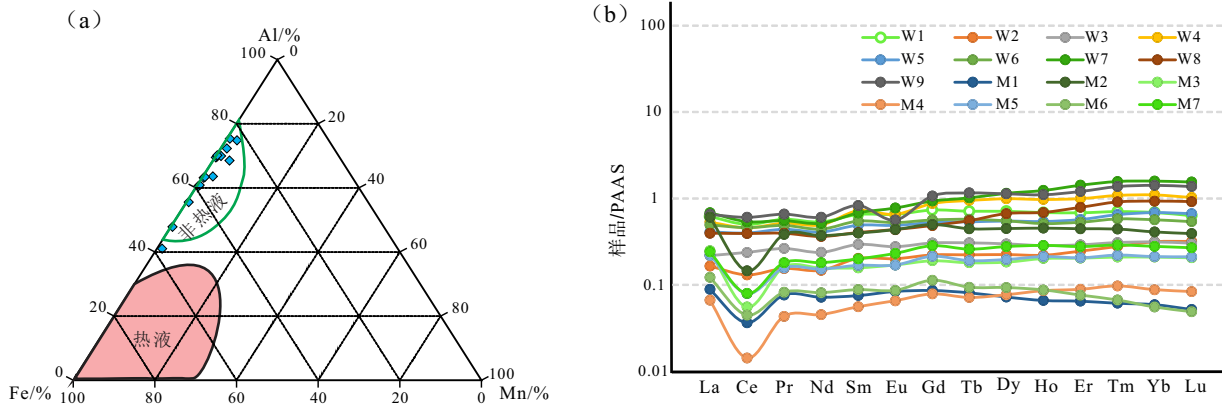


图 6 川东红星地区二叠系页岩 Al-Fe-Mn 三元判别图 (a) 及标准化稀土元素配分模式 (b)

Fig. 6 Al-Fe-Mn ternary discrimination diagram (a) and standardized rare-earth element distribution model diagram (b) of the Permian shale in Hongxing area, eastern Sichuan Basin

积过程未受热液活动影响，这一结果与前人对川东地区二叠系的认识（杜安业等，2026）一致。

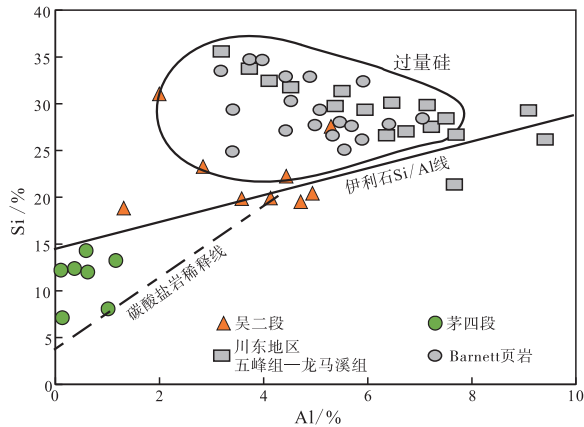
4.1.2 不同来源硅质的定性判别

Si 与 Al 的交会图版是判别硅质来源的有效工具（Dong *et al.*, 2019），样品位于伊利石 Si/Al 线之上表明含有过量硅，即存在生物硅的贡献，位于该线附近或以下则以碎屑硅为主。本研究同时投绘了川东地区五峰组—龙马溪组和北美 Barnett 页岩数据作为对比参照（Rowe *et al.*, 2008; Dong *et al.*, 2019）（图 7）。吴二段样品大多位于伊利石 Si/Al 值线之上的过量硅区域，与五峰组—龙马溪组下段

生物硅富集样品的分布区域部分重叠，表明吴二段含有相当比例的生物硅。茅四段样品在 Si-Al 图版中大部分并未落入过量硅区域，而是分布于伊利石 Si/Al 值线附近甚至偏下方，靠近碳酸盐岩稀释线。这一现象表明茅四段并非缺乏生物硅，而是由于该段碳酸盐矿物极度富集，对 Si 和 Al 的绝对浓度均产生了强烈的稀释效应，致使样品在 Si-Al 空间中向低 Si、低 Al 方向整体偏移，偏离过量硅判别区间。

4.1.3 不同来源硅质的半定量计算

在定性判别的基础上，本研究进一步采用基于主量元素化学计量的分步扣除法对不同来源硅质进



川东五峰组—龙马溪组页岩数据来自 Dong *et al.*, 2019;
Barnett 页岩数据来自 Rowe *et al.*, 2008

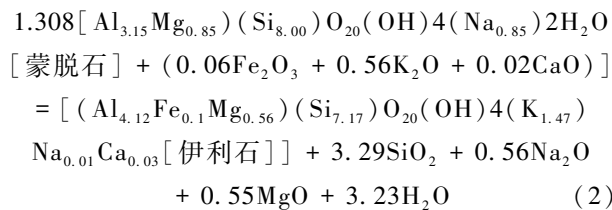
图 7 川东红星地区二叠系页岩 Al-Si 交会图

Fig. 7 Crossplots of Al-Si of the Permian shale in Hongxing area, eastern Sichuan Basin

行定量分离。碎屑硅主要伴随铝硅酸盐矿物进入沉积盆地，其含量可通过 Al 浓度和陆源碎屑的 Si/Al 值进行估算。过量硅（非碎屑硅）含量通过总硅减去碎屑硅获得（Wedepohl, 1971）：

$$Si_{\text{过量}} = Si_{\text{样品}} - [(Si/Al)_{\text{背景}} \times Al_{\text{样品}}] \quad (1)$$

其中 $(Si/Al)_{\text{背景}}$ 值为 3.11（Wedepohl, 1971）。现代泥质沉积物中蒙脱石含量通常高于高岭石和伊利石，在埋藏成岩过程中，蒙脱石经伊利石化反应转变为伊利石，并释放游离 SiO_2 。假设研究区伊利石全部由蒙脱石转化形成，成岩硅含量可基于蒙脱石—伊利石转化的化学计量关系估算（公式 2；Yang *et al.*, 2018）。生物硅含量通过从过量硅中扣除成岩转化硅（公式 3）获得。



$$Si_{\text{生物成因}} = Si_{\text{过量}} - Si_{\text{成岩转化}} \quad (3)$$

定量计算结果显示（表 2；图 8）：吴二段页岩硅质组构成为碎屑硅含量 21.70%、成岩硅含量 5.27%、生物硅含量 21.22%；茅四段页岩硅质组构成为碎屑硅含量 3.34%、成岩硅含量 0.22%、生物硅含量 20.71%。定量计算结果与 Si-Al 图版的定性判别结论较一致，同时也与扫描电镜观察结果相互印证，即吴二段富含结构保存型生物硅

表 2 川东红星地区 HY-4 井吴二段和茅四段页岩硅质组成及其含量

Table 2 Composition and content of silicon in Wu-2 and Mao-4 members shale from Well HY-4 in Hongxing area, eastern Sichuan Basin

编号	层位	岩性	碎屑硅含量 /%	成岩硅含量 /%	生物硅含量 /%
W1	吴二段	页岩	24.30	2.91	15.38
W2	吴二段	页岩	7.72	3.36	29.23
W3	吴二段	页岩	11.73	3.04	51.65
W4	吴二段	页岩	16.67	5.77	27.39
W5	吴二段	页岩	27.68	6.05	8.04
W6	吴二段	页岩	21.01	5.32	16.13
W7	吴二段	页岩	29.02	6.38	8.29
W8	吴二段	页岩	31.11	6.78	21.11
W9	吴二段	页岩	26.05	7.86	13.72
M1	茅四段	页岩	5.95	0.07	11.30
M2	茅四段	页岩	2.16	0.00	24.38
M3	茅四段	页岩	0.60	0.01	25.52
M4	茅四段	页岩	6.82	0.00	21.54
M5	茅四段	页岩	0.77	0.40	14.10
M6	茅四段	页岩	3.64	0.01	22.05
M7	茅四段	页岩	3.47	1.03	26.11

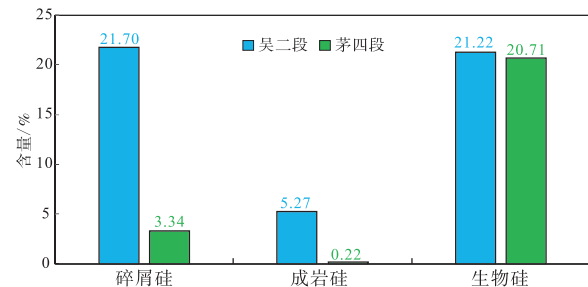


图 8 川东红星地区吴二段和茅四段不同来源硅的含量
Fig. 8 Silica content from different sources of the Wu-2 and Mao-4 members in Hongxing area, eastern Sichuan Basin

（放射虫化石）和较多碎屑石英，茅四段则以结构改造型微晶生物硅大量发育为特征，碎屑组分极少。需要说明的是，该方法存在以下固有局限性：第一，成岩硅来源具有多样性，且公式（2）仅考虑了蒙脱石—伊利石转化这一单一路径；第二，“所有伊利石均由蒙脱石转化”为端元假设，实际沉积物中可能存在原生碎屑伊利石。因此，各组分的定量结果应理解为半定量估算。尽管上述定量计算存在固有的方法误差，但碎屑硅与生物硅含量的相对大小关系和层段间差异现象较为明显，且与

SEM 形态观察和 Si-Al 图版定性判别相互印证。

4.1.4 成因模式

矿物组成分析揭示了吴二段和茅四段在石英含量上的显著差异：吴二段石英含量为 30.4% ~ 59.3%（平均 42.65%），明显高于茅四段的 24.6% ~ 40.5%（平均 29.4%）。定量分离结果显示，吴二段不仅碎屑硅含量（21.7%）远高于茅四段（3.34%），其生物硅含量（21.22%）也高于茅四段（20.71%）。然而，茅四段石英中碎屑组分贫乏，生物硅仍是其石英的主导来源。

氧化还原敏感元素比值分析表明，吴二段和茅四段沉积期水体均处于缺氧环境（表 3；图 9）。V/(V+Ni) 值和 Th/U 值的交汇图解显示，吴二段样品的 Th/U 值为 0.18 ~ 1.07（平均 0.62），V/(V+Ni) 值普遍较高，位于缺氧—厌氧区域；茅四段样品的 Th/U 值为 0.01 ~ 0.17（平均 0.09），V/(V+Ni) 值同样指示缺氧环境。矿物学证据与地球化学指标高度吻合：吴二段黄铁矿普遍发育（含量 3.3% ~ 19.0%，平均 7.9%），茅四段黄铁矿含量虽较低但仍有发育，均指示硫酸盐还原作用的存在，这种缺氧环境有利于有机质和生物硅质的保存。

陆源碎屑输入强度与古水深判别评价的结果，可以用来约束沉积模式。吴二段页岩 Al₂O₃ 含量较高（2.48% ~ 10.00%，平均 6.98%），黏土矿物含量为 11.6% ~ 31.3%（平均 21.01%），而茅四段页岩 Al₂O₃ 含量极低（0.19% ~ 2.19%，平均 1.08%），黏土矿物含量仅为 0% ~ 4.1%（平均 0.87%），反映茅四段沉积时期研究区处于远离陆源的古地理位置。碳酸盐矿物含量可进一步约束古水深。施振生等（2022）研究表明，在远离陆源碎屑供给的深水陆棚区，碳酸盐矿物含量主要受水深控制，水体越浅碳酸盐含量越高，水体越深碳酸盐含量越低。研究区茅四段碳酸盐矿物含量较高（平均 66.46%），远高于吴二段（平均 22.82%），指示茅四段沉积水体明显较浅。综合陆源碎屑输入强度和碳酸盐矿物含量特征，吴二段沉积于靠近陆源的深水陆棚相，茅四段沉积于远离陆源的斜坡—浅水陆棚相。

在上述沉积背景约束下，2 种硅质差异富集模式的形成机制可以得到合理解释。吴二段深水陆棚相兼具陆源碎屑供给和生物硅高生产力双重优势：

表 3 川东红星地区二叠系页岩元素比值参数

Table 3 Element ratio parameters for the Permian shales in Hongxing area, eastern Sichuan Basin

编号	层位	V/(V+Ni)	Th/U	Rb/Zr	V/Ni
W1	吴二段	0.70	0.38	0.84	2.30
W2	吴二段	0.82	0.59	0.31	4.45
W3	吴二段	0.84	0.18	0.65	5.26
W4	吴二段	0.77	0.50	0.99	3.28
W5	吴二段	0.78	0.66	0.90	3.45
W6	吴二段	0.83	1.07	0.80	4.94
W7	吴二段	0.80	0.39	0.94	3.90
W8	吴二段	0.63	0.99	0.62	1.68
W9	吴二段	0.72	0.80	0.52	2.52
M1	茅四段	0.59	0.17	0.52	1.45
M2	茅四段	0.82	0.12	0.57	4.59
M3	茅四段	0.78	0.08	0.53	3.50
M4	茅四段	0.83	0.02	0.13	4.93
M5	茅四段	0.74	0.08	0.65	2.81
M6	茅四段	0.64	0.01	0.13	1.76
M7	茅四段	0.71	0.12	0.50	2.50

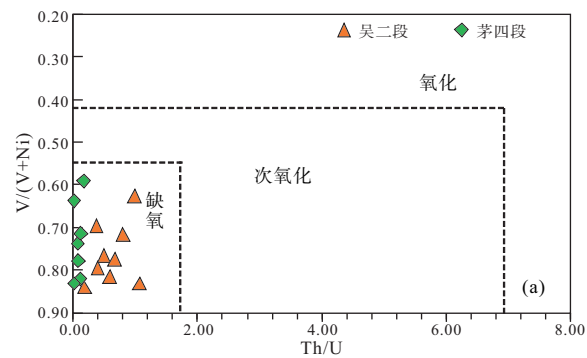


图 9 川东红星地区二叠系页岩 Th/U 与 V/(V+Ni) 交会图

Fig. 9 Crossplots of Th/U vs. V/(V+Ni) of the Permian shales in Hongxing area, eastern Sichuan Basin

一方面，靠近陆源的古地理位置保障了碎屑石英的持续大量输入（碎屑硅含量 21.7%）；另一方面，吴二段发育多层火山灰夹层，Wang 等（2025）基于红星地区吴二段火山灰层的识别及营养元素异常富集特征，论证了火山灰输入通过向水体释放 Fe、P 等营养物质有效提升了古生产力水平，杜安业等（2026）对同区域同时代大隆组的研究也表明，火山活动虽不直接贡献硅质矿物，但通过营养供给间接促进了硅质生物发育和海洋初级生产力的提高，故火山营养效应叠加深水缺氧环境，共同促进了放射虫等硅质生物的繁盛与保存（生物硅含量

21.22%)。碎屑硅与生物硅 2 种来源共同叠加, 形成“叠加型富集模式”。

茅四段浅水斜坡—陆棚相位于碳酸盐岩台地边缘, 沉积格局与吴二段截然不同。碳酸盐矿物富集(平均 66.46%), 对硅质和陆源碎屑组分的绝对浓度均产生强烈稀释效应, 导致样品在 Si-Al 图版中整体向低 Si、低 Al 方向偏移(图 7)。与此同时, 远离陆源的古地理位置导致碎屑物质几乎无法到达沉积区(碎屑硅含量仅 3.34%), 成岩硅因黏土矿物极度贫乏(平均 0.87%)而近乎为零。因此, 茅四段的硅质组成特征并非高生产力主导的结果, 而是碳酸盐矿物压倒性稀释背景下碎屑硅和成岩硅双重缺失, 导致生物硅占比被动升高的产物, 形成“碳酸盐稀释控制型模式”。

4.2 硅质对有机质富集的影响

生物硅对有机质富集的促进作用体现在 2 个方面: 一是硅质浮游生物丰度直接指示古生产力水平(Zhao *et al.*, 2017b); 二是硅质生物骨骼为有机质沉降提供载体——放射虫与藻类共生富集有机碳, 死亡后硅质骨骼携带共生藻类及吸附的有机质快速沉降至海底, 降低了有机质在氧化环境中的滞留时间和分解损耗(Khan *et al.*, 2019; Melim *et al.*, 2023)。吴二段石英含量与 TOC 呈中等程度正相关($R^2 = 0.51$), 茅四段石英含量与 TOC 相关性更强($R^2 = 0.82$) (图 10)。

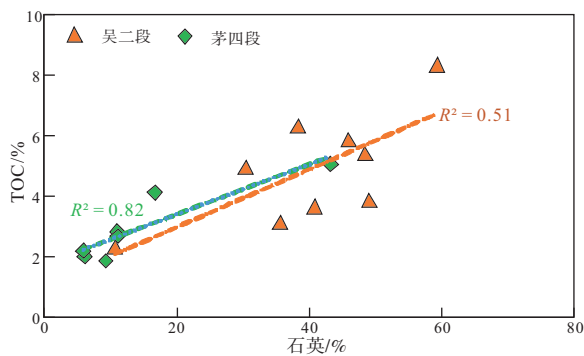


图 10 川东红星地区二叠系页岩 TOC 与石英交会图

Fig. 10 Crossplots of TOC vs. quartz of the Permian shales in Hongxing area, eastern Sichuan Basin

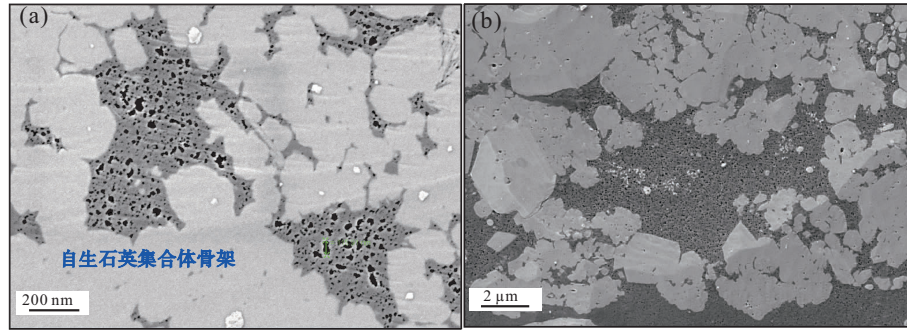
这种差异源于硅质来源的分异。吴二段碎屑硅含量高达 21.7%, 碎屑石英作为陆源惰性组分, 含量受控于物源供给强度而非古生产力水平, 与有机质富集不存在因果联系, 其大量混入削弱了石英

总量与 TOC 的整体相关性。这一现象具有普遍性, 例如 Dong 等 (2019) 对川东五峰组—龙马溪组的研究表明, TOC 与生物硅的相关性 ($R^2 = 0.66$) 显著优于与总硅的相关性 ($R^2 = 0.41$); Yang 等 (2018) 对龙马溪组硅质页岩与泥质页岩的对比亦表明, 当生物硅主导时石英与 TOC 呈正相关, 而碎屑硅主导时两者则不具备相关性。茅四段碎屑硅含量仅 3.34%, 生物硅占据石英的绝对主体, 消除了碎屑组分的干扰, 因而石英总量与 TOC 保持紧密耦合。

4.3 硅质对储集层物性的影响

生物硅对页岩储集层孔隙保存具有重要促进作用。微晶石英在早期成岩阶段形成连续的刚性骨架, 能够有效抵抗上覆地层的压实作用, 从而保护有机质孔隙免受破坏 (Zhao *et al.*, 2017b; Dong *et al.*, 2019; Peng *et al.*, 2024)。SEM 观察表明, 在吴二段和茅四段样品中, 微晶石英集合体与有机质紧密伴生, 石英骨架内部及其与有机质接触带发育大量孔隙, 形态完整, 未见明显压实变形特征(图 11)。刚性骨架形成越早, 对孔隙保存的贡献越大 (Nie *et al.*, 2021)。需要指出的是, 虽然所有类型的石英均具备抗压实能力, 但碎屑石英以分散颗粒嵌布于基质中, 缺乏连续搭接结构, 既不能系统性地保护粒间孔隙, 也难以作为干酪根和残余油提供有效的赋存空间 (Nie *et al.*, 2025)。生物成因石英的骨架效应还促进了有机质孔隙的连通性, 其含量与储集层储集能力呈正相关 (Knapp *et al.*, 2020; Nie *et al.*, 2025)。吴二段碎屑硅含量虽高达 21.7%, 但这种分散格局决定了其无法替代生物硅骨架对孔隙的系统性保护作用。

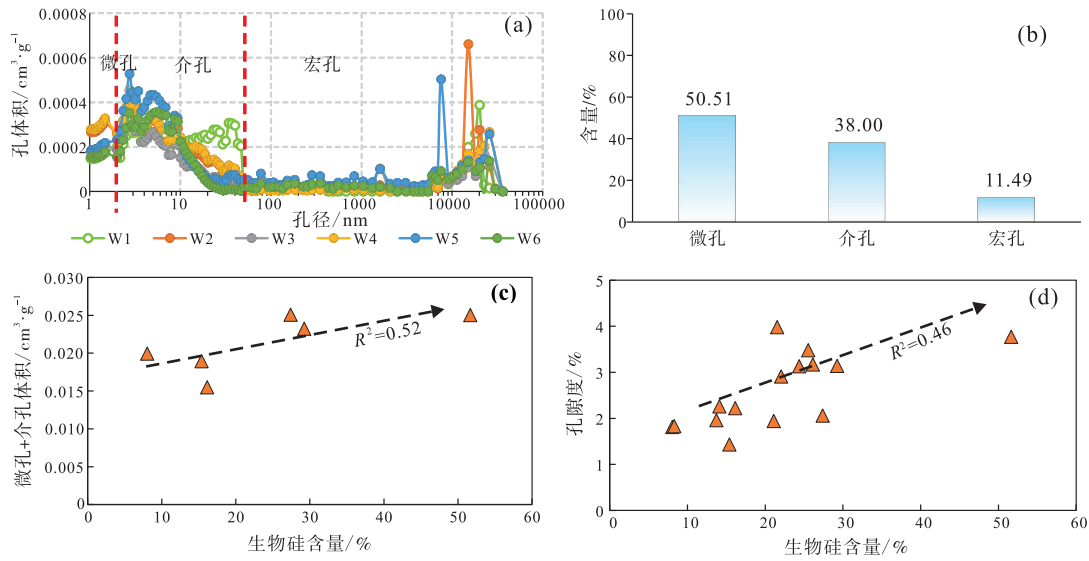
孔隙结构分析表明, 吴二段微孔占比 50.51%, 介孔占比 38.00%, 宏孔占比 11.49% (图 12-a, 12-b)。如图 12-c 所示, 生物硅含量与微孔+介孔体积同样呈正相关 ($R^2 = 0.52$), 表明生物硅形成的刚性骨架对微孔和介孔的保护效应尤为显著。这是因为微晶石英集合体的骨架孔隙以纳米级为主, 其刚性支撑作用主要保护的是微孔—介孔尺度的孔隙空间, 而非宏孔。茅四段由于缺乏相关数据未进行展示。图 12-d 显示生物硅含量与二叠系页岩孔隙度呈正相关 ($R^2 = 0.39$), 表明生物硅含量越高, 储集层孔隙保存条件越好。



a—HY-4 井, 4276.50 m, 吴二段, SEM 照片; b—HY-4 井, 4340.50 m, 茅四段, SEM 照片

图 11 川东红星地区二叠系页岩典型生物硅对孔隙的保护照片

Fig. 11 Typical photos of biological silica protecting pores of the Permian shales in Hongxing area, eastern Sichuan Basin



a—吴二段页岩孔隙结构; b—吴二段页岩不同类型孔隙占比; c—生物硅含量与微孔和介孔的关系;

d—吴二段和茅四段生物硅含量与孔隙度关系

图 12 川东红星地区二叠系页岩孔隙特征与生物硅之间的关系

Fig. 12 Relationship between pore characteristics and biogenic silica of the Permian shales in Hongxing area, eastern Sichuan Basin

4.4 硅质对页岩可压性的影响

页岩气储集层具有超低基质渗透率和天然裂缝不发育的特点, 必须通过大规模水力压裂形成复杂缝网系统才能实现经济开采。脆性指数是控制压裂缝起裂、扩展和缝网形态的关键力学参数, 反映了岩石在应力作用下发生脆性破裂而非塑性变形的能力, 直接决定了储集层的可压裂性。商业开发实践表明, 具备经济开采价值的页岩储集层通常要求脆性矿物含量大于 40%, 其中石英含量应超过 35%, 而塑性黏土矿物含量多低于 30%。然而, 并非所有类型的石英对储集层可压裂性的贡献相同。

生物硅对储集层可压裂性的增强作用显著优于碎屑石英。生物硅在成岩演化过程中经历蛋白石-A→蛋白石-CT→微晶石英的系列转化, 形成由微晶石英颗粒相互搭接构成的连续胶结骨架结构 (Jarvie *et al.*, 2007)。这种刚性骨架提高了岩石的脆性指数和杨氏模量, 降低了泊松比, 使岩石在应力作用下更易产生脆性破裂并形成复杂缝网。相比之下, 碎屑石英呈分散颗粒状分布, 缺乏连续骨架结构, 对岩石力学性质的改善效果有限。因此, 生物硅含量是评价页岩储集层可压裂性的优选参数。

基于“矿物组分+有机碳”含量参数, 吴二段可划分为富有机碳高硅 (TOC > 4% 且硅质含量

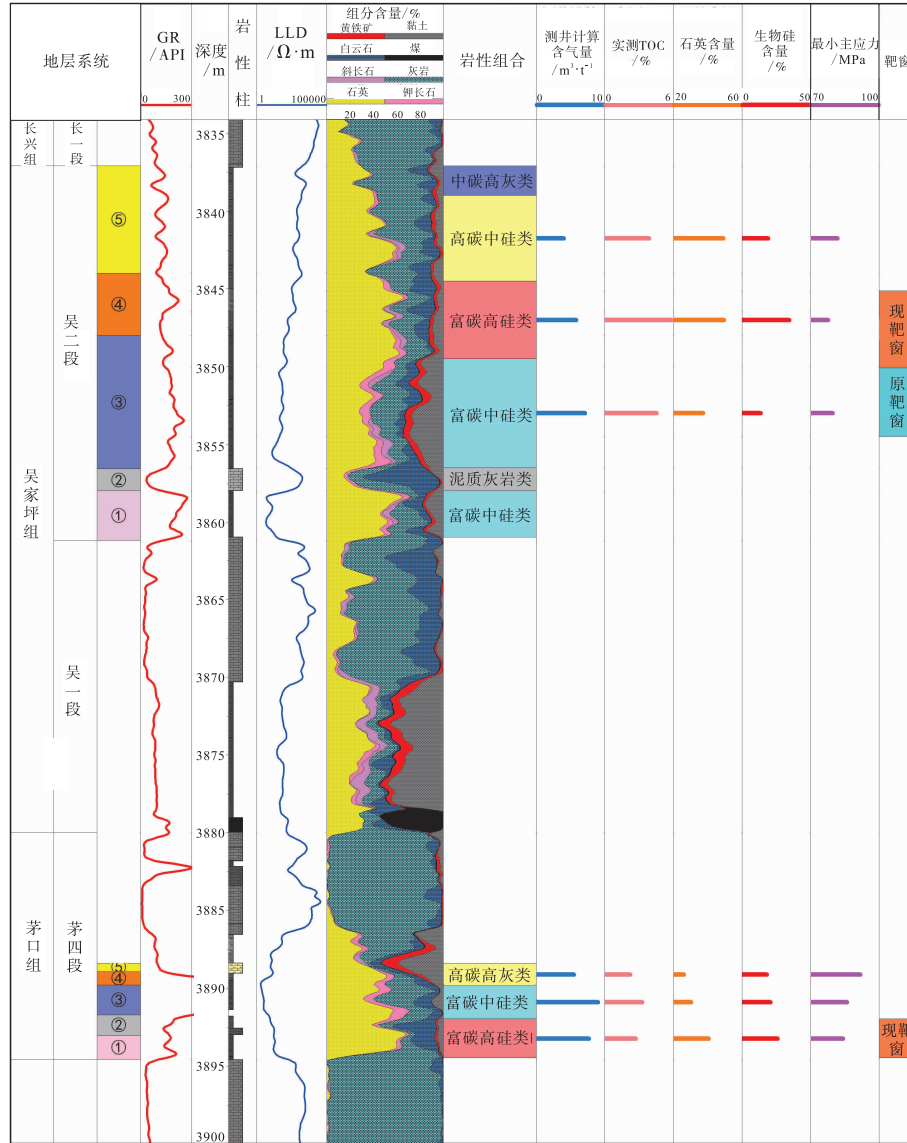


图 13 川东红星地区 HY-4 井二叠系页岩原靶窗与现今靶窗对比

Fig. 13 Comparison between original target window and current target window of the Permian shales from Well HY-4 in Hongxing area, eastern Sichuan Basin

50%~75%)、富有机碳中硅 (TOC>4%且硅质含量 25%~50%)、高有机碳中硅 (TOC 为 2%~4%且硅质含量 25%~50%) 和中有机碳高灰 (TOC 为 1%~2%且灰质含量 50%~75%)、泥质灰岩 (灰质含量>75%) 5 类岩相(图 13), 不同岩相在 TOC 含量、含气量、石英含量和生物硅含量上呈现显著差异。富碳中硅岩相含气量最高, 从含气性角度看属于地质“甜点”, 然而该岩相黏土矿物含量较高 (占比约 20%), 导致脆性指数较低, 不利于压裂改造。富碳高硅岩相石英含量最高, 其中生物硅含量超过 30%, 脆性指数最高, 最小主应力低, 具

备优越的可压裂性, 但含气量相对略低。

红星地区靶窗选择策略的演变清晰展示了对这一差异的认识深化。原始靶窗选择了富碳中硅岩相, 以含气性为主导评价标准。然而, 压裂实践表明, 该岩相因黏土含量高、脆性指数低, 压裂形成的裂缝窄且形态简单, 缝网复杂程度不足, 改造效果未达预期。现今靶窗调整为富碳高硅岩相, 兼顾含气性和可压裂性, 优选生物硅含量大于 30% 的高脆性层段。这一调整体现了从单纯追求“地质甜点”到综合评价“工程甜点”的理念转变。

压裂效果对比验证了靶窗优化的有效性

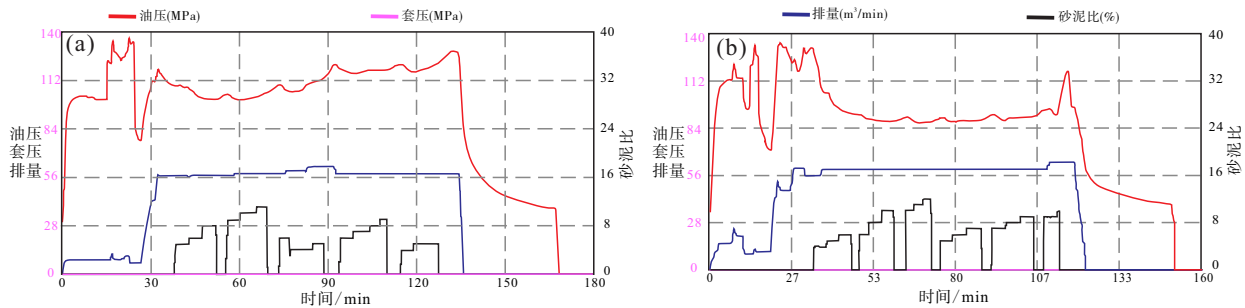


图 14 川东红星地区 HY-4 井吴二段原靶窗 (a) 与现今靶窗 (b) 延伸压力对比

Fig. 14 Extension pressure comparisons between original target window (a) and current target window (b) from Well HY-4 in Hongxing area, eastern Sichuan Basin

(图 14)。原始靶窗 (富碳中硅岩相) 压裂施工中延伸压力波动较大, 加砂困难, 形成的裂缝宽度窄、形态简单, 缝网横向延伸能力受限。现今靶窗 (富碳高硅岩相) 压裂施工表现为延伸压力平稳、加砂顺利, 液体波及半缝长和铺砂半缝长显著增加, 形成的裂缝宽度更大、形态更复杂, 缝网横向延伸能力强。同时, 测试产量由原来的 $11.67 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 提高到 $26.64 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$, 提升比例高达 128%, 证实了高生物硅含量层段的压裂改造优势。因此, 吴二段虽然石英总量较高, 但需评估生物硅的纵向分布特征以精准优选压裂层段; 同理, 茅四段的靶窗也选在了富碳高硅类岩相, 该岩相相比于富碳中灰类岩相和富碳中硅类岩相, 石英含量和生物硅含量高, 最小主应力低, 可压性较好 (图 13)。建议将生物硅含量纳入“甜点”综合评价体系, 与最小主应力等岩石力学参数共同构建多维评价指标, 实现“甜点中找甜点”的精准靶窗优选。

5 结论

1) 川东红星地区二叠系吴二段和茅四段页岩中的石英主要包括碎屑石英和生物成因石英 2 种类型, 后者可进一步分为结构保存型 (放射虫化石) 和结构改造型 (微晶石英集合体)。Si-Al 判别图版定性识别表明, 吴二段硅质为碎屑与生物混合来源。定量计算表明, 吴二段碎屑石英含量 21.70%、成岩石英含量 5.27%、生物成因石英含量 21.22%; 茅四段含量分别为 3.34%、0.22% 和 20.71%。

2) 古沉积环境的差异控制了硅质来源。吴二段沉积时期, 深水缺氧环境和火山活动带来水体营

养物质异常丰富, 促进硅质生物繁盛和生物硅保存, 中等强度陆源输入与生物硅共同构成“叠加型富集模式”。茅四段沉积时期, 浅水斜坡—陆棚相碳酸盐矿物极度富集, 陆源输入极弱, 导致生物硅占比被动升高, 形成“碳酸盐稀释控制型模式”。离岸距离、水体深度和生物生产力的耦合作用, 是控制硅质富集差异的根本原因。

3) 生物硅对有机质富集、孔隙保存、储集层可压裂性具有促进作用。生物硅含量指示古生产力水平, 硅质生物骨骼为有机质沉降提供载体, 硅化作用封存有机质, 使其与 TOC 呈正相关。早期成岩阶段形成的微晶石英刚性骨架有效抵抗压实作用, 保护有机质孔隙。生物硅含量与孔隙度及微孔和介孔体积均呈正相关, 定量证实了生物硅对储集层物性的促进作用。生物硅形成的连续微晶骨架结构显著提升储集层脆性, 高含量层段对应页岩气高产区间。红星地区靶窗优选从富碳中硅岩相调整为富碳高硅岩相 (生物硅 > 30%), 测试产量较原靶窗增长约 128%。

4) 建议在川东地区二叠系页岩气勘探开发中建立包含生物硅含量和岩石力学参数等的“甜点”综合评价体系, 优先选择生物硅含量高的层段作为水平井靶窗。吴二段需重点评估生物硅的纵向分布特征, 茅四段需结合岩石力学测试判断可压性。

参考文献 (References)

- 白斌, 戴朝成, 侯秀林, 刘显阳, 王瑞, 杨亮, 李士祥, 贺君玲, 董若婧. 2022. 陆相湖盆页岩自生硅质特征及其油气意义. 石油勘探与开发, 49(5): 896-907. [Bai B, Dai C C, Hou X L, Liu X Y, Wang R, Yang L, Li S X, He J L, Dong R J. 2022. Authigenic silica in continental lacustrine shale and its hydrocarbon significance. Pe-

- troleum Exploration and Development, 49(5): 896-907]
- 包汉勇, 赵帅, 王必金, 郭战峰, 刘皓天, 张莉, 朱志芳. 2024. 川东红星地区二叠系茅口组页岩气勘探突破及富集主控因素. 中国石油勘探, 29(1): 65-75. [Bao H Y, Zhao S, Wang B J, Guo Z F, Liu H T, Zhang L, Zhu Z F. 2024. Exploration breakthrough and main controlling factors for shale gas enrichment in the Permian Maokou Formation in Hongxing area in eastern Sichuan Basin. China Petroleum Exploration, 29(1): 65-75]
- 杜安业, 叶玥豪, 刘树根, 汪华, 宋金民, 李智武, 金鑫, 廖志芳, 张钊益, 闫春桥, 马小刚. 2026. 川东地区上二叠统大隆组页岩硅质成因及其与有机质富集的耦合关系. 地质论评, 72(2): 375-394. [Du A Y, Ye Y H, Liu S G, Wang H, Song J M, Li Z W, Jin X, Liao Z F, Zhang Z Y, Yan C Q, Ma X G. 2026. The siliceous genesis of Upper Permian Dalong Shale in eastern Sichuan and its coupling relationship with organic matter enrichment. Geological Review, 72(2): 375-394]
- 高山林, 高玉巧, 何贵松, 高全芳, 马军, 杨瑞青, 蔡潇. 2025. 构造作用对四川盆地页岩气成藏的影响. 地质学报, 99(12): 4277-4294. [Gao S L, Gao Y Q, He G S, Gao Q F, Ma J, Yang R Q, Cai X. 2025. Tectonic controls on shale gas accumulation in the Sichuan Basin. Acta Geologica Sinica, 99(12): 4277-4294]
- 何涛华, 李文浩, 杨二强, 卢双舫, 潘文庆, 张宝收, 应俊锋, 朱鹏飞, 王秀哲. 2022. 塔里木盆地早寒武世风化-热液耦合过程及其地质意义. 东北石油大学学报, 46(1): 47-61. [He T H, Li W H, Yang E Q, Lu S F, Pan W Q, Zhang B S, Ying J F, Zhu P F, Wang X Z. 2022. Coupled weathering-hydrothermal process and its geological significance during the Early Cambrian in the Tarim Basin. Journal of Northeast Petroleum University, 46(1): 47-61]
- 雷海艳, 齐婧, 周妮, 陈俊, 孟颖, 张锡新, 陈锐兵. 2022. 玛湖凹陷玛页1井风城组富硅页岩成因及其油气意义. 新疆石油地质, 43(6): 724-732. [Lei H Y, Qi J, Zhou N, Chen J, Meng Y, Zhang X X, Chen R B. 2022. Genesis and petroleum significance of silica-rich shale in Fengcheng Formation of Well Maye-1, Mahu sag. Xinjiang Petroleum Geology, 43(6): 724-732]
- 梁兴, 赵建章, 张涵冰, 张介辉, 范小东, 罗瑀峰, 蒋立伟, 张磊, 徐应才, 徐方镇. 2025. 上扬子地区五峰组-龙马溪组生物硅质页岩特征及成因机制: 以川南昭通地区为例. 古地理学报, 27(6): 1434-1451. [Liang X, Zhao J Z, Zhang H B, Zhang J H, Fan X D, Luo Y F, Jiang L W, Zhang L, Xu Y C, Xu F Z. 2025. Characteristics and genesis mechanism of biogenic siliceous shale of the Wufeng and Longmaxi Formations in Upper Yangtze Region: a case study of Zhaotong area in southern Sichuan Basin. Journal of Palaeogeography (Chinese Edition), 27(6): 1434-1451]
- 刘国恒, 翟刚毅, 邹才能, 黄志龙, 夏响华, 石砥石, 周志, 陈榕, 张聪, 于抒放. 2019. 鄂尔多斯盆地延长组泥页岩硅质来源与油气富集. 石油实验地质, 41(1): 45-55, 67. [Liu G H, Zhai G Y, Zou C N, Huang Z L, Xia X H, Shi D S, Zhou Z, Chen R, Zhang C, Yu S F. 2019. Silicon sources and hydrocarbon accumulation in shale, Triassic Yanchang Formation, Ordos Basin. Petroleum Geology and Experiment, 41(1): 45-55, 67]
- 施振生, 周天琪, 郭伟, 梁萍萍, 程峰. 2022. 海相页岩定量古地理编图及深水陆棚沉积微相划分: 以川南泸州地区五峰组-龙马溪组龙-11-4小层为例. 沉积学报, 40(6): 1728-1744. [Shi Z S, Zhou T Q, Guo W, Liang P P, Cheng F. 2022. Quantitative paleogeographic mapping and sedimentary microfacies division in a deep-water marine shale shelf: case study of Wufeng Formation-Longmaxi Formation shale, southern Sichuan Basin, China. Acta Sedimentologica Sinica, 40(6): 1728-1744]
- 王惠君, 杨锐, 舒志国, 邓模, 刘计勇, 何涛华. 2025. 川东南二叠系吴家坪组深层页岩气生排滞潜力评价. 地质科技通报, 44(6): 96-109. [Wang H J, Yang R, Shu Z G, Deng M, Liu J Y, He T H. 2025. Quantitative evaluation of hydrocarbon generation, expulsion, and retention potential in deep Permian Wujiaping Formation shale gas reservoir, southeastern Sichuan Basin. Bulletin of Geological Science and Technology, 44(6): 96-109]
- 王威, 刘珠江, 魏富彬, 李飞. 2024. 川东北地区二叠系大隆组页岩储层特征及其主控因素. 石油与天然气地质, 45(5): 1355-1367. [Wang W, Liu Z J, Wei F B, Li F. 2024. Characteristics and determinants of shale reservoir development in the Permian Dalong Formation, northeastern Sichuan Basin. Oil & Gas Geology, 45(5): 1355-1367]
- 杨雪, 田寒云, 杨雨然, 徐亮, 王青, 朱世发, 姜振学. 2024. 川东北二叠系海相页岩硅质矿物成因机理. 山东科技大学学报(自然科学版), 43(5): 35-43. [Yang X, Tian H Y, Yang Y R, Xu L, Wang Q, Zhu S F, Jiang Z X. 2024. Genetic mechanism of siliceous minerals in Permian marine shales in Northeast Sichuan. Journal of Shandong University of Science and Technology (Natural Science), 43(5): 35-43]
- 易婷, 周文, 杨璠, 陈文玲, 张昊天, 徐浩, 刘瑞崑, 赵欣, 蒋柯. 2020. 四川盆地龙马溪组页岩气储层石英类型与特征. 矿物学报, 40(2): 127-136. [Yi T, Zhou W, Yang F, Chen W L, Zhang H T, Xu H, Liu R Y, Zhao X, Jiang K. 2020. Types and characteristics of quartzs in shale gas reservoirs of the Longmaxi Formation, Sichuan Basin, China. Acta Mineralogica Sinica, 40(2): 127-136]
- 遇昊, 陈代钊, 韦恒叶, 汪建国. 2012. 鄂西地区上二叠统乐平统大隆组硅质页岩成因及有机质富集机理. 岩石学报, 28(3): 1017-1027. [Yu H, Chen D Z, Wei H Y, Wang J G. 2012. Origin of bedded chert and organic matter accumulation in the Dalong Formation of Upper Permian in western Hubei Province. Acta Petrologica Sinica, 28(3): 1017-1027]
- 赵建华, 金之钧, 金振奎, 温馨, 耿一凯, 颜彩娜. 2016. 四川盆地五峰组-龙马溪组含气页岩中石英成因研究. 天然气地球科学, 27(2): 377-386. [Zhao J H, Jin Z J, Jin Z K, Wen X, Geng Y K, Yan C N. 2016. The genesis of quartz in Wufeng-Longmaxi gas shales, Sichuan Basin. Natural Gas Geoscience, 27(2): 377-386]
- Dong T, He S, Chen M F, Hou Y G, Guo X W, Wei C, Han Y J, Yang R. 2019. Quartz types and origins in the Paleozoic Wufeng-Longmaxi Formations, eastern Sichuan Basin, China: implications for porosity preservation in shale reservoirs. Marine and Petroleum Geology, 106:

- 62-73.
- Dubinina A V. 2004. Geochemistry of rare earth elements in the ocean. *Lithology and Mineral Resources*, 39(4): 289-307.
- He T H, Lu S F, Li W H, Sun D Q, Pan W Q, Zhang B S, Tan Z Z, Ying J F. 2020. Paleoweathering, hydrothermal activity and organic matter enrichment during the formation of earliest Cambrian black strata in the northwest Tarim Basin, China. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 189: 106987.
- He T H, Zeng Q H, Lu S F, Li W H, Li M Q, Wen Z G, Yang E Q, Jing T T, Ying J F, Zhu P F, Wang X Z, Pan W Q, Zhang B S, Chen Z H. 2023. Aryl isoprenoids from the Lower Paleozoic in the Tarim Basin, NW China: insight into deep ancient hydrocarbon exploration. *Geoenergy Science and Engineering*, 225: 211666.
- Jarvie D M, Hill R J, Ruble T E, Pollastro R M. 2007. Unconventional shale-gas systems: the Mississippian Barnett Shale of north-central Texas as one model for thermogenic shale-gas assessment. *AAPG Bulletin*, 91: 475-499.
- Jin Z J, Nie H K, Liu Q Y, Zhao J H, Jiang T. 2018. Source and seal coupling mechanism for shale gas enrichment in Middle Ordovician Wufeng Formation-Lower Silurian Longmaxi Formation in Sichuan Basin and its periphery. *Marine and Petroleum Geology*, 97: 78-93.
- Khan M Z, Feng Q L, Zhang K, Guo W. 2019. Biogenic silica and organic carbon fluxes provide evidence of enhanced marine productivity in the Upper Ordovician - Lower Silurian of South China. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 534: 109278.
- Knapp L J, Ardakani O H, Uchida S, Nanjo T, Otomo C, Hattori T. 2020. The influence of rigid matrix minerals on organic porosity and pore size in shale reservoirs: Upper Devonian Duvernay Formation, Alberta, Canada. *International Journal of Coal Geology*, 227: 103525.
- Loucks R G, Ruppel S C. 2007. Mississippian Barnett Shale: lithofacies and depositional setting of a deep-water shale-gas succession in the Fort Worth Basin, Texas. *AAPG Bulletin*, 91: 579-601.
- Melim L A, Mure-Ravaud S R, Hegna T A, Bellott B J, Lerosey-Aubril R. 2023. Silicification of trilobites and biofilm from the Cambrian Weeks Formation, Utah: evidence for microbial mediation of silicification. *Geology*, 51(1): 80-84.
- Metwally Y M, Chesnokov E M. 2012. Clay mineral transformation as a major source for authigenic quartz in thermo-mature gas shale. *Applied Clay Science*, 55: 138-150.
- Milliken K L, Esch W L, Reed R M, Zhang T W. 2012. Grain assemblages and strong diagenetic overprinting in siliceous mudrocks, Barnett Shale (Mississippian), Fort Worth Basin, Texas. *AAPG Bulletin*, 96(8): 1553-1578.
- Nie H K, He Z L, Liu G X, Du W, Wang R Y, Zhang G R. 2021. Genetic mechanism of high-quality shale gas reservoirs in the Wufeng-Longmaxi Fms in the Sichuan Basin. *Natural Gas Industry B*, 8: 24-34.
- Nie H K, Liu Q Y, Li P, Li P, Ding J H, Sun C X, Zhai C B, Zhao J H, Jin Z J, Dang W. 2025. Quartz types, formation mechanism, and its effect on shale oil and gas enrichment: a review. *Earth-Science Reviews*, 261: 105011.
- Peltonen C, Marcussen Ø, Bjørlykke K, Jahren J. 2009. Clay mineral diagenesis and quartz cementation in mudstones: the effects of smectite to illite reaction on rock properties. *Marine and Petroleum Geology*, 26(6): 887-898.
- Peng J W, Hu Z Q, Feng D J. 2024. Influence of quartz types on rock fabrics and bulk physical properties in organic-rich mudstone: a review. *Earth-Science Reviews*, 249: 104670.
- Rowe H D, Loucks R G, Ruppel S C, Rimmer S M. 2008. Mississippian Barnett Formation, Fort Worth Basin, Texas: bulk geochemical inferences and Mo-TOC constraints on the severity of hydrographic restriction. *Chemical Geology*, 257: 16-25.
- Sun C X, Nie H K, Liu G X, Zhang G R, Du W, Wang R Y. 2019. Quartz type and its control on shale gas enrichment and production: a case study of the Wufeng-Longmaxi Formations in the Sichuan Basin and its surrounding areas, China. *Earth Science*, 44(11): 3692-3704.
- Wang H J, Shu Z G, He T H, He J Y, Zhou Y Z. 2025. Influence of volcanic ash on organic matter enrichment in the Late Permian wuchiaoping formation, eastern Sichuan Basin: multiproxy evidence and implications for shale gas exploration. *ACS Omega*, 10(31): 35043-35056.
- Wedepohl K H. 1971. Environmental influences on the chemical composition of shales and clays. *Physics and Chemistry of the Earth*, 8: 307-333.
- Xin B X, Hao F, Tian J Q, Guo P F, Xu Q L, Han W Z. 2025. Shale oil occurrence and mobility mechanisms in brittle mineral-enriched reservoirs: insights from the Paleogene Kongdian Formation, Bohai Bay Basin. *Geoscience Frontiers*, 16: 102149.
- Yamamoto K. 1987. Geochemical characteristics and depositional environments of cherts and associated rocks in the Franciscan and Shimanto Terranes. *Sedimentary Geology*, 52: 65-108.
- Yang X R, Yan D T, Wei X S, Zhang L W, Zhang B, Xu H W, Gong Y, He J. 2018. Different formation mechanism of quartz in siliceous and argillaceous shales: a case study of Longmaxi Formation in South China. *Marine and Petroleum Geology*, 94: 80-94.
- Zhang D C, Ranjith P G, Perera M S A. 2016. The brittleness indices used in rock mechanics and their application in shale hydraulic fracturing: a review. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 143: 158-170.
- Zhao J H, Jin Z J, Jin Z K, Hu Q H, Hu Z Q, Du W, Yan C N, Geng Y K. 2017a. Mineral types and organic matters of the Ordovician-Silurian Wufeng and Longmaxi Shale in the Sichuan Basin, China: implications for pore systems, diagenetic pathways, and reservoir quality in fine-grained sedimentary rocks. *Marine and Petroleum Geology*, 86: 655-674.
- Zhao J H, Jin Z K, Jin Z J, Wen X, Geng Y K. 2017b. Origin of authigenic quartz in organic-rich shales of the Wufeng and Longmaxi Formations in the Sichuan Basin, South China: implications for pore evolution. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 38: 21-38.