

川东红星地区二叠系海相页岩微体生物化石特征及对储层的影响

王安婷^{1,2}, 俞凌杰^{1,2}, 万俊雨^{1,2}, 沈臻欢^{1,2}, 鲍芳^{1,2}, 刘友祥^{1,2}

(1. 中国石化石油勘探开发研究院 无锡石油地质研究所, 江苏 无锡 214126; 2. 中国石化油气成藏重点实验室, 江苏 无锡 214126)

摘要:以川东红星地区二叠系茅口组四段(茅四段)—吴家坪组二段(吴二段)海相页岩为研究对象,利用薄片鉴定、场发射—扫描电镜(FE-SEM)及 X 线能谱分析等方法,分析海相页岩典型微体生物化石类型、特征及对储层的影响。结果表明:研究区富有机质页岩生物成因硅质、钙质化石广泛发育,主要为钙质有孔虫、钙质介壳及硅质放射虫等微体生物化石。有孔虫以钙质壳壁和多个房室为主要特征,大多有孔虫壳体由方解石组成,局部见石英、长石交代;放射虫主要表现为具有典型圈层结构的卵形团块状硅质集合体,为埋藏、成岩作用改造的硅质放射虫的残骸。钙质有孔虫房室及硅质放射虫囊体普遍充填沥青,且沥青内发育大量分布密集的有机孔隙,有机孔隙数超过 2 800 个,面孔率为 19%~22%。该结果为揭示研究区海相页岩储层孔隙发育和保存提供指导。

关键词:海相;生物成因硅质;有孔虫;放射虫;生物化石;二叠系页岩;红星地区;茅四段—吴二段

中图分类号:TE122.1 **文献标识码:**A **文章编号:**2095-4107(2025)04-0014-11

0 引言

近年来,中国南方海相页岩气勘探取得突破,在五峰组—龙马溪组页岩中发现涪陵、长宁和威远等页岩气田^[1-3],二叠系大隆组和吴家坪组多口井获得高产工业气流^[4-6],表明海相页岩气的勘探前景。高演化海相页岩气优质储层主体发育有机孔隙^[7],不同类型页岩矿物组成差异较显著^[4-5,8-9],石英和碳酸盐矿物作为页岩主要的脆性矿物,可以形成刚性骨架,埋藏条件对有机孔隙的保存起关键作用,有利于压裂造缝^[10]。海相原始沉积物发育生物成因的硅质和钙质微体化石,主要包括放射虫、海绵骨针和硅藻等硅质微体化石^[11-13],以及有孔虫、瓣鳃类介壳等钙质微体化石^[14-15]。

LIU J S 等认为以生物成因微晶石英为主的页岩具有较高的杨氏模量与脆性指数^[16],生物成因硅质颗粒相互连接而形成刚性框架,有利于内部粒间孔隙及运移有机孔隙的保存^[10,17]。卢龙飞等分析五峰组—龙马溪组页岩硅质放射虫,生物成因硅质化石抗压实能力强,可以对原生孔隙的保持及后期沥青有机孔隙的保存起建设性作用^[18]。在 Barnett 页岩中,HAN J 等观察到运移沥青充填硅质海绵骨针化石粒内孔的现象^[19]。除生物成因硅质化石外,生物成因钙质化石对页岩储层孔隙发育及保存也具有重要影响^[20-22]。邵德勇等发现 Eagle Ford 页岩中的钙质有孔虫化石具有较强的抗压保孔能力^[21]。马遵青等认为钙质有孔虫壳体的抗压实性不仅有利于生物化石体腔内孔隙的保存,还能够有效抵抗压实作用对壳体骨架间基质孔隙的破坏^[20]。

人们的研究主要集中于上奥陶统五峰组—下志留统龙马溪组页岩^[23-25],以及下寒武统牛蹄塘组页岩^[26-27],对二叠系海相页岩生物成因硅质化石的研究较少^[8],对生物成因钙质化石的研究鲜有报道。2019 年,在红星地区部署实施红页 1HF 井,实现川东二叠系新层系页岩气勘探的重大突破^[4-5]。与涪陵地区五峰组—龙马溪组页岩相比,川东红星地区二叠系页岩不仅发育大量放射虫、海绵骨针等硅质骨骼类生物化石,还存在钙质生屑富集纹层^[28]。生物成因硅质及钙质化石对川东二叠系海相页岩储层孔隙发育

收稿日期:2024-08-07;编辑:陆雅玲

基金项目:国家自然科学基金企业创新发展联合基金集成项目(U24B6001);中国石化石油勘探开发研究院自立项目(YK2024041)

作者简介:王安婷(1995—),女,博士,助理研究员,主要从事页岩油气储层表征技术与发育机理方面的研究。

通信作者:俞凌杰,E-mail:yulj.syky@sinopec.com

与保存存在影响。以川东红星地区茅口组四段(茅四段)—吴家坪组二段(吴二段)页岩为研究对象,根据薄片鉴定、场发射—扫描电镜(FE-SEM)及 X 线能谱分析等方法,笔者分析研究区样品中典型微体生物化石类型、特征及对储层的影响,为揭示川东红星地区二叠系海相页岩储层孔隙发育和保存提供依据。

1 区域地质概况

红星地区位于中扬子鄂西—渝东地区,构造上属于四川盆地东缘川东隔挡式褶皱带石柱复向斜带的中部,在平面分布上,红星地区处于“S”状弧形展布的 NE—NEE 向的齐岳山高陡复背斜带和方斗山高陡复背斜带之间,具有“隔挡式”构造形态的典型特征^[4-5](见图 1(a))。二叠纪是地质历史中构造活动最活跃的时期之一,峨眉山玄武岩的喷发、东吴运动及海平面的剧烈变化对二叠纪的构造产生重要影响^[4-5]。

川东红星及周缘地区自二叠纪中期开始由克拉通内拗陷演化为台内裂陷,二叠纪沉积晚期,东吴运动使中上扬子地区发生差异抬升,同时受地幔隆升作用的影响,上扬子地台地壳拉伸变薄,区域幔源物质侵入或喷发造成地壳拉张而发生断陷,在中上扬子地区北缘发育裂陷^[29-31]。川东红星地区二叠系页岩主要发育于中二叠统茅四段和上二叠统吴二段^[32],岩性主要表现为深水陆棚沉积的硅质页岩及灰质页岩(见图 1(b))。

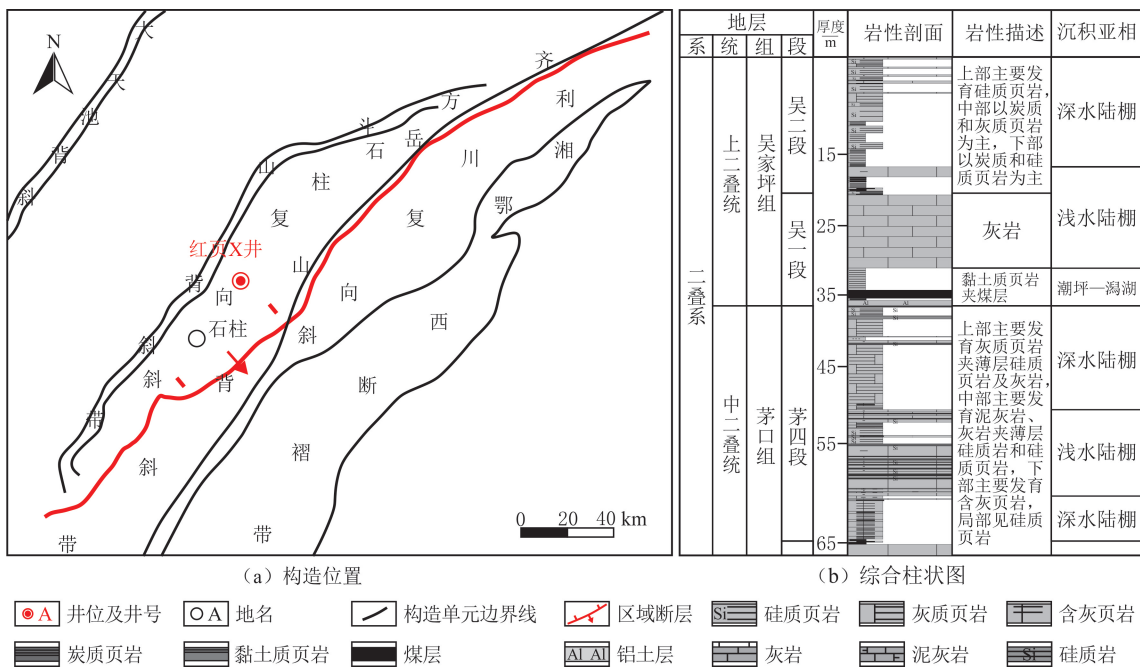


图 1 研究区构造位置及地层岩性特征(据文献[4,32]修改)

Fig. 1 The tectonic location and the formation lithology characteristics of the study area(modified by references[4,32])

2 样品选取与实验方法

2.1 样品选取

16 个样品取自川东红星地区红页 X 井茅四段—吴二段深水陆棚相页岩。研究区页岩有机质丰度较高(见图 2),16 个样品实测 $w(\text{TOC})$ 介于 3.48%~18.29%,平均为 10.05%。吴二段 3 个页岩样品实测平均 R_o 介于 2.72%~2.75%,茅四段 1 个页岩样品实测 R_o 为 2.73%,样品处于过成熟阶段,具备良好的生气条件。XRD 结果显示,茅四段—吴二段页岩主要由石英(质量分数为 30.3%~70.1%)和碳酸盐矿物组成(质量分数为 4.5%~63.6%),平均质量分数分别为 52.7%和 22.7%;碳酸盐矿物主要为方解石(质量分数为 3.9%~62.8%),白云石(质量分数为 0.8%~4.2%)较少。黏土矿物质量分数相对较低(3.3%~21.5%),平均质量分数为 11.8%。此外,研究区页岩样品普遍发育黄铁矿,质量分数介于 3.8%~11.6%(见图 3)。

2.2 实验方法

分析测试在中国石化石油勘探开发研究院无锡石油地质研究所完成。采用 GB/T 19145—2022《沉积岩中总有机碳的测定》，利用 LECO-CS230 碳硫分析仪完成总有机碳(TOC)质量分数测定(16 个样品);采用 SY/T 5124—2012《沉积岩中镜质体反射率测定方法》，利用 MSP200 显微光度计完成全岩反射率(R_o)测定(4 个样品);采用 SY/T 5163—2018《沉积岩中黏土矿物和常见非黏土矿物 X 线衍射分析方法》，利用 D8 A25 型 X 线衍射仪完成 X 线衍射全岩矿物分析(XRD)(16 个样品);采用 SY/T 5368—2016《岩石薄片鉴定》，利用 ZEISS IMAGER. A2M 偏光/荧光显微镜完成薄片鉴定(16 个样品);采用 SY/T 6154—2019《岩石比表面积和孔径分布测定静态吸附容量法》，利用 ASAP2460 全自动比表面及孔径分析仪完成氮气吸附—脱附分析(16 个样品)。利用多种扫描电镜组合分析时，首先，获取垂直于页岩样品层理面的新鲜断面，利用 Quanta200 环境扫描电镜并结合 X 线能谱进行显微形貌和成分分析;然后，使用德国徕卡 TXP 型精研一体机对页岩样品的表面进行机械磨平，利用德国徕卡 RES102 型离子减薄仪进行氩离子抛光后镀碳膜。采用 SY/T 5162—2021《岩石样品扫描电子显微镜分析方法》及 SY/T 6189—2018《岩石矿物能谱定量分析方法》，利用 FEI Helios NanoLab 650 型聚焦离子束扫描电镜完成样品的微观孔隙结构分析;首先利用 FE-SEM 在不同放大倍数下依次对样品(16 个)进行观察;然后在 FE-SEM 高倍镜($\times 80\ 000$)下选取 4 个典型样品，利用 Avizo 软件统计获取有机孔隙发育参数。

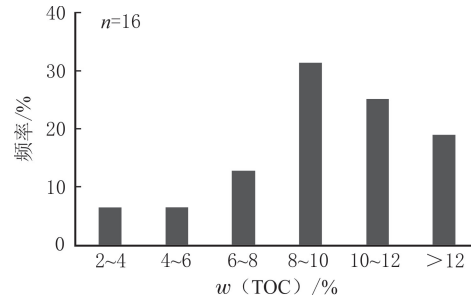


图 2 研究区页岩样品 TOC 质量分数分布
Fig. 2 The TOC mass fraction distribution of shale samples in the study area

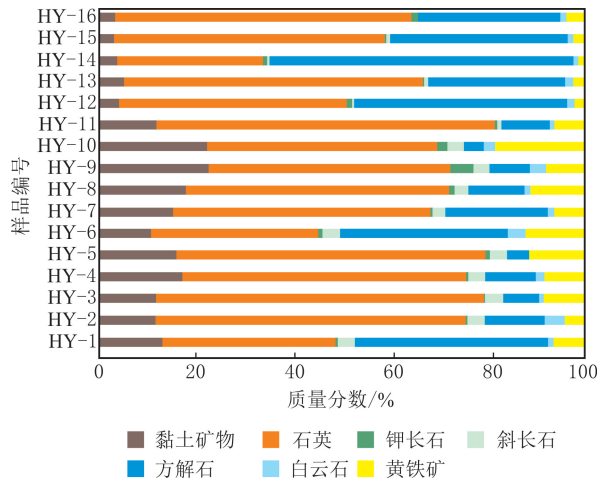


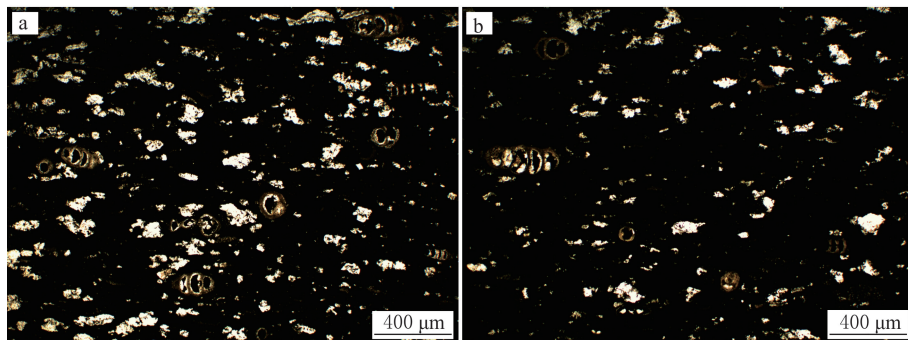
图 3 研究区页岩样品主要矿物组成

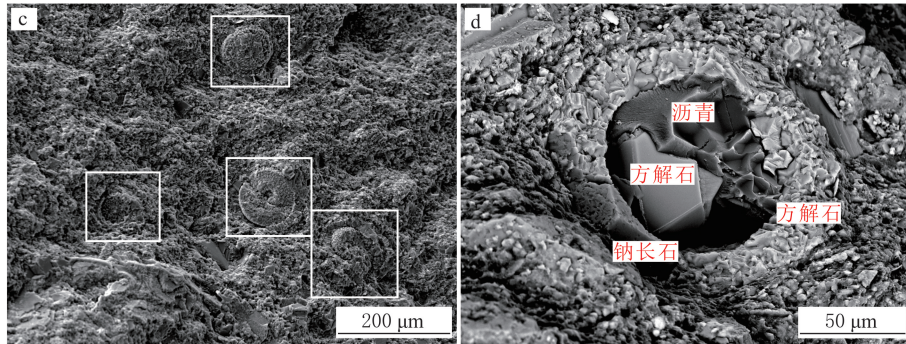
Fig. 3 The main mineral composition of shale samples in the study area

3 典型微体生物化石类型

3.1 钙质有孔虫

薄片鉴定及扫描电镜观察发现，红星地区二叠系页岩样品发育有孔虫化石(见图 4)。有孔虫化石呈单个圆形、椭圆形及串珠状等形态，直径由几十至上百微米不等(见图 4(a-b))，随机分布在矿物基质之间(见图 4(c))。光学显微镜下观察有孔虫壳体长轴指向基本一致，具有定向顺层分布的特征，可能受上覆地





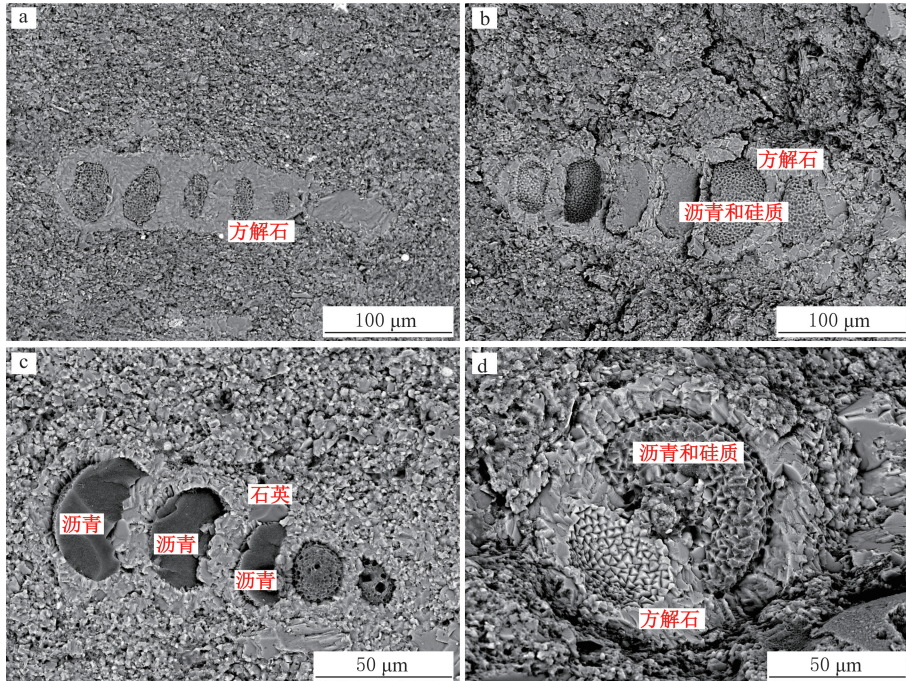
(a) 富含钙质有孔虫页岩, 有孔虫呈定向排列特征, 单偏光, 茅四段; (b) 富含钙质有孔虫页岩, 有孔虫呈定向排列特征, 单偏光, 吴二段; (c) 富含钙质有孔虫页岩, 自然断面, 垂直于层面, 有孔虫随机分布在矿物基质之间, 扫描电镜, 茅四段; (d) 钙质有孔虫壳壁被钠长石交代, 房室中充填有机质与方解石, 扫描电镜, 茅四段

图 4 红页 X 井二叠系页岩有孔虫化石微观结构特征

Fig. 4 Microstructure characteristics of foraminifera fossils of Permian shales in well HY-X

层压实作用的影响(见图 4(a-b))。根据壳体组成成分,有孔虫可划分为几丁质壳、钙质壳及胶结壳有孔虫,其中钙质壳有孔虫的壳体主要由自身细胞质分泌的碳酸钙组成^[33-34]。扫描电镜和能谱分析显示,研究区页岩样品有孔虫化石的壳体大多由方解石组成,属于钙质壳有孔虫,同时受成岩作用的影响,有孔虫钙质壳体常见石英或长石交代(见图 4(d))。

在川东地区二叠纪有孔虫形态群系统分类^[34]的基础上,根据有孔虫壳体形态、壳壁成分等特征,将红星地区茅四段—吴二段页岩中有孔虫化石划分为两大类(见图 5):一类有孔虫壳体的房室呈单列式排列



(a) 节房虫属有孔虫, 5个房室, 壳体直径约为250 μm, 宽度约为40 μm, 扫描电镜; (b) 厚壁虫属有孔虫, 6个房室, 壳体直径约为250 μm, 宽度为40~80 μm, 房室内见沥青和硅质混合充填, 扫描电镜; (c) 朗格虫属有孔虫, 5个房室, 壳体直径约为150 μm, 宽度为30~60 μm, 有孔虫壳体局部见硅质交代, 房室内充填沥青, 扫描电镜; (d) 古盘虫属有孔虫, 双列式壳体, 壳体宽度约为100 μm, 房室内见沥青和硅质混合充填, 扫描电镜

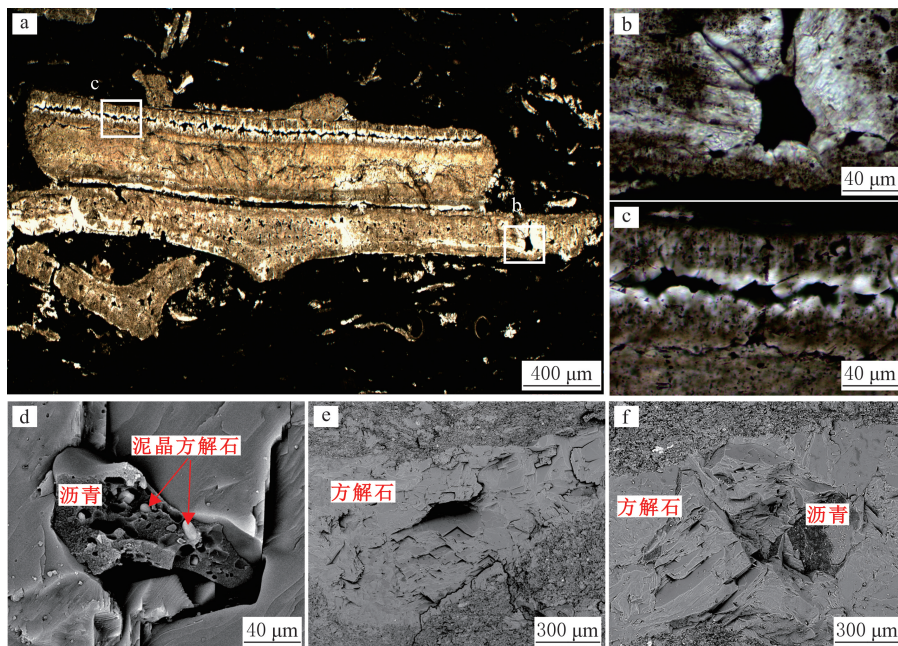
图 5 红页 X 井二叠系页岩不同种属有孔虫

Fig. 5 Foraminifera of different species of Permian shales in well HY-X

的显著特征,包括节房虫属(*Nodosaria*)、厚壁虫属(*Pachyphloia*)和朗格虫属(*Langella*)。其中,节房虫属最主要的特征为多房室串联形成的狭长壳体,房室为4~9个,壳体直径多为80~250 μm ,宽度为40~60 μm (见图5(a));厚壁虫属的两侧壳壁明显加厚,多呈纺锤形或近椭圆形,壳体直径一般为100~250 μm ,宽度为40~80 μm ,房室为6~9个(见图5(b));朗格虫属初房呈明显的球形,后生房室部分超覆先期房室,整体呈锥形,壳体直径为80~200 μm ,宽度为30~80 μm ,房室数相对少,一般为4~6个(见图5(c))。另一类有孔虫常见单列、双列或平旋式壳体,其中古盘虫属(*Archaediscus*)较为常见,壳体宽度可达上百微米(见图5(d))。扫描电镜和能谱分析显示,两类有孔虫壳体主要由方解石组成,局部见硅质交代(见图5(c)),方解石自形程度大多较低,少数有孔虫壳壁内部方解石呈规则的菱面体(见图5(d))。不同种属有孔虫化石房室内普遍见沥青或硅质充填,少数房室被沥青完全充填(见图5(c)),多数呈沥青和硅质混合充填(见图5(b,d))。

3.2 钙质介壳

除钙质有孔虫外,薄片鉴定及扫描电镜观察发现,研究区样品发育较多瓣鳃类介壳生物化石,部分形态完整,大小达毫米级(见图6(a))。扫描电镜和能谱分析显示,该类介壳生物化石主要由方解石组成。FOLK R L认为生物化学沉淀的文石构成瓣鳃类生物壳^[35],在同生期及成岩早期,生物介壳文石进一步转化为泥晶方解石,但介壳形态基本保持不变^[36]。光学显微镜下可见,钙质介壳基本沿长轴方向顺层展布,钙质介壳内部发育微米级生物结构孔,形态各异,结构孔间大多表现良好连通性(见图6(b-c))。扫描电镜下观察到钙质介壳结构孔常见沥青充填,部分沥青包裹少量泥晶方解石(见图6(d))。钙质介壳内部及边缘微裂缝普遍发育(见图6(e)),部分裂缝表面观察到沥青分布(见图6(f)),表明微裂缝的发育既可能与应力下的卸载破裂有关,也可能与有机质生烃阶段酸性流体的选择性溶蚀有关^[37]。



(a) 钙质介壳,形态完整,大小达毫米级,单偏光,茅四段;(b)图(a)中b框放大,介壳结构孔,大小达微米级,单偏光,茅四段;(c)图(a)中c框放大,介壳结构孔间连通性良好,同时介壳内部见微裂缝,单偏光,茅四段;(d)介壳结构孔充填沥青及少量泥晶方解石,扫描电镜,茅四段;(e)介壳内部及边缘发育微裂缝,扫描电镜,茅四段;(f)沥青沿介壳内部微裂缝分布,扫描电镜,吴二段

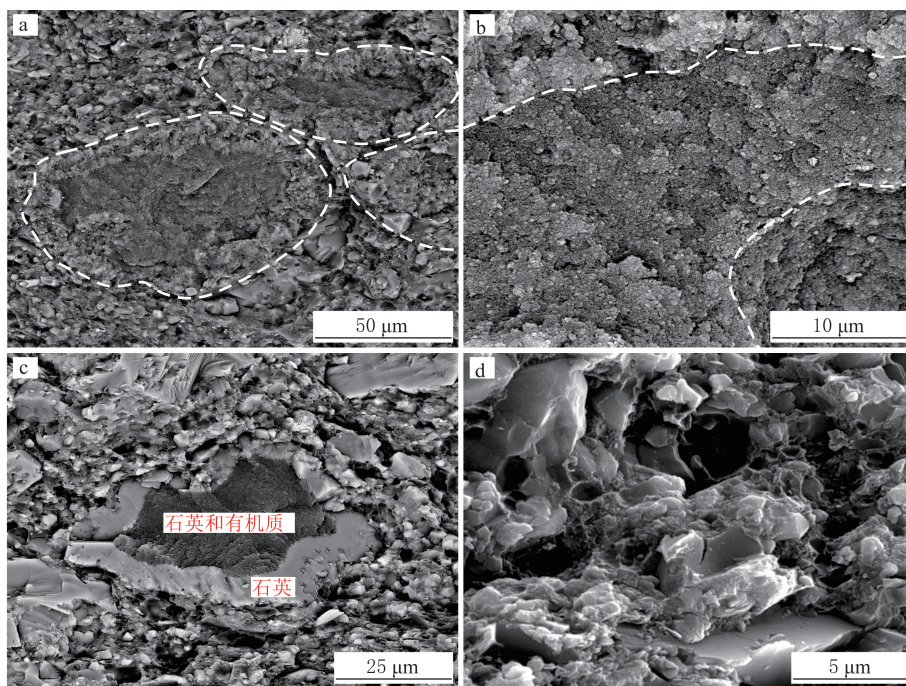
图6 红页X井二叠系页岩钙质介壳微观结构特征

Fig. 6 Microstructure characteristics of calcareous shells of Permian shales in well HY-X

3.3 硅质放射虫

利用扫描电镜观察红星地区二叠系页岩自然断面,部分样品存在丰富的、具有典型生物结构的硅质集合体,大多呈卵形团块状,集合体粒径较大,为50~100 μm (见图7(a)),硅质集合体具有明显的圈层结构

(见图 7(b))。部分样品中,硅质集合体具有明显的裙带状环形外边(见图 7(c)),能谱分析显示,环形外边及其包裹的内部实体颗粒主要由 Si 和 O 元素组成,矿物组成主要为石英,同时内部实体物质含有一定量的 C 元素,指示生物成因^[18]。比较焦石坝地区五峰组—龙马溪组硅质页岩自然断面中典型放射虫结构,红星地区二叠系海相页岩硅质集合体为埋藏、成岩作用(主要涉及生物蛋白石发生脱水和重结晶转变为晶态石英)改造的硅质放射虫残骸^[18,25]。研究区茅四段—吴二段富硅质放射虫页岩样品常见不同放射虫残骸紧密堆叠在一起(见图 7(a)),其间普遍存在胶结物,多为自形程度较低的石英颗粒,表面相对光滑,粒径多在 5 μm 以下(见图 7(d)),与部分硅质生物骨架溶解后重结晶形成的自生石英有关^[18]。



(a) 富硅质放射虫页岩,自然断面,垂直于层面,扫描电镜,茅四段; (b) 图(a)中放射虫圈层结构放大,扫描电镜,茅四段; (c) 硅质放射虫,裙带状环形外边,扫描电镜,吴二段; (d) 图(a)中硅质放射虫间胶结物放大,扫描电镜,茅四段

图 7 红页 X 井二叠系页岩硅质放射虫化石

Fig. 7 The siliceous radiolarian fossils of Permian shales in well HY-X

4 微体生物化石对储层的影响

4.1 储层孔隙结构特征

氮气吸附—脱附分析结果显示,研究区二叠系页岩样品的比表面积介于 10.73 ~ 48.52 m²/g,孔体积为 0.009 6 ~ 0.044 4 cm³/g,平均比表面积、孔体积(28.46 m²/g、0.026 3 cm³/g)接近于川东北地区大隆组深层页岩的(28.48 m²/g、0.022 8 cm³/g)^[38]。根据孔径将孔隙分为微孔(<2 nm)、介孔(2~50 nm)和宏孔(>50 nm)^[39]。茅四段—吴二段页岩样品以微孔和介孔为主,平均占比分别为 50.50%和 44.40%(见图 8)。研究区页岩样品微孔、介孔体积与 ω(TOC)呈正相关

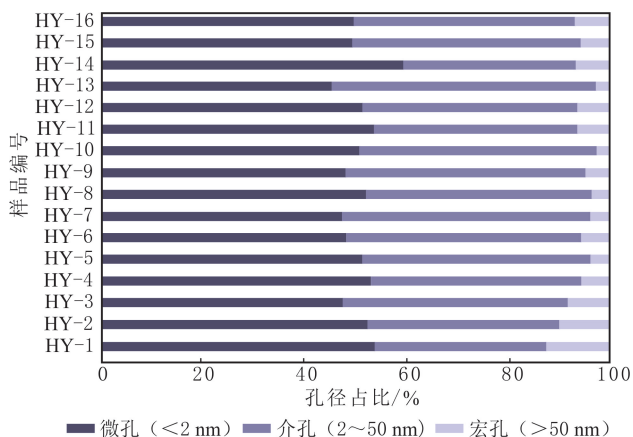


图 8 红页 X 井二叠系页岩孔隙结构特征

Fig. 8 Pore structure characteristics of Permian shales in well HY-X

关系(见图 9(a-b)),宏孔体积未表现出相关关系(见图 9(c)),表明研究区页岩样品有机质是微孔和介孔体积发育的主要载体。研究区页岩样品比表面积与 $w(\text{TOC})$ 呈正相关关系(见图 9(d)),比表面积与微孔体积和介孔体积表现为正相关关系(见图 9(e)),表明研究区页岩样品微孔和介孔贡献主要的比表面积。川东红星地区茅四段—吴二段页岩储层主要发育微孔及介孔,有机质是微孔和介孔发育的主要载体,微孔和介孔贡献主要的比表面积。因此,总有机碳质量分数高、微孔和介孔发育、比表面积大、吸附能力强是川东二叠系海相页岩储层含气性高的有利因素之一^[4]。

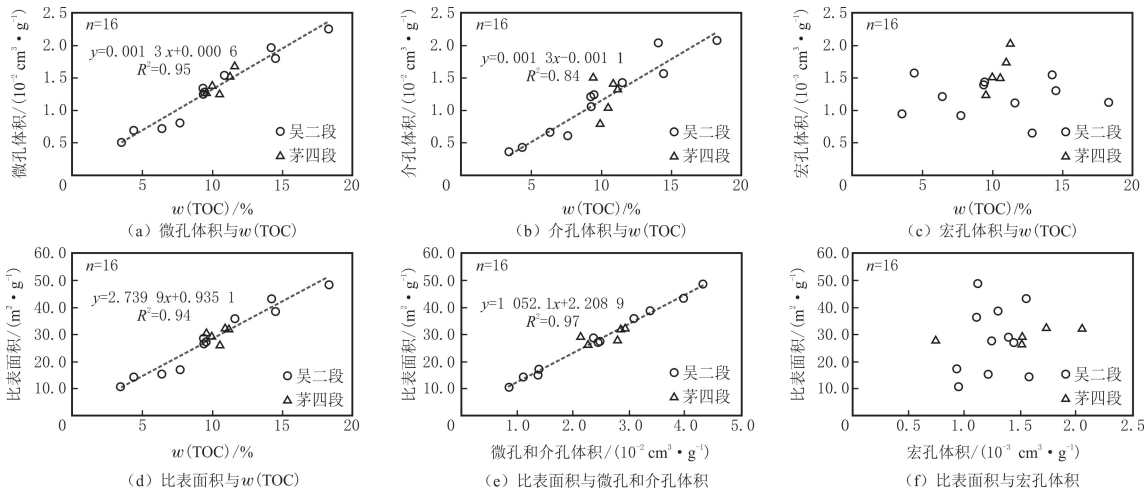
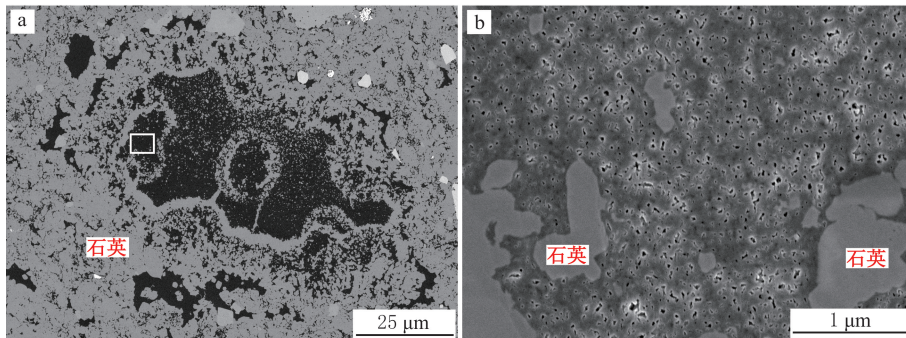


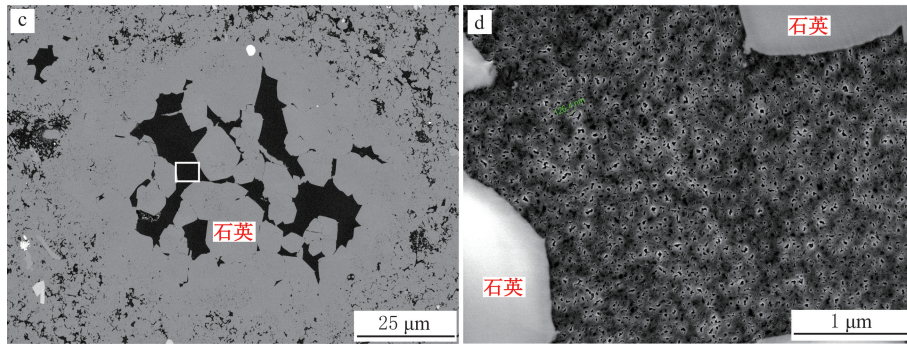
图 9 红页 X 井二叠系页岩孔隙结构相关关系
Fig. 9 Correlation analysis of pore structure of Permian shales in well HY-X

4.2 硅质及钙质微体生物化石对储层的影响

分析研究区硅质及钙质微体生物化石对储层孔隙的影响,对富含生物化石的页岩样品进行精细抛光处理,利用 FE-SEM 进行高分辨率下微区原位分析。观察研究区页岩样品中放射虫的微观结构特征,其中硅质环形外边代表放射虫囊壁,囊体内的石英颗粒普遍较小,粒径多在 $3\ \mu\text{m}$ 以下,整体呈分散漂浮状分布(见图 10(a));也有部分放射虫囊体内的石英重结晶作用强,呈半自形—自形石英晶体,粒径为 $5\sim 20\ \mu\text{m}$ (见图 10(c))。除石英外,放射虫囊体内的剩余孔隙空间普遍充填大量沥青(见图 10(a,c)),表明硅质框架的抗压实作用,使放射虫囊体在成岩作用早期保留足够的孔隙空间供液态烃类充注。沥青内发育丰富有机孔隙,呈椭圆形、三角形和不规则多边形等形态(见图 10(b,d))。

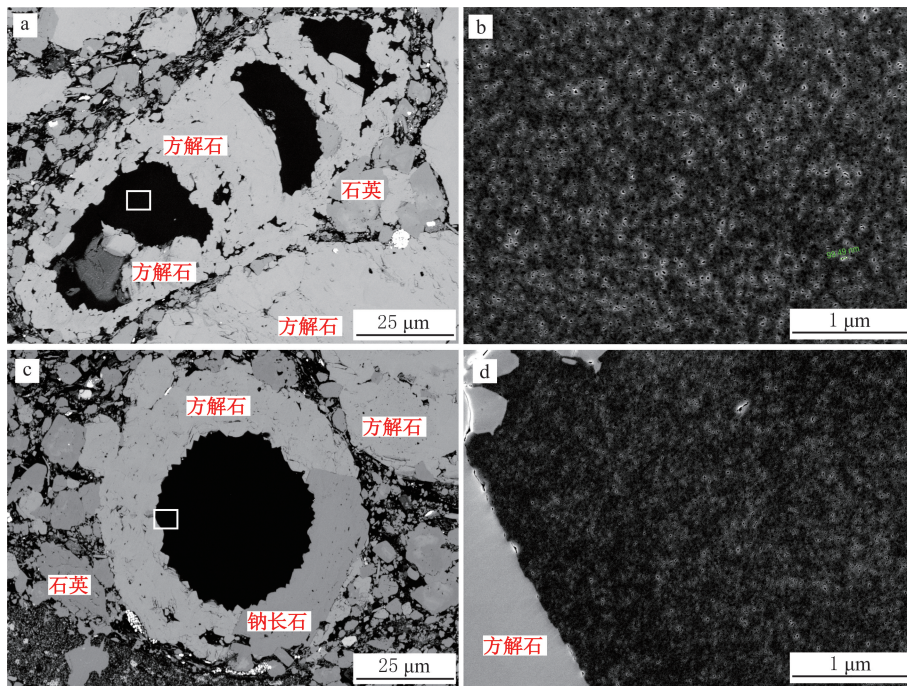
相较于生物成因硅质化石,海相页岩生物成因钙质化石及其对储层孔隙影响的研究较少,马遵青等认为钙质有孔虫壳体的硬度虽然小于硅质放射虫的,但壳内隔壁较发达,圆弧形壳壁的抗压实性和支撑作用^[20],使钙质有孔虫能够有效抵抗上覆地层的压实作用,促进海相页岩有机孔隙的保存^[21]。红星地区茅四段—吴二段页岩样品钙质有孔虫的房室常被方解石、石英等自生矿物充填,残余孔隙空间充填大量沥青(见图 11(a)),也有部分房室被沥青完全充填(见图 11(c))。有孔虫具有独立的房室,壳体的相对封闭性较高,在某种程度上能够有效阻碍液态烃类的外逸,因此研究区页岩样品有孔虫房室内普遍见沥青充填,且在 FE-SEM($\times 80\ 000$)下观察到有孔虫房室内的沥青发育大量密集分布的有机孔隙(见图 11(b,d))。





(a) 硅质放射虫, FE-SEM (BSE), 茅四段; (b) 图 (a) 中白框放大, FE-SEM (SE), 茅四段; (c) 硅质放射虫, 石英重结晶作用强, FE-SEM (BSE), 吴二段; (d) 图 (c) 中白框放大, FE-SEM (SE), 吴二段

图 10 红页 X 井二叠系页岩硅质生物化石粒内孔中有机孔隙发育特征
Fig.10 Characteristics of organic pores in siliceous fossils in Permian shales of well HY-X

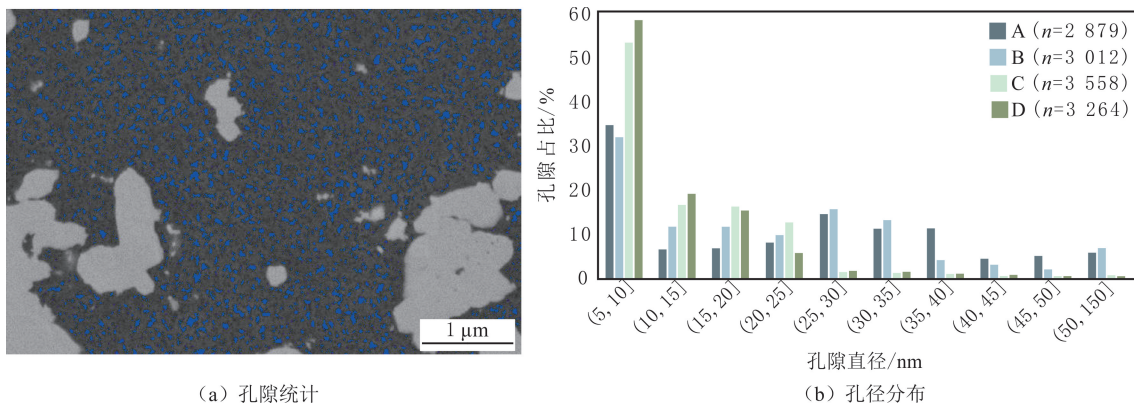


(a) 钙质有孔虫, FE-SEM (BSE), 茅四段; (b) 图 (a) 中白框放大, FE-SEM (SE), 茅四段; (c) 钙质有孔虫, 部分方解石被钠长石交代, FE-SEM (BSE), 吴二段; (d) 图 (c) 中白框放大, FE-SEM (SE), 吴二段

图 11 红页 X 井二叠系页岩钙质生物化石粒内孔中有机孔隙发育特征
Fig.11 Characteristics of organic pores in calcareous fossils in Permian shales of well HY-X

根据高分辨率 SEM 图像,利用 Avizo 图像处理软件对硅质、钙质生物化石粒内孔中沥青有机孔隙数、面孔率及孔径分布进行统计(见图 12,样品采用相同统计范围,蓝色区域代表不同有机孔隙)。沥青中有机孔隙异常发育,统计范围内有机孔隙数超过 2 800 个(见图 12(b),有机孔隙的孔径是将不同有机孔隙的横截面面积等效为同等圆形的面积后计算的孔隙直径,A、B、C、D 分别对应图 10(b,d)和图 11(b,d))。受一定程度分辨率限制,孔径在 5 nm 以下的孔隙未进入统计范围,但有机孔隙面孔率为 19%~22%,孔径整体以 5~50 nm 为主,与氮气吸附-脱附分析结果一致。与硅质生物化石相比,钙质生物化石粒内孔中沥青发育的有机孔隙孔径小,其中孔径为 5~10 nm 的在 50%以上(见图 12(b))。邵德勇等观察到 Eagle

Ford 页岩有孔虫房室中的沥青在生油窗时发育丰富海绵状小孔,在生气窗时发育微米级气泡状及不规则状大孔^[21]。气泡状孔隙一般形成于早期运移沥青内部,主要与沥青转化过程中气、液两相分离过程有关^[40]。研究区二叠系页岩有孔虫化石房室内的沥青中未见气泡状大孔,可能代表相对后期形成并充填在房室中的运移沥青^[41]。川东红星地区茅四段—吴二段海相页岩硅质及钙质框架的“保护”,既有利于生物化石粒内孔等原生孔隙的保存,还有利于成岩作用后期储层有机孔隙的规模保存,表明海相优质储层成因机制之一的“生物硅钙控格架”^[42]适用于二叠系海相页岩。



(a) 孔隙统计

(b) 孔径分布

图 12 红页 X 井二叠系页岩生物化石粒内孔有机孔隙统计及孔径分布

Fig. 12 Statistics of organic pores and distribution of organic pore diameters in fossils of Permian shales in well HY-X

5 结论

(1) 川东红星地区茅四段—吴二段页岩中脆性矿物(以石英和方解石为主)质量分数高,其中生物成因钙质及硅质化石广泛发育,主要表现为钙质有孔虫、钙质介壳及硅质放射虫等微体生物化石。

(2) 研究区茅四段—吴二段页岩主要发育微孔和介孔,有机质是微孔和介孔发育的主要载体,且微孔和介孔贡献主要的比表面积。

(3) 研究区茅四段—吴二段页岩钙质有孔虫房室及硅质放射虫囊体内普遍充填沥青,沥青内有机孔隙异常发育(超过 2 800 个、面孔率为 19%~22%),揭示海相页岩生物成因硅钙化石的抗压实作用既有利于生物化石粒内孔等原生孔隙的保存,还有利于成岩作用后期储层有机孔隙的规模保存。

参考文献(References):

[1] 马永生,黎茂稳,蔡勋育,等. 中国海相深层油气富集机理与勘探开发:研究现状、关键技术瓶颈与基础科学问题[J]. 石油与天然气地质, 2020, 41(4): 655-672.
 MA Yongsheng, LI Maowen, CAI Xunyu, et al. Mechanisms and exploitation of deep marine petroleum accumulations in China: advances, technological bottlenecks and basic scientific problems[J]. Oil & Gas Geology, 2020, 41(4): 655-672.

[2] 王子涵,高平,冯越,等. 川东地区五峰—龙马溪组超深层页岩孔隙结构特征及主控因素[J]. 东北石油大学学报, 2023, 47(1): 57-69.
 WANG Zihan, GAO Ping, FENG Yue, et al. Pore structure characteristics and main controlling factors of the ultra deep shales of the Wufeng-Longmaxi Formation in Eastern Sichuan Basin[J]. Journal of Northeast Petroleum University, 2023, 47(1): 57-69.

[3] 向克满,史洪亮,王幸蒙,等. 川南地区深层页岩气储层特征及含气性主控因素[J]. 东北石油大学学报, 2023, 47(3): 44-55.
 XIANG Keman, SHI Hongliang, WANG Xingmeng, et al. Reservoir characteristics and main controlling factors of gas content of deep shale gas in Southern Sichuan Basin[J]. Journal of Northeast Petroleum University, 2023, 47(3): 44-55.

[4] 胡德高,周林,包汉勇,等. 川东红星地区 HY1 井二叠系页岩气勘探突破及意义[J]. 石油学报, 2023, 44(2): 241-252.
 HU Degao, ZHOU Lin, BAO Hanyong, et al. Breakthrough and significance of Permian shale gas exploration of well HY1 in Hongxing Area, Eastern Sichuan Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2023, 44(2): 241-252.

[5] 包汉勇,赵帅,梁榜,等. 川东红星地区二叠系吴家坪组页岩气富集高产主控因素与勘探启示[J]. 中国石油勘探, 2023, 28(1): 71-82.
 BAO Hanyong, ZHAO Shuai, LIANG Bang, et al. Enrichment and high yield of shale gas in the Permian Wujiaping Formation in Hongxing Area of Eastern Sichuan and its exploration implications[J]. China Petroleum Exploration, 2023, 28(1): 71-82.

- [6] 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): 93-109.
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): 93-109.
- [7] 余寅, 夏鹏, 王英彪, 等. 过成熟海相页岩有机质赋存状态及特征: 以贵州下寒武统牛蹄塘组页岩为例[J]. 东北石油大学学报, 2022, 46(4): 48-61.
YU Yin, XIA Peng, WANG Yingbiao, et al. Occurrence state and characteristics of organic matter in over-mature marine shale: a case study for the Lower Cambrian Niutitang Formation in Guizhou Province[J]. Journal of Northeast Petroleum University, 2022, 46(4): 48-61.
- [8] 陈渝川, 林伟, 李明涛, 等. 川南—川东地区龙马溪组优质页岩分布及主控因素[J]. 特种油气藏, 2024, 31(4): 54-63.
CHEN Yuchuan, LIN Wei, LI Mingtao, et al. The distribution and main controlling factors of high-quality shale in Longmaxi Formation in Southern Sichuan—Eastern Sichuan Region[J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2024, 31(4): 54-63.
- [9] 史森, 张金川, 袁野, 等. 上扬子黔西北地区海相与海陆过渡相页岩气储层孔隙特征差异性研究[J]. 特种油气藏, 2022, 29(3): 9-17.
SHI Miao, ZHANG Jinchuan, YUAN Ye, et al. Study on the difference of pore characteristics between marine and marine-continental transitional shale gas reservoirs in Upper Yangtze Region, Northwest Guizhou[J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2022, 29(3): 9-17.
- [10] 王拔秀, 张鹏辉, 梁杰, 等. 生物成因微晶石英特征及其对海相页岩储层孔隙发育的影响[J]. 沉积学报, 2022, 42(5): 1738-1752.
WANG Baxiu, ZHANG Penghui, LIANG Jie, et al. Biogenic microcrystalline quartz and its influence on pore development in marine shale reservoirs[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2022, 42(5): 1738-1752.
- [11] MILLIKEN K L, ERGENE S M, OZKAN A. Quartz types, authigenic and detrital, in the Upper Cretaceous Eagle Ford Formation, South Texas, USA[J]. Sedimentary Geology, 2016, 339: 273-288.
- [12] MILLIKEN K L, OLSON T. Silica diagenesis, porosity evolution, and mechanical behavior in siliceous mudstones, Mowry Shale (Cretaceous), Rocky Mountains, U. S. A. [J]. Journal of Sedimentary Research, 2017, 87(4): 366-387.
- [13] 秦建中, 陶国亮, 腾格尔, 等. 南方海相优质页岩的成烃生物研究[J]. 石油实验地质, 2010, 32(3): 262-269.
QIN Jianzhong, TAO Guoliang, TENGGER, et al. Hydrocarbon-forming organisms in excellent marine source rocks in South China [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2010, 32(3): 262-269.
- [14] 齐晓婕, 黄宝琦, 秦亚超, 等. 苏北 LYK 钻孔千年以来的沉积记录及古环境演化[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2021, 41(3): 33-43.
QI Xiaojie, HUANG Baoqi, QIN Yachao, et al. Sedimentary records and paleo-environmental evolution of core LYK in Northern Jiangsu Province for a thousand of year[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2021, 41(3): 33-43.
- [15] 秦亚超, 孙荣涛, 王红, 等. 南黄海西部日照海域海侵沉积地层及其古环境意义[J]. 沉积学报, 2020, 38(4): 790-809.
QIN Yachao, SUN Rongtao, WANG Hong, et al. Transgressive succession offshore Rizhao in Western South Yellow Sea and paleo-environmental implications[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2020, 38(4): 790-809.
- [16] LIU J S, DING W L, WANG R Y, et al. Quartz types in shale and their effect on geomechanical properties: an example from the Lower Cambrian Niutitang Formation in the Cencong Block, South China[J]. Applied Clay Science, 2018, 163: 100-107.
- [17] DONG T, HE S, CHEN M F, et al. Quartz types and origins in the Paleozoic Wufeng-Longmaxi Formations, Eastern Sichuan Basin, China: implications for porosity preservation in shale reservoirs[J]. Marine & Petroleum Geology, 2019, 106: 62-73.
- [18] 卢龙飞, 秦建中, 申宝剑, 等. 中上扬子地区五峰组—龙马溪组硅质页岩的生物成因证据及其与页岩气富集的关系[J]. 地质前缘, 2018, 25(4): 226-236.
LU Longfei, QIN Jianzhong, SHEN Baojian, et al. The origin of biogenic silica in siliceous shale from Wufeng-Longmaxi Formation in the Middle and Upper Yangtze Region and its relationship with shale gas enrichment[J]. Earth Science Frontiers, 2018, 25(4): 226-236.
- [19] HAN Y J, HORSFIELD B, CURRY D J. Control of facies, maturation, and primary migration on biomarkers in the Barnett shale sequence in the Marathon 1 Mesquite Well, Texas[J]. Marine & Petroleum Geology, 2017, 85: 106-116.
- [20] 马遵青, 陈国俊, 杨海长, 等. 大型有孔虫壳体对砂岩储集空间及物性的影响: 以琼东南盆地松南凹陷三亚组一段为例[J]. 天然气地球科学, 2019, 30(5): 712-720.
MA Zunqing, CHEN Guojun, YANG Haichang, et al. Effects of large-foraminiferal shells on sandstone reservoir space and physical properties: case study of the 1st member of Sanya Formation, Songnan Sag, Qiongdongnan Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2019, 30(5): 712-720.
- [21] 邵德勇, 李艳芳, 张六六, 等. 泥岩微观组构对有机质赋存形式和孔隙发育的影响研究: 以白垩系 Eagle Ford 页岩为例[J]. 地质前缘, 2023, 30(3): 151-164.
SHAO Deyong, LI Yanfang, ZHANG Liuliu, et al. Influence of microscopic fabric on organic matter occurrence and pore development in mudrock: a case study of the Cretaceous Eagle Ford shale[J]. Earth Science Frontiers, 2023, 30(3): 151-164.
- [22] SCHIEBER J, LAZAR R, BOHACS K, et al. An SEM study of porosity in the Eagle Ford shale of Texas: pore types and porosity distribution in a depositional and sequence-stratigraphic context[M]// BREYER J A. The Eagle Ford shale: a renaissance in U. S. oil production. Tulsa: American Association of Petroleum Geologists, 2016: 167-186.

- [23] HAN C, HAN M, JIANG Z X, et al. Source analysis of quartz from the Upper Ordovician and Lower Silurian black shale and its effects on shale gas reservoir in the Southern Sichuan Basin and its periphery, China[J]. *Geological Journal*, 2019,54(1):438-449.
- [24] 赵建华,金之钧,金振奎,等.四川盆地五峰组—龙马溪组含气页岩中石英成因研究[J].*天然气地球科学*,2016,27(2):377-386.
ZHAO Jianhua, JIN Zhijun, JIN Zhenkui, et al. The genesis of quartz in Wufeng-Longmaxi gas shales, Sichuan Basin[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2016,27(2):377-386.
- [25] 孙川翔,聂海宽,刘光祥,等.石英矿物类型及其对页岩气富集开采的控制:以四川盆地及其周缘五峰组—龙马溪组为例[J].*地球科学*,2019,44(11):3692-3704.
SUN Chuanxiang, NIE Haikuan, LIU Guangxiang, et al. 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[J]. *Earth Science*, 2019,44(11):3692-3704.
- [26] NIU X, YAN D T, ZHUANG X G, et al. Origin of quartz in the Lower Cambrian Niutitang Formation in South Hubei Province, Upper Yangtze Platform[J]. *Marine & Petroleum Geology*, 2018,96:271-287.
- [27] CHEN X L, SHI W Z, HU Q H, et al. Origin of authigenic quartz in organic-rich shales of the Niutitang Formation in the northern margin of Sichuan Basin, South China: implications for pore network development[J]. *Marine & Petroleum Geology*, 2022, 138:105548.
- [28] 郑爱维,孟志勇,李凯,等.川东红星地区二叠系吴家坪组页岩储层纵向非均质性特征及其发育主控因素[J].*天然气地球科学*,2023, 34(9):1500-1514.
ZHENG Aiwei, MENG Zhiyong, LI Kai, et al. Vertical heterogeneity characteristics and main controlling factors of the Permian Wujiaping Formation shale reservoir in Hongxing Area, Eastern Sichuan[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2023,34(9):1500-1514.
- [29] 黄涵宇,何登发,李英强,等.四川盆地及邻区二叠纪梁山—栖霞组沉积盆地原型及其演化[J].*岩石学报*,2017,33(4):1317-1337.
HUANG Hanyu, HE Dengfa, LI Yingqiang, et al. The prototype and its evolution of the Sichuan sedimentary basin and adjacent areas during Liangshan and Qixia stages in Permian[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2017,33(4):1317-1337.
- [30] 梁新权,周云,蒋英,等.二叠纪东吴运动的沉积响应差异:来自扬子和华夏板块吴家坪组或龙潭组碎屑锆石 LA-ICPMS U-Pb 年龄研究[J].*岩石学报*,2013,29(10):3592-3606.
LIANG Xinquan, ZHOU Yun, JIANG Ying, et al. Difference of sedimentary response to Dongwu Movement: study on LA-ICPMS U-Pb ages of detrital zircons from Upper Permian Wujiaping or Longtan Formation from the Yangtze and Cathaysia blocks[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2013,29(10):3592-3606.
- [31] 刘光祥,金之钧,邓模,等.川东地区上二叠统龙潭组页岩气勘探潜力[J].*石油与天然气地质*,2015,36(3):481-487.
LIU Guangxiang, JIN Zhijun, DENG Mo, et al. Exploration potential for shale gas in the Upper Permian Longtan Formation in Eastern Sichuan Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2015,36(3):481-487.
- [32] 王鹏威,刘忠宝,张殿伟,等.川东地区二叠系海相页岩有机质富集对有机质孔发育的控制作用[J].*石油与天然气地质*,2023,44(2): 379-392.
WANG Pengwei, LIU Zhongbao, ZHANG Dianwei, et al. Control of organic matter enrichment on organic pore development in the Permian marine organic-rich shale, Eastern Sichuan Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2023,44(2):379-392.
- [33] 李晓松,周跃飞,赵涵玥,等.胶结壳有孔虫对长石的选择性利用[J].*高校地质学报*,2023,29(2):213-222.
LI Xiaosong, ZHOU Yuefei, ZHAO Hanyue, et al. Selective utilization of feldspars by agglutinated foraminifera[J]. *Geological Journal of China Universities*, 2023,29(2):213-222.
- [34] 彭毅峰.川东地区二叠纪瓜德鲁普世—乐平世界线事件的碳酸盐岩微相与有孔虫形态群研究[D].西安:西北大学,2023:1-10.
PENG Yifeng. Carbonate microfacies and foraminiferal morphogroup study on Guadalupian-Lopingian boundary in Eastern Sichuan [D]. Xi'an: Northwest University, 2023:1-10.
- [35] FOLK R L. Some aspects of recrystallization in ancient limestones[M]//PRAY L C, MURRAY R C. Dolomitization and limestone diagenesis. Tulsa: SEPM Society for Sedimentary Geology, 1965:14-48.
- [36] 王昕尧,金振奎,郭芪恒,等.川东北下侏罗统大安寨段陆相页岩方解石成因[J].*沉积学报*,2021,29(3):704-712.
WANG Xinyao, JIN Zhenkui, GUO Qiheng, et al. Genesis of calcite in nonmarine shale of the Lower Jurassic Da'anzhai Member, Northeastern Sichuan[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2021,29(3):704-712.
- [37] 张琴,刘畅,梅啸寒,等.页岩气储层微观储集空间研究现状及展望[J].*石油与天然气地质*,2015,36(4):666-674.
ZHANG Qin, LIU Chang, MEI Xiaohan, et al. Status and prospect of research on microscopic shale gas reservoir space[J]. *Oil & Gas Geology*, 2015,36(4):666-674.
- [38] 何陈诚,赵永强,俞涵杰,等.川东北地区二叠系大隆组深层页岩气储层孔隙结构及其分形特征[J].*石油实验地质*,2024,46(2): 263-277.
HE Chencheng, ZHAO Yongqiang, YU Lingjie, et al. Pore structure and fractal characteristics of deep shale gas reservoirs in the Permian Dalong Formation, Northeastern Sichuan Basin[J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2024,46(2):263-277.

(下转第 50 页)