

咸化湖盆页岩自生矿物特征及其对微观孔隙发育的控制作用

——以渤海湾盆地济阳坳陷沙河街组为例

李军亮^{1,2}, 刘惠民^{2,3}, 魏晓亮⁴, 张奎华^{2,3}, 张鹏飞^{2,3}, 秦峰^{1,2}, 王勇^{1,2}, 张顺^{1,2}, 李政^{1,2},
刘鑫金^{1,2}, 王伟庆^{1,2}, 孟伟^{1,5}

(1. 中国石化胜利油田分公司勘探开发研究院, 山东东营 257015; 2. 页岩油气富集机理与高效开发全国重点实验室, 山东东营 257015; 3. 中国石化胜利油田分公司, 山东东营 257001; 4. 中国石化石油勘探开发研究院, 北京 102206; 5. 中国石化胜利油田博士后工作站, 山东东营 257015)

摘要:以渤海湾盆地济阳坳陷沙河街组咸化湖盆页岩为研究对象,用扫描电镜(SEM)、阴极发光(CL)以及能谱分析(EDS)等多种手段,系统研究自生矿物特征及其对微观孔隙演化的控制机制。研究表明:①粗晶或次生加大方解石在碱性成岩环境下大量沉淀,导致孔隙度显著下降。②虽然成岩白云石含量低且呈分散状,但碱性胶结阶段酸性流体改造作用的减弱,间接抑制了孔隙保存。③铁白云石多形成于富亚铁离子(Fe^{2+})的酸性环境,常与伊利石化及钠化作用伴生。钠长石和铁白云石虽本身不直接作为孔隙载体,却与面孔率呈显著正相关,体现了酸性流体改造与矿物转化的协同效应。④伊利石是重要的孔隙载体,其片状或纤维状集合体在酸性环境中有助于粒间孔、层理面及微裂缝孔隙的形成与连通。⑤自生石英除细微充填形态外,还可形成特殊的脉状集合体,为周围孔隙结构提供刚性支撑,减缓后期压实作用和胶结作用对孔隙的破坏。⑥沙河街组页岩孔隙演化受酸性阶段“溶蚀-增孔”和碱性阶段“胶结-减孔”交替主导,不同自生矿物组合及其空间分布可作为评价储层孔隙保存潜力的重要指标。

关键词:孔隙演化;酸-碱交替成岩;自生矿物;页岩;咸化湖盆;沙河街组;济阳坳陷;渤海湾盆地

中图分类号:TE121.3 **文献标识码:**A

Authigenic minerals and their control over micro-pore development for saline lacustrine shales: A case study of the Shahejie Formation, Jiyang Depression, Bohai Bay Basin

LI Junliang^{1,2}, LIU Huimin^{2,3}, WEI Xiaoliang⁴, ZHANG Kuihua^{2,3}, ZHANG Pengfei^{2,3}, QIN Feng^{1,2}, WANG Yong^{1,2},
ZHANG Shun^{1,2}, LI Zheng^{1,2}, LIU Xinjin^{1,2}, WANG Weiqing^{1,2}, MENG Wei^{1,5}

(1. Exploration and Development Research Institute, Shengli Oilfield Company, SINOPEC, Dongying, Shandong 257015, China; 2. State Key Laboratory of Shale Oil and Gas Enrichment Mechanisms and Efficient Development, Dongying, Shandong 257015, China; 3. Shengli Oilfield Company, SINOPEC, Dongying, Shandong 257001, China; 4. Petroleum Exploration and Production Research Institute, SINOPEC, Beijing 102206, China; 5. Postdoctoral Scientific Research Station, Shengli Oilfield Company, SINOPEC, Dongying, Shandong 257015, China)

Abstract: This study focuses on the saline lacustrine shales of the Shahejie Formation in the Jiyang Depression, Bohai Bay Basin. Using a range of techniques, including scanning electron microscopy (SEM), cathodoluminescence (CL), and energy-dispersive spectroscopy (EDS), we systematically investigate the characteristics of authigenic minerals in the shales and their influence on micro-pore evolution. The results indicate that coarse-grained calcites or calcites with epitaxial overgrowth precipitated substantially in an alkaline diagenetic environment, leading to significantly reduced

收稿日期:2025-08-21;修回日期:2025-11-03。

第一作者简介:李军亮(1973—),男,博士、研究员,石油地质学。E-mail: lijunliang_slyt@sinopec.com。

通信作者简介:魏晓亮(1991—),男,博士、副研究员,非常规油气地质。E-mail: dylanweixl@foxmail.com。

基金项目:国家自然科学基金项目(U24B6002);国家油气重大专项(2024ZD1405101);中国石化科技攻关项目(P23084,P24027)。

porosity. The diagenetic dolomites, in spite of low content and scattered distribution, also indirectly hindered pore preservation due to the weakened reworking by acidic fluids during cementation in an alkaline environment. Ankerites are mostly formed in a Fe^{2+} -rich acidic environment, frequently associated with illitization and albitization. Albites and ankerites exhibit pronounced positive correlations with thin-section porosity, although they are not direct pore carriers themselves. This relationship reflects the synergistic effects of acidic fluid-induced reworking and mineral transformation. Illites act as important pore carriers, and their platy or fibrous aggregates facilitate the formation and interconnectivity of intergranular pores, bedding-plane pores, and microfractures in an acidic environment. Authigenic quartz, except for some tiny quartz grains that fill pores, can occur as distinctive vein-like aggregates that provide rigid support for surrounding pore structures, thereby mitigating the damage to pores caused by subsequent compaction and cementation. Overall, the pore evolution in the shales of the Shahejie Formation is dominated by alternating dissolution-induced porosity enhancement in an acidic environment and cementation-induced porosity reduction in an alkaline environment. Furthermore, various authigenic mineral assemblages and their spatial distributions can serve as important indicators for assessing the potential for pore preservation in shale reservoirs.

Key words: pore evolution, alternating acidic and alkaline diagenesis, authigenic mineral, shale, saline lacustrine basin, Shahejie Formation, Jiyang Depression, Bohai Bay Basin

引用格式:李军亮,刘惠民,魏晓亮,等. 咸化湖盆页岩自生矿物特征及其对微观孔隙发育的控制作用——以渤海湾盆地济阳坳陷沙河街组为例[J]. 石油与天然气地质, 2025, 46(6): 1980–1997. DOI: 10. 11743/ogg20250615.

LI Junliang, LIU Huimin, WEI Xiaoliang, et al. Authigenic minerals and their control over micro-pore development for saline lacustrine shales: A case study of the Shahejie Formation, Jiyang Depression, Bohai Bay Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2025, 46(6): 1980–1997. DOI: 10. 11743/ogg20250615.

在页岩油气勘探开发不断深入的背景下,储层孔隙结构演化机制不明成为制约甜点识别和产能预测的关键科学问题^[1-2]。自生矿物作为成岩过程中在沉积物原位形成的重要矿物类型,其种类、结构、空间分布以及孔隙之间的耦合关系,直接反映了沉积-成岩环境的演化过程,并对页岩的微观储集性能与力学性能产生深远影响^[3-5]。

页岩自生矿物可通过3种机制影响孔隙发育:①其晶体沉淀直接充填原生孔隙或裂缝,导致孔隙闭合或改性;②其结构支持作用在压实阶段抵抗机械压实,起到保孔作用^[6-7];③作为成岩反应的介质或产物,参与有机质演化、酸性流体生成与迁移等过程,间接促进或抑制孔隙演化^[8-10]。在这一复杂体系中,诸如伊利石、自生石英、斜长石与方解石等自生矿物,其成因机制、微观结构以及空间组合形式构成了孔隙形成与保存的核心控制因素。

近年来,咸化湖盆页岩油勘探获得突破性进展,引发了学界对咸水沉积环境下页岩成岩演化及自生矿物作用的广泛关注。与海相页岩相比,陆相湖盆页岩沉积环境更为多变^[11-12],流体性质更易发生波动,从而使自生矿物的类型更丰富、结构更复杂且分布更具差异性。济阳坳陷沙河街组三段下亚段(Es^{3L})与沙河街组四段上亚段(Es^{4U})页岩是中国陆相页岩油研究与实践

最为集中的层系之一,已积累大量微观孔隙体系与矿物组成关系的研究成果。沙河街组主要发育粒间/粒内孔、溶蚀孔、晶间/晶内孔、有机质相关孔以及层理(顺层)裂缝等多类型储集空间^[13-16]。其中,碳酸盐相关的溶蚀孔在特定层段形成中-大孔,具有较好的孔喉连通性^[17],而纳米级晶间/晶内孔虽对提高面孔率的贡献有限,但具备显著增加孔隙比表面积与吸附能力的作用^[18]。该段页岩中的自生矿物不仅包括大量透镜状、层状和高角度充填的粗晶方解石,还包括广泛发育的伊利石、石英、斜长石、白云石以及铁白云石^[19-20]。这些矿物的形成和转化过程与有机质热演化、酸-碱环境交替以及成岩流体循环密切相关:①黏土矿物(如伊/蒙混层和伊利石)通常主导纳米级孔隙与页岩孔隙比表面积,提升孔隙比表面积与孔隙复杂度,但易引起孔喉细化与润湿性改变^[21];②碳酸盐矿物(如方解石和白云石)一方面以早期胶结-重结晶方式降低孔隙度^[22],另一方面在酸性流体或蒸发-咸化环境下的选择性溶蚀可形成中-大孔与晶间缝,提高孔隙连通性与孔喉半径,二者的“增孔-减孔”效应取决于所属成岩阶段与流体性质^[22-23];③自生石英-长石在部分层段表现为“刚性骨架”与“充填孔隙”的双重作用,其具体发挥何种作用还需研究其与有机质丰度、成岩演化阶段以及纹层结构的耦合关系^[24-30]。

尽管已有研究分析了自生矿物的类型与成因机制,但目前仍存在一些认识上的不足,如陆相咸化湖盆中自生矿物究竟是如何影响页岩孔隙发育的,特别是泥质纹层和碳酸盐纹层交替发育的页岩中,针对不同自生矿物之间的共生关系、空间结构与演化时序尚未建立起系统化模式,对孔隙系统的调控机制亦存在认识上的不足。

本研究以济阳拗陷 E_s^{3L} – E_s^{4U} 的咸化湖盆页岩为研究对象,构建“多尺度扫描+同视域分析+成分–结构–孔隙耦合”的技术流程,首次系统识别出一类“无直接孔隙结构但具有强耦合控孔效应”的间接控孔自生矿物,厘清了不同成岩环境(酸性、碱性)下自生矿物沉淀演化路径及其与孔隙形成的关系。从机制上揭示了页岩中“增孔–保孔”的动态演化过程,为甜点识别提供了新路径。

1 地质背景

济阳拗陷位于中国东部渤海湾盆地南部,是中国东部典型的断陷型湖盆之一,也是当前陆相页岩油重点勘探开发区域。该拗陷总面积约 26 500 km²,分为沾化、车镇、惠民和东营 4 个凹陷^[31]。盆地演化大致经历了 2 个主要阶段:①古近纪早期—中新世早期的断陷阶段(地质年代约 65.0 ~ 24.6 Ma);②中新世中期以来的拗陷后沉降阶段。其沉积地层系统发育完整,自古生界—第四系均有出露,以古近系和新近系为主体,构成了盆地内最重要的烃源岩与储层发育层系。

沙河街组是济阳拗陷最重要的油气成藏层系之一,属于古近纪始新世中、晚期沉积层系,分为沙河街组一段(E_s^1)—沙河街组四段(E_s^4) 4 个亚段。其中, E_s^3 和 E_s^4 为典型的泥页岩厚层发育段,广泛发育富有机质页岩,具备良好的页岩油勘探潜力。 E_s^3 又可细分为上、中、下 3 个亚段(E_s^{3U} , E_s^{3M} , E_s^{3L}), E_s^4 则分为上、下 2 个亚段(E_s^{4U} , E_s^{4L})。本研究关注的 E_s^{3L} – E_s^{4U} 为有机质丰度高、层理发育且在咸水沉积环境中形成的典型页岩层段也是济阳拗陷页岩油勘探开发的主力层段^[31]。

古近纪始新世中、晚期,济阳拗陷内沉积环境主要表现为咸化–半咸化湖泊体系,湖水盐度高、水体稳定性强且蒸发作用显著,有利于沉积物的快速埋藏与有机质的富集保存^[32]。矿物以方解石和黏土矿物为主,其次为石英、斜长石以及白云石等,具有明显的纹层状结构。在成岩演化过程中,不同岩相分别发育出多类型自生矿物,其成因机制、结构特征与分布状态对孔隙结构产生差异化影响。

2 样品来源与分析

2.1 样品来源

为全面揭示济阳拗陷沙河街组页岩中自生矿物的类型、成因以及其与孔隙演化耦合的机制,本研究以济阳拗陷 E_s^{3L} – E_s^{4U} 页岩为研究目标,样品选自济阳拗陷东营凹陷的博兴、牛庄、民丰和利津 4 个主要洼陷(图 1),兼顾富碳酸盐页岩和混合页岩 2 类主力岩相。

2.2 数据采集及分析

采用显微分析与物性测试手段,结合同一视域下的矿物分布、元素组成与孔隙结构特征,实现多参数的定量分析与关联性识别。

利用场发射扫描电镜(FE-SEM),结合 Atlas 系统获取同一视野下的二次电子(SE)、背散射电子(BSE)与能谱(EDS)图像,实现组分识别和孔隙识别的配准(图 2)。配合阴极发光(CL)、背向散射电子衍射(EBSD)以及 X 射线荧光光谱(XRF)扫描,进一步识别石英来源、碳酸盐类型、颗粒大小及元素分布特征。

在同一视域下,提取面孔率、矿物含量以及矿物形貌参数。其中,面孔率是统计孔隙的表面积占比,矿物含量是基于能谱识别的多矿物定量数据。本次研究中分别用矿物颗粒等效直径(ED)与形貌因子(MF)作为刻画矿物形貌的参数,其中 ED 是通过统计矿物颗粒表面积后将矿物颗粒作为标准圆形计算直径所得, MF 是由矿物颗粒周长与矿物颗粒表面积计算所得。

3 页岩地质特征

按照来源, E_s^{3L} – E_s^{4U} 页岩矿物可分为陆源碎屑沉积和盆内生物–化学沉积两类。其中,陆源碎屑以黏土矿物和石英为主,长石含量相对偏低;而盆内化学沉积矿物以方解石为主,含少量白云石、菱铁矿和硬石膏。总体上,研究区内 E_s^{3L} – E_s^{4U} 页岩以富碳酸盐矿物为主, E_s^{4U} 页岩中的碳酸盐矿物含量明显高于 E_s^{3L} 。黏土矿物大部分为伊利石,其次为伊/蒙(I/S)混层矿物,含少量高岭石和绿泥石。 E_s^{3L} 层段 4 种黏土矿物含量平均值分别为 74%, 22%, 2% 和 1%,其中伊/蒙混层中伊利石和蒙脱石的间层比为 18%。 E_s^{4U} 层段 4 种黏土矿物含量的平均值分别为 85%, 13%, 1% 和 1%,伊/蒙混层中伊利石和蒙脱石的间层比为 12%。

利用碳酸盐矿物、黏土矿物和长英质矿物 3 个端

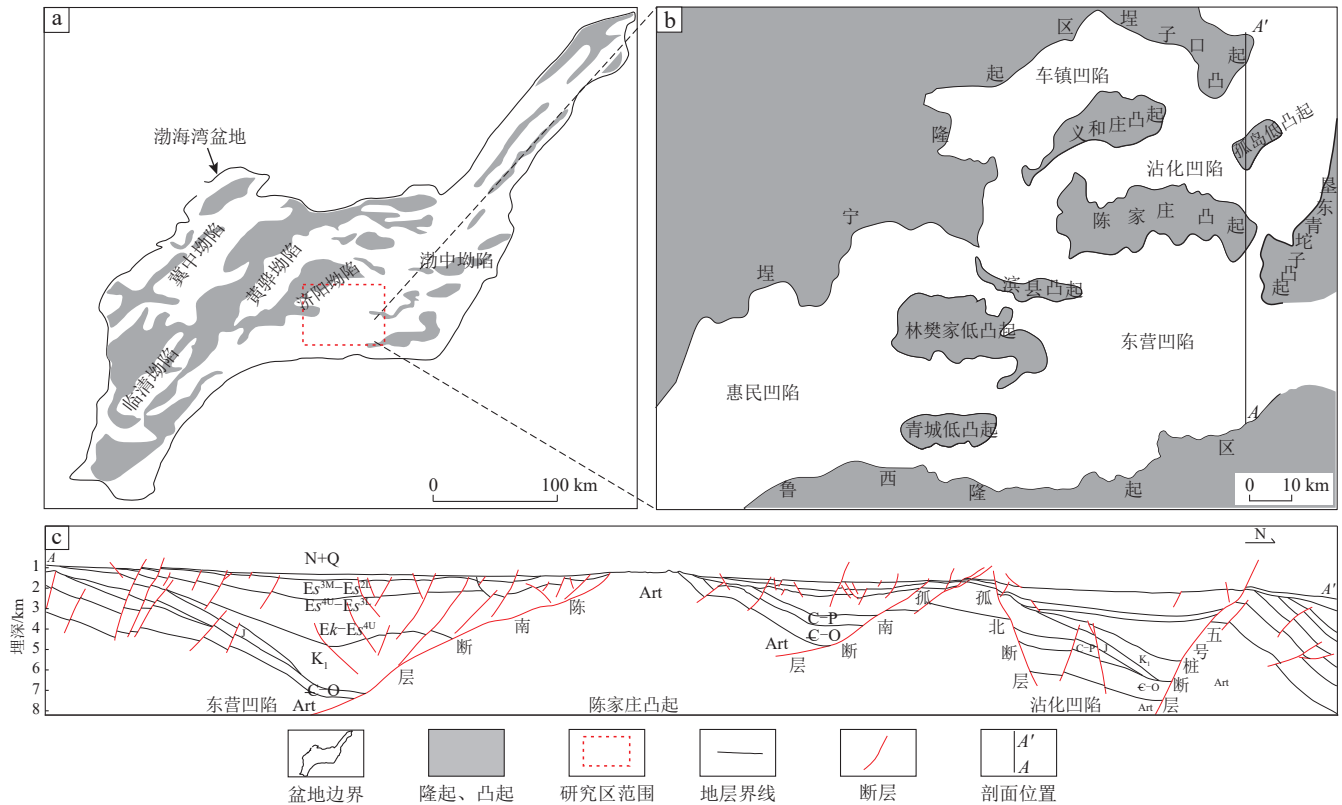


图1 渤海湾盆地济阳拗陷构造及地层分布

Fig. 1 Structure and stratigraphic distribution in the Jiyang Depression, Bohai Bay Basin

a. 研究区位置; b. 研究区构造单元; c. 研究区地层剖面

(图中N+Q表示新近系与第四系; $E_s^{3M}-E_s^{2L}$ 为古近系沙河街组三段中亚段—沙河街组二段下亚段; $E_k-E_s^{4U}$ 为古近系孔店组—沙河街组四段上亚段; K_1 为下白垩统; C-O为寒武系—奥陶系; Art为太古宙片麻岩基底; C-P为石炭系—二叠系; J为侏罗系。)

元可将研究区内的页岩岩相分为富碳酸盐矿物类、混合矿物类、富黏土矿物类和富长英质矿物类4种(图3,图4)。其中,富碳酸盐矿物类和混合矿物类在研究区内占比较高, $E_s^{3L}-E_s^{4U}$ 以纹层状页岩为主,部分地区发育少量层状页岩。

4 自生矿物特征与形成机制

4.1 自生矿物主要类型

济阳拗陷沙河街组页岩中的自生矿物类型丰富(图4),主要包括伊利石、钠长石、自生石英、方解石、白云石以及铁白云石等^[9,13,22,24]。其中,伊利石与方解石含量较高,是控制孔隙结构与储集性能的重要组分。在显微结构上,自生矿物表现出多样化的晶体形貌与沉淀形态,这些形态既反映了其成岩演化阶段的物理—化学条件,也为判别其成因类型提供了重要依据。

4.2 自生矿物形成机制

自生矿物在空间上呈现出多样化的形貌结构与沉淀形态,对页岩的力学属性和孔隙类型产生深远影响。

自生方解石形态多样,包括透镜状、纹层状、纤维状以及高角度脉状充填(图5a—d)。透镜状方解石沿纹层呈不连续透镜体分布,反映沉积后局部微环境中的选择性沉淀^[33-34];纹层状方解石与层理平行,指示沉积早期孔隙水化学环境趋于饱和并沿层沉淀成方解石^[7,35-37];纤维状方解石垂直于裂缝壁生长,反映成岩中、晚期高孔隙流体压力驱动的裂缝开启及同步结晶作用^[22-23];高角度脉状方解石则常与构造活动及深部流体运移有关^[38-39]。自生方解石成因可归纳为两类:①早期成岩阶段富钙离子孔隙水直接沉淀形成粗晶胶结;②有机酸(如乙酸和甲酸)溶解早期微晶方解石后,钙离子在流体通道中重结晶为亮晶脉、透镜状或脉状充填体^[40-41]。

白云石在沙河街组可分为原生微晶、准同生及埋藏再结晶3种类型,主要成因包括高盐度—蒸发环境下

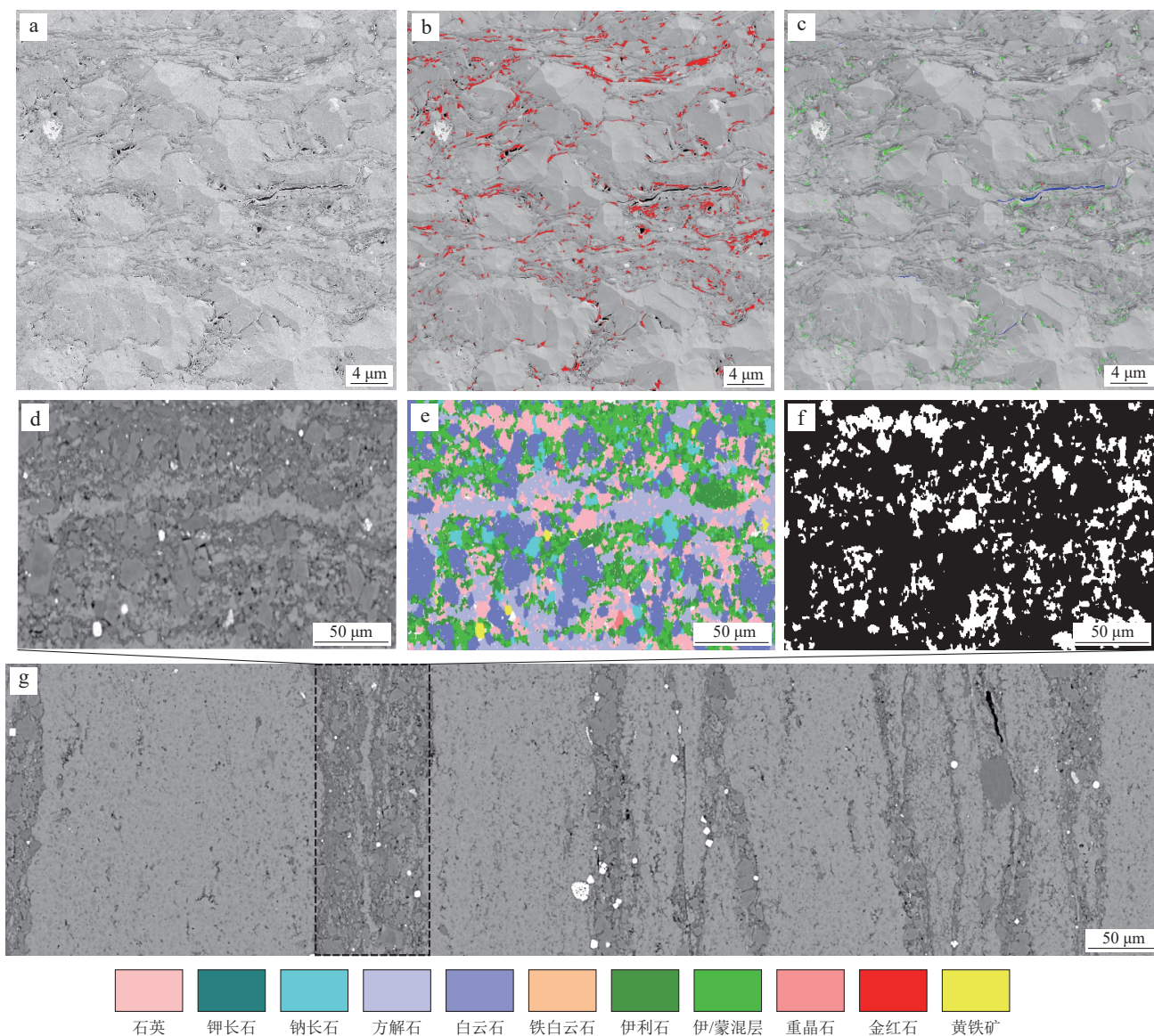


图2 基于扫描电镜(SEM)的面孔率分析(a—c)与基于能谱的矿物含量分析示意图(d—g)

Fig. 2 Schematic diagrams showing SEM-derived thin-section porosity (a—c) and EDS-derived mineral components (d—g)

- a. 扫描电镜原始图像;b. 基于扫描电镜的有机质识别图像;c. 基于扫描电镜的孔隙-裂缝识别图像;d. 纹层背散射电子图像;e. 与背散射电子图像相同视域的矿物能谱分析图像;f. 基于能谱分析图像提取的石英形貌图像;g. 页岩样品背散射电子图像
(图6e中白色区域表示有机质和孔缝;图6f中白色区域表示所提取的石英,黑色区域为其他组分。)

的富镁离子沉淀以及碳酸盐/泥质基质的早期交代^[20, 42]。成岩形成的铁白云石呈中-细粒状,晶形多为自形-半自形菱面体,晶体轮廓相对规整,常具有平直的晶界(图6a,b),局部可见细微的成分分带或不均质灰度变化,反映成分微变或存在细小包裹体。铁白云石晶体排列相对致密,常呈集合体分布,个体间晶界清晰,局部晶粒边缘可见轻微交代痕迹(图6c,d),多形成于富亚铁离子的流体环境,其亚铁离子富集常与有机质脱羧作用有关^[43]。有机质脱羧产生的酸性有机流体溶解含铁矿物,释放三价铁离子并迅速将其还原为亚铁离子。

伊利石主要由蒙脱石或伊/蒙混层矿物转化形成,常呈纸房状(片层弯曲交织)或条带状(片层平行定向)集合体(图7),并与自生石英共生^[44-46]。伊利石的两类结构在形态上存在显著差异:纸房状伊利石(图7a,b)由大量弯曲且交织的片状晶体组成,形似纸张堆叠或蜂窝状骨架,片层之间多呈松散排列,表现出明显的层片弯曲、褶皱和局部堆积特征,晶体边缘常呈羽毛状或撕裂状;而条带状伊利石(图7c,d)则以细长连续的带状晶体集合体为特征,片层紧密平行排列,整体呈规则的定向分布,常沿颗粒接触面或裂隙延展,晶体形态相对平直,局部可见层片叠合成束状。尽管这两类结构

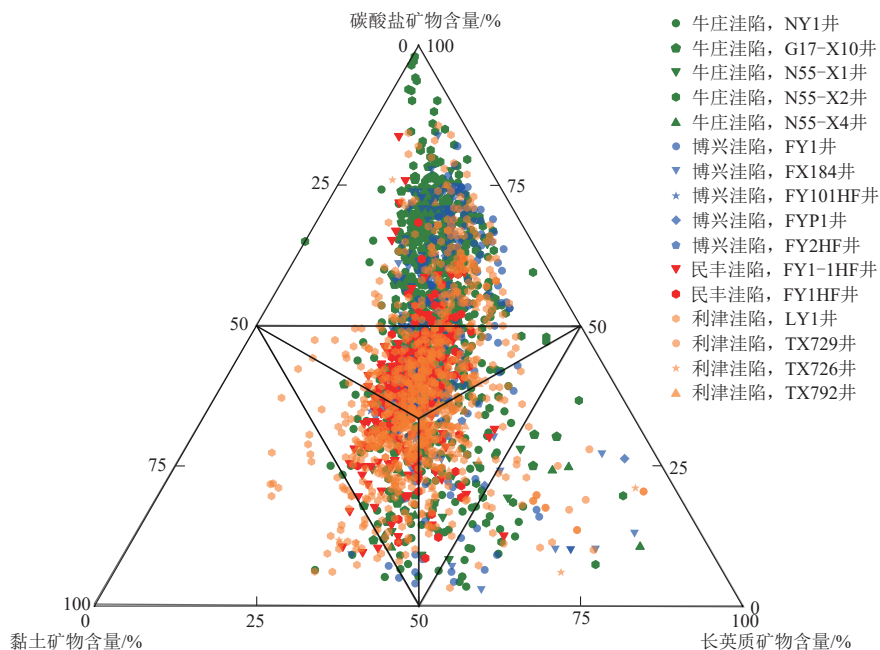


图3 济阳坳陷古近系页岩矿物组分含量三角图

Fig. 3 Ternary diagram showing the mineral composition of the Paleogene shales in the Jiyang Depression

在形态上存在显著差异,但二者形成过程中均伴随层间水脱除、钾离子富集及晶格收缩,促使黏土矿物致密化并释放大量硅,为自生石英的沉淀提供硅源。

自生石英在研究区以单晶、孪晶和聚集体形式出现,多数自生石英颗粒聚集成集合体,根据形貌可以将其分为团块状集合体与脉状集合体两种主要聚集形态(图8a—l)。团块状集合体多呈不规则椭圆形,晶粒致密,常沿粒间或有机质边界产出;脉状集合体连续或半连续充填于裂缝或层理面中,与压溶及后期流体输导密切相关^[9, 44]。硅源主要来自伊利石化及长石交代释放的硅质,以及压力溶解作用提供的硅质。在硅饱和条件下,这些溶解硅在孔隙水中沉淀为微晶石英,沿伊利石或裂缝生长,局部可能叠加火山物质或热液输入^[47]。然而,Fe—Mn—Al元素含量三端元图(图9a—c)显示样品点集中于铝端,远离热液端元区,表明硅质主要源自陆源碎屑,热液供给信号较弱。Al—Si相关性(图9d—f)进一步证实硅元素主要与黏土矿物伴生。民丰洼陷存在铝偏低、硅偏高的离群点,结合Zr—SiO₂关系(图9g—i)推测,除陆源输入外,可能还存在其他的硅源补给。

济阳坳陷Es^{3L}—Es^{4U}页岩中自生斜长石以钠长石为主,形态以自形—半自形为主,颗粒边界清晰且棱角分明,粒径达10 μm,常赋存于碳酸盐溶蚀孔—缝中或与黏土矿物和石英共生(图4g,图10a,图10b)。其成因包括:①钾长石在有机酸和高盐度孔隙水作用下发生钠化交代;②Na⁺/(Al+Si)值在适宜范围时,孔隙水直接

沉淀^[9, 48–49]。页岩中“自生石英+自生碳酸盐”的共沉淀过程会消耗溶液中的硅、钙和镁元素,间接促进钠长石沉淀。

5 自生矿物对孔隙发育的影响

页岩储层孔隙结构的形成与演化是一个受控于成岩流体、有机质转化以及矿物重构等多因素交互作用的复杂过程。在这一过程中,自生矿物不仅通过自身结构提供储集空间,还通过调控孔隙结构的演化路径,间接影响页岩的微观储集能力。本研究通过观察发现页岩中伊利石、自生石英以及部分方解石颗粒是孔隙的主要载体(图4,图6)。同时,为了探究页岩组分和孔隙发育的量化关系,分别对方解石纹层(ML)和泥质纹层(AL)的组分含量与面孔率相关性进行分析(图11)。通过分析量化的相关性关系及基于扫描电镜的定性观察,将沙河街组页岩中自生矿物对孔隙发育的影响机制分为两类:直接影响孔隙发育与间接控制孔隙发育。

5.1 自生矿物直接影响孔隙发育

5.1.1 直接促进孔隙发育

自生伊利石和自生石英是直接影响页岩孔隙发育的两类主要矿物。伊利石在从蒙脱石转化过程中失去了大量晶间水,结构收缩产生初始微孔。同时,部分区

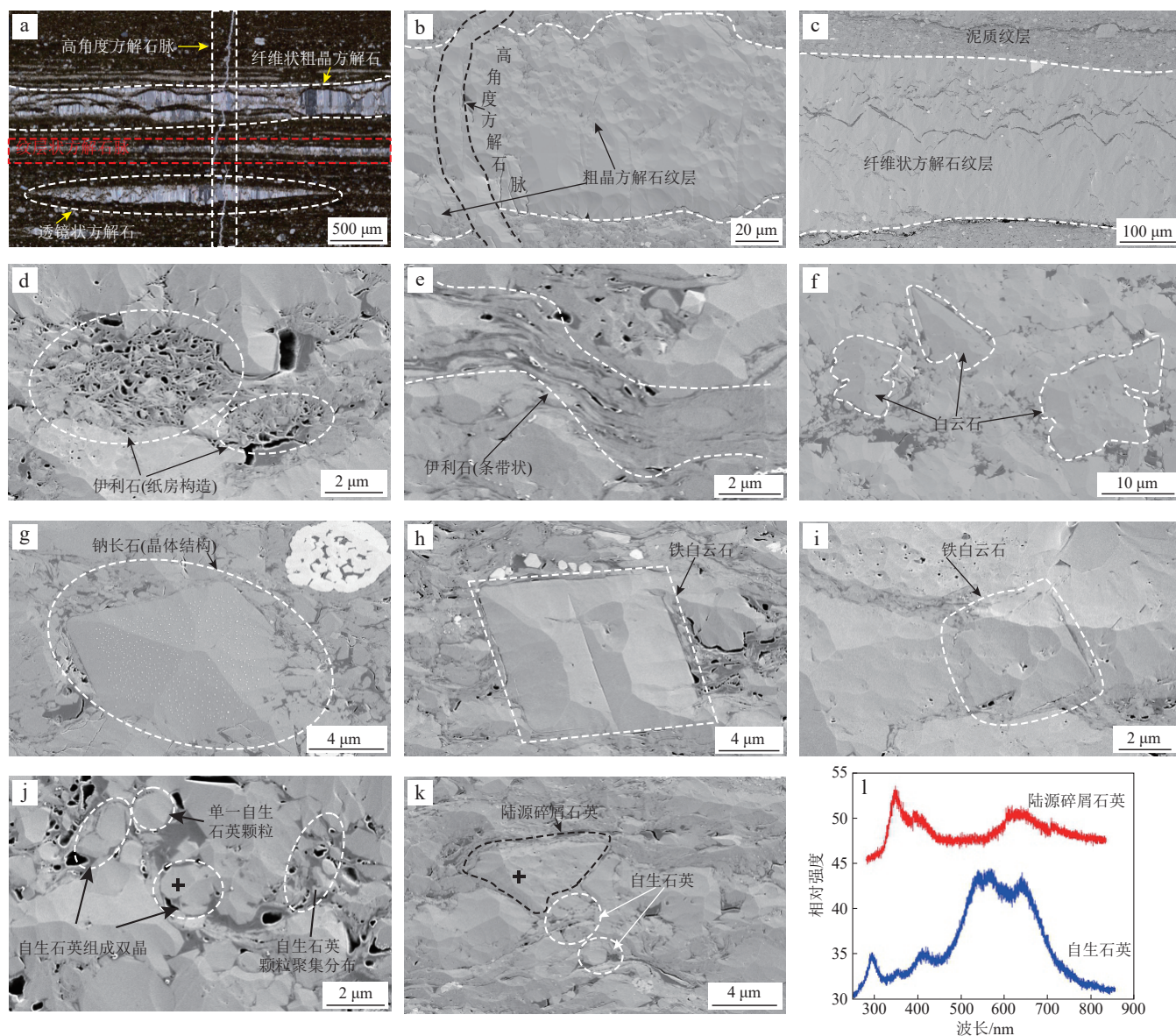


图4 济阳坳陷沙河街组页岩典型自生矿物光学显微及扫描电镜照片

Fig. 4 Optical micrographs and SEM images of representative authigenic minerals in shales of the Shahejie Formation, Jiyang Depression
a. F120井,埋深3 277.40 m,纤维状粗晶方解石纹层,透镜状粗晶方解石纹层及方解石脉充填高角度裂缝,透射光,普通薄片;b. F120井,埋深3 277.40 m,粗晶方解石纹层及高角度方解石脉,扫描电镜;c. F120井,埋深3 277.40 m,纤维状粗晶方解石纹层,扫描电镜;d. N55X1-1井,埋深3 584.12 m,具有“纸房结构”的多孔伊利石,扫描电镜;e. N55X1-1井,埋深3 584.12 m,条带状伊利石发育极少孔隙,扫描电镜;f. FYP1井,埋深3 472.14 m,成岩白云石,扫描电镜;g. FYP1井,埋深3 472.14 m,自生钠长石表面不发育孔隙,扫描电镜;h. FYP1井,埋深3 472.14 m,自生铁白云石,表面不发育孔隙,扫描电镜;i. F120井,埋深3 264.29 m,自生铁白云石包裹沉积铁白云石,沉积铁白云石中发育少量孔隙,扫描电镜;j. N55X1-1井,埋深3 584.12 m,多种晶体类型自生石英,自生石英之间发育粒间孔,扫描电镜;k. N55X1-5井,埋深3 608.76 m,陆源碎屑石英与自生石英共存,不发育孔隙,扫描电镜;l. 为自生石英和陆源石英的阴极发光谱图,其中蓝色曲线为图j中自生石英颗粒(+标记处)阴极发光谱图,红色曲线为图k中陆源石英颗粒(+标记处)阴极发光谱图

域形成“纸房结构”,该结构间隙发育良好,能在成岩压实作用下保留一定孔隙(图4a,d)。伊利石与有机质共生区域形成的“有机质-黏土矿物”复合结构中,也常出现有机质内孔(图4e),在富有机质区具有显著储集潜力。

自生石英以脉状聚集体形式充填于层理或裂缝中

时,会形成相对刚性的骨架结构。这种骨架不仅可防止后期压实闭孔,还在其边缘与邻近有机质之间形成大量微细缝隙,提供流体运移通道。特别是在方解石纹层和泥质纹层中出现的脉状石英聚集体,常与有机质共生,周围微孔密集分布,是页岩中重要的流体存储与运移通道。高形貌因子(MF)的伊利石、自生石英聚

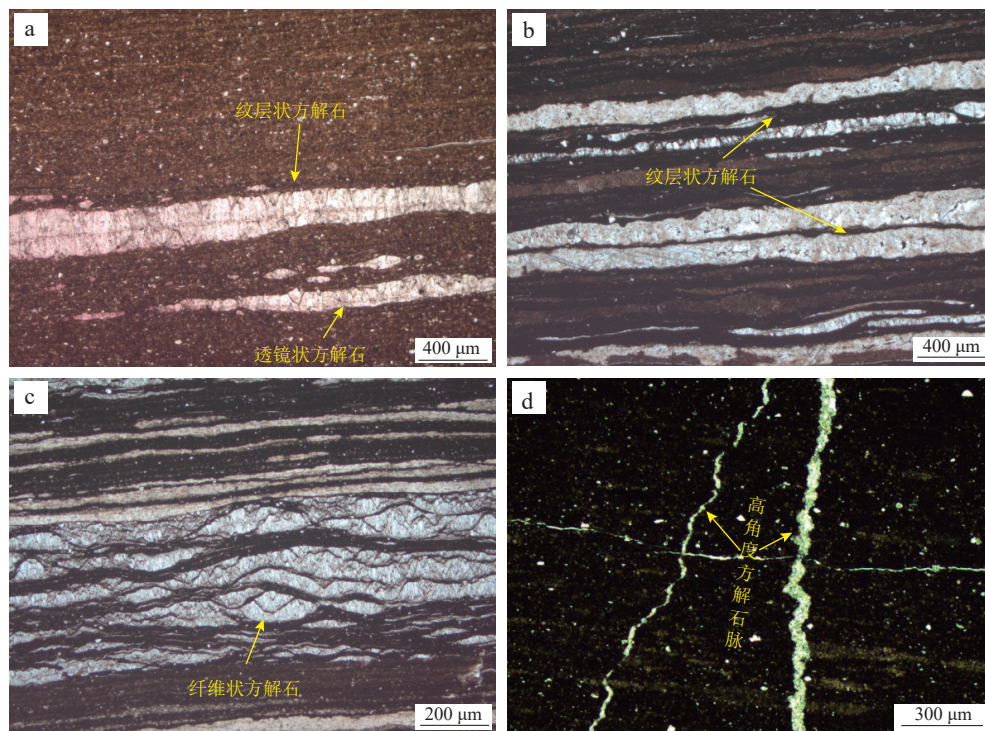


图5 济阳坳陷沙河街组页岩典型自生方解石光学显微照片(普通薄片)

Fig. 5 Optical micrographs of typical authigenic calcites in shales of the Shahejie Formation, Jiyang Depression (thin sections)

a. 纹层状方解石和透镜状方解石,透射光;b. 纹层状方解石,透射光;c. 纤维状解石,透射光;d. 高角度方解石脉,荧光

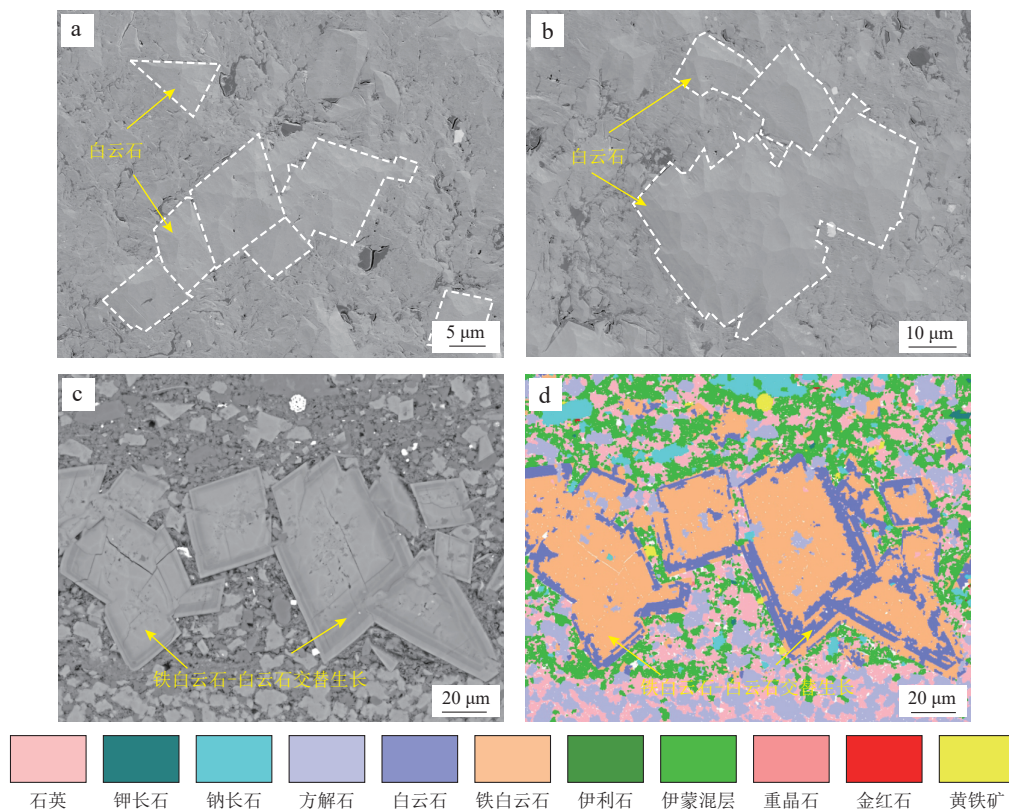


图6 济阳坳陷沙河街组白云石(a,b)和铁白云石(c,d)微观特征图像

Fig. 6 Microscopic characteristics of dolomites (a,b) and ankerites (c,d) in shales of the Shahejie Formation, Jiyang Depression

a,b. 成岩白云石,可见规则的菱形晶体结构,二次电子图像;c. 铁白云石和白云石交替生长,背散射电子图像;d. 铁白云石和白云石交替生长,与图6c相同视域的矿物分布能谱图像(图6d中白色区域表示有机质和孔缝。)

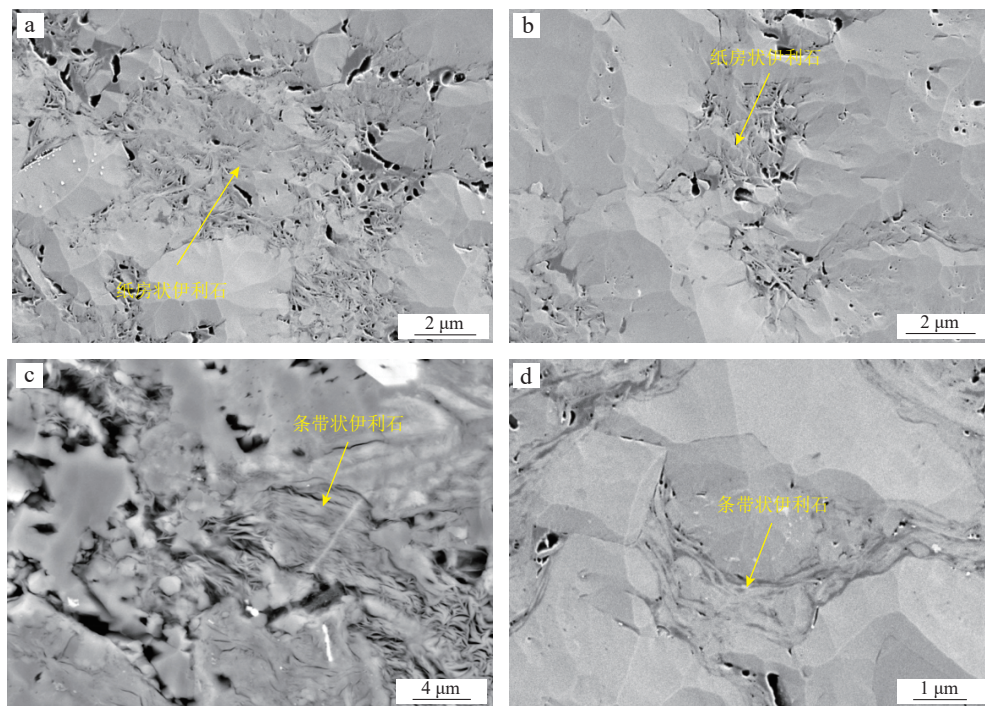


图7 济阳坳陷沙河街组页岩伊利石微观特征扫描电镜照片

Fig. 7 SEM images showing the microscopic characteristics of illites in shales of the Shahejie Formation, Jiyang Depression

a, b. 具有纸房结构的伊利石内发育大量孔隙;c, d. 条带状伊利石内发育少量孔隙

集体与有机质相互作用,能更有效地限制周围矿物或有机质塌陷,进而在压实过程中起到骨架支撑作用。统计结果显示,在方解石纹层与泥质纹层中,石英聚集体形貌因子越高且等效直径越适中,面孔率越高,说明其对孔隙发育具有直接、正向的促进作用(图12)。

5.1.2 直接充填孔隙

相较于酸性环境,碱性成岩流体主要促进碳酸盐类(如粗晶方解石)的大量沉淀与重结晶。这些自生方解石常以透镜状、层状或脉状充填于初始孔隙与裂缝中,导致原生孔隙闭合,孔隙率降低。方解石纹层中的可见孔隙多沿晶界、三重点及微裂缝分布,晶粒粗化会导致界面密度下降,从而减少潜在的孔隙位点。同时,粗晶方解石的形成通常与重结晶和次生加大作用密切相关,早期晶界缝及微孔在这一过程中被吞并或胶结,压力溶解与再沉淀作用进一步愈合孔隙,导致面孔率系统性下降(图4b,图4c,图11e)。

面孔率随方解石含量增加而降低的趋势,在方解石纹层与泥质纹层中均有体现,但其控制机制存在差异。在方解石纹层中,方解石含量增加强化了次生加大与晶粒粗化作用,加速了矿物界面处孔隙的封闭,导致面孔率下降幅度显著增大;而在泥质纹层中,新增方解石多以分散胶结形式充填于黏土颗粒间微孔、有机

质收缩孔及微裂缝内,逐步削弱了孔隙连通性,使面孔率呈缓慢递减趋势。尽管降幅不同,但两类纹层中方解石均通过胶结与填充作用降低了有效面孔率,从而形成一致的负相关关系。

此外,高角度裂缝被方解石完全充填,指示成岩流体富含钙离子和碳酸氢根离子。这些流体优先沿裂缝这一优势通道运移并发生沉淀,该过程受控于裂缝的高渗透性,是界面优先胶结机制的典型表现。此类胶结作用不仅直接降低了裂缝系统的有效性,也为纹层中面孔率随方解石含量增加而降低的宏观趋势提供了关键的成因解释。综合来看,方解石含量和颗粒尺度共同控制了碳酸盐纹层与泥质纹层的孔隙结构演化路径,最终呈现“颗粒越粗、孔隙越少,方解石越多、孔隙越少”的现象。

5.2 自生矿物间接影响孔隙发育

5.2.1 酸性流体环境协同促进孔隙发育

某些自生矿物本身并不直接提供孔隙,但其形成环境往往与孔隙发育机制具有强相关性。钠长石与铁白云石颗粒表面和边缘均明显不发育孔隙(图4g—i,图6c,图10a,图10b,图13),且二者在方解石纹层和泥质纹层中的含量远低于其在黏土矿物和方解石中的含

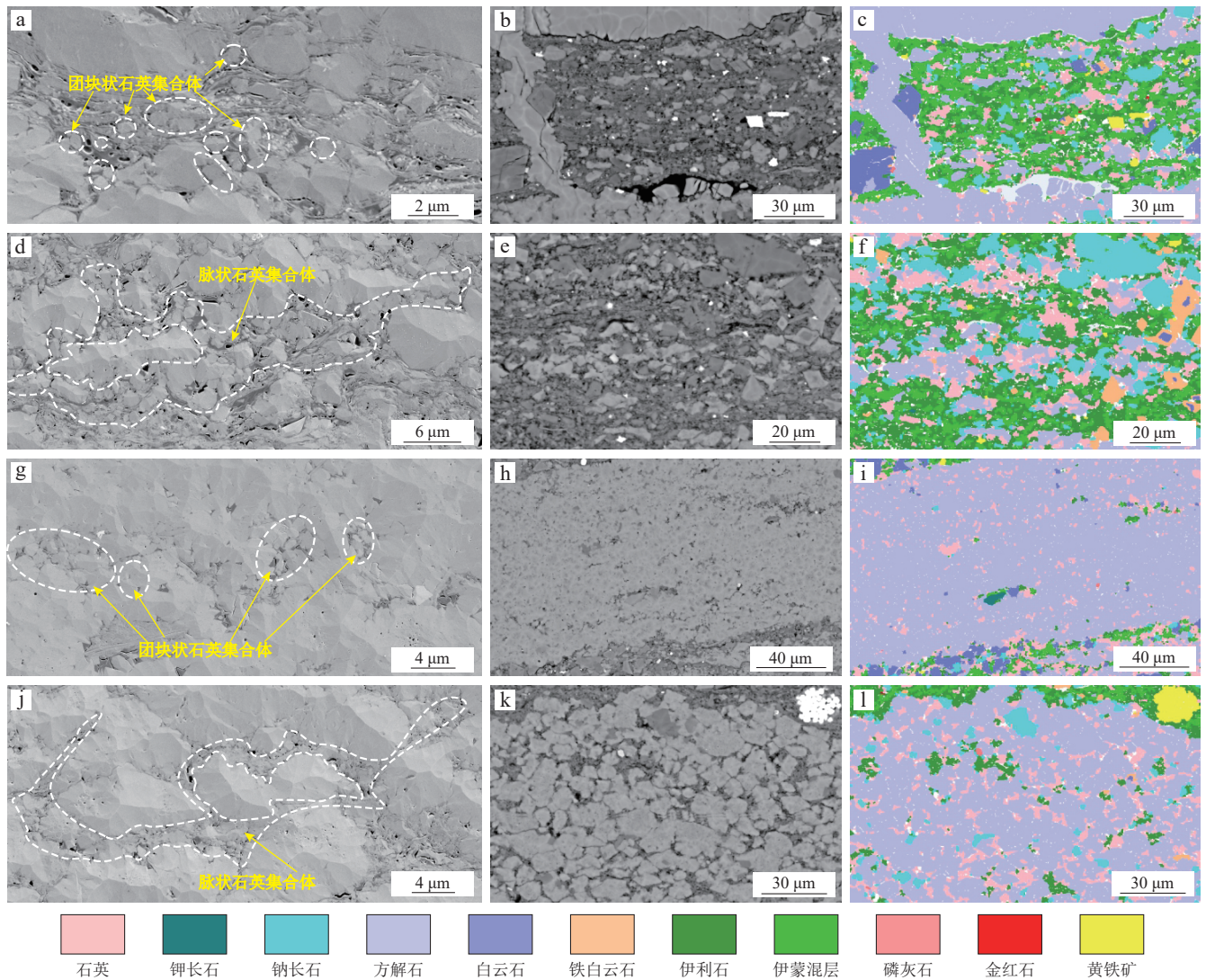


图8 济阳坳陷沙河街组页岩自生石英微观特征图像

Fig. 8 Microscopic characteristics of authigenic quartz in shales of the Shahejie Formation, Jiyang Depression

a—c. 分别为泥质纹层中团块状自生石英的二次电子图像、与之对应的背散射电子图像以及矿物分布能谱图像;d—e. 分别为泥质纹层中脉状自生石英的二次电子图像、与之对应的背散射电子图像以及矿物分布能谱图像;g—i. 分别为方解石纹层中团块状自生石英的二次电子图像、与之对应的背散射电图像以及矿物分布能谱图像;j—l. 分别为方解石纹层中脉状自生石英的二次电子图像、与之对应的背散射电子图像以及矿物分布能谱图像 (图8l中的白色区域表示有机质和孔缝。)

量。然而,钠长石与铁白云石含量与面孔率呈高度正相关(图11):在方解石纹层中,面孔率与钠长石和铁白云石含量的正相关性分别达0.93和0.86(图11g);在泥质纹层中,面孔率与钠长石和铁白云石含量的相关性分别为0.92和0.54(图11b)。这是因为钠长石与铁白云石含量指示了同一套“酸性-还原-开放流体”的成岩演化背景。在有机酸参与的酸性流体作用下,蒙脱石向伊利石转化普遍发生,伊利石以片状-絮状在颗粒间与层理面上发育板间-片间纳米-微米级孔隙,成为主要孔隙载体。与此同期或紧随其后,钠长石化(亦称钠化)作为典型的钠离子交代与溶蚀-沉积过程,在时-空上与伊利石化密切相关,二者不仅表现出

成因上的关联,而且其丰度在统计上也呈协同增加趋势。随着伊利石主导的面孔率的升高,钠长石含量也相应增长。另一方面,铁白云石的形成则需要相对富亚铁离子的流体环境,有机质脱羧作用下所产生的酸性流体溶解含铁矿物、释放三价铁离子并将其还原为亚铁离子^[43]。亚铁离子的供给指示还原环境及酸驱溶解的前期阶段,随后在裂缝或晶体颗粒边界等流体通道内沉淀铁白云石,该过程对原有孔喉的整体封闭效应有限,但记录了孔隙得以保存的开放体系。箱形图显示,二者在泥质纹层中的含量显著高于方解石纹层,证实碳酸盐强胶结的方解石纹层减孔明显,而泥质纹层中“伊利石化-钠化-局部铁白云石化”的组合指

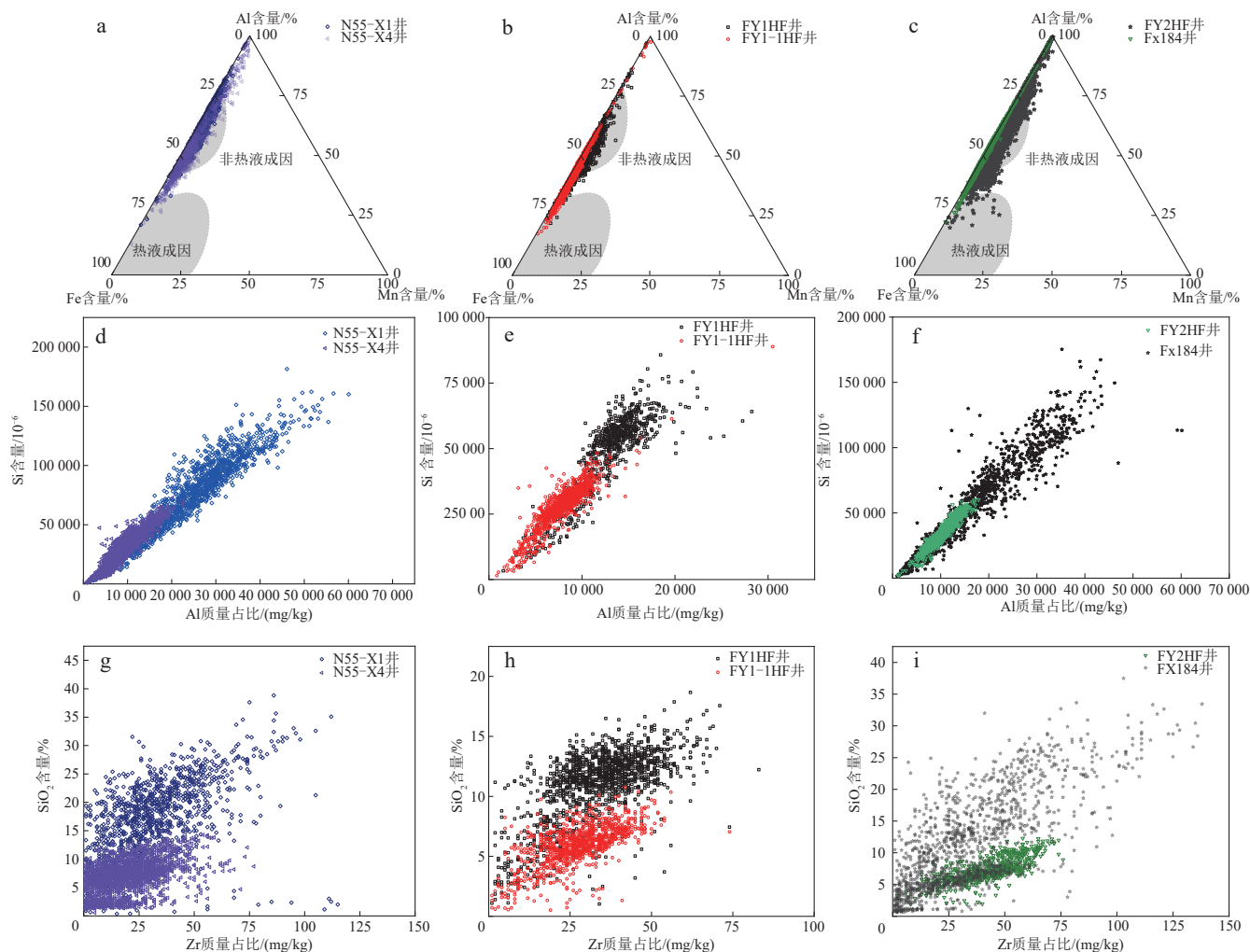


图9 济阳拗陷沙河街组主要注陷元素含量对比

Fig. 9 Comparison of primary elements in the Shahejie Formation across various sub-sags within Jiyang Depression

(图中Al为铝,Fe为铁,Mn为锰,Si为硅, SiO_2 为石英,Zr为锆。)

a—c. 分别为济阳拗陷牛庄洼陷、民丰洼陷和博兴洼陷中页岩Fe—Mn—Al元素含量三端元图;d—f. 分别表示济阳拗陷牛庄洼陷、民丰洼陷和博兴洼陷中页岩Al—Si元素含量的相关性;g—i. 分别表示济阳拗陷牛庄洼陷、民丰洼陷和博兴洼陷中页岩Zr— SiO_2 元素含量的相关性

示持续活跃的流体活动和相对较弱的整体胶结强度,且此类组合发育区通常表现出相对较高的面孔率。因此,钠长石和铁白云石含量与面孔率的正相关性本质上揭示了一种特定的成岩环境。这种相关性并非源于矿物的直接造孔,而是二者作为活跃流体-岩石反应的产物,与孔隙保存机制协同演化的结果。

5.2.2 碱性流体促进孔隙闭合

结合相关性热图可见,成岩白云石在两类纹层中与面孔率均呈显著负相关。尽管其总体含量较低且多呈分散状分布,对孔隙的直接堵塞作用有限,但其环境指示意义却十分突出。成岩白云石通常形成于弱碱-碱性成岩环境,该环境中pH值较高且钙离子和镁离子供给稳定,热力学条件有利于方解石等碳酸盐矿物的

沉淀与胶结。在这种体系中,方解石的胶结作用往往会显著增强,导致储层孔隙被持续封闭,面孔率下降。同时,碱性成岩环境通常意味着酸性有机酸流体作用已受限或结束,酸驱溶蚀对颗粒间孔隙和层面孔隙的改造与扩大作用被显著削弱,储层物质被溶蚀并带离体系的能力显著降低。因此,储层孔隙演化趋势由酸性阶段的“溶蚀-增孔”转变为碱性阶段的“胶结-减孔”,形成了统计上成岩白云石含量与面孔率的负相关特征。这种相关关系并非源自白云石本身的大规模堵塞,而是反映了碱性成岩体系中碳酸盐胶结增强与酸性流体改造弱化的组合效应。

同时,通过对背散射电子(BSE)图像及矿物分布能谱分析可见,白云石与铁白云石在局部区域交替生长(图6c,d)。这一特征反映了成岩流体化学条件的

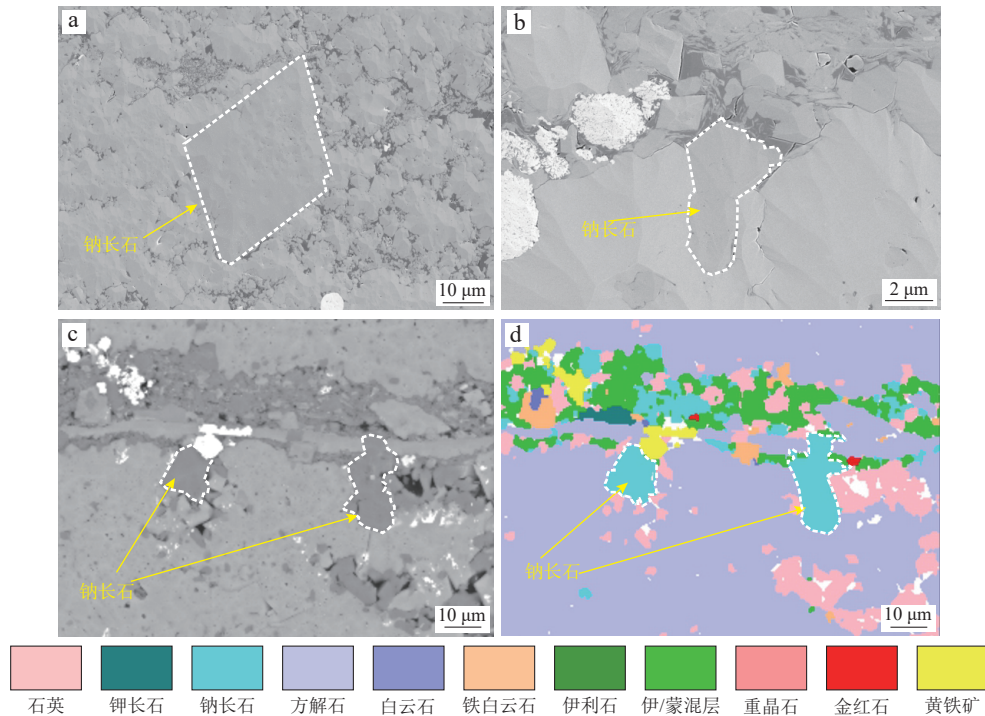


图10 济阳坳陷沙河街组页岩自生钠长石微观特征电镜图像

Fig. 10 Microscopic characteristics of authigenic albites in shales of the Shahejie Formation, Jiyang Depression

a, b. 自生钠长石具有明显晶体结构,发育少量孔隙,二次电子图像;c, d. 分别为自生钠长石背散射电子图像及同一视域下的矿物分布能谱图像(图10d中的白色区域表示有机质和孔缝。)

周期性波动,当亚铁离子供给充足且酸性条件较强时,有利于铁白云石的沉淀。此类环境多与有机酸释放及还原性条件相关,酸性流体能够溶解含铁矿物,释放大亚铁离子并增加钙离子和镁离子的有效浓度,使亚铁离子与碳酸根离子结合形成铁白云石。相反,当亚铁离子供应不足或酸性作用减弱时,体系pH值升高,酸驱溶蚀作用衰退,沉淀转而以白云石 $[\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2]$ 为主。流体化学组成的间歇性变化可能与流体来源波动、供给速率差异或成岩体系封闭性变化有关,在同一颗粒或相邻颗粒上形成铁白云石与白云石的交错环带或邻接组合。由于铁白云石的形成通常伴随较强的酸性流体改造,而白云石的形成则标志着酸性作用衰退并进入碱性胶结阶段,这种交替生长不仅记录了成岩化学环境的演变过程,也间接揭示了储层孔隙由增孔向减孔转变的路径。因此,在解释白云石与面孔率负相关关系时,应综合考虑铁白云石的时空分布和生长序列,以更全面地了解页岩储层的成岩演化机制与孔隙保存条件。

5.3 页岩自生矿物影响孔隙发育的模式

不同成岩流体环境通过控制自生矿物的类型、沉淀位置与结晶特征,对页岩孔隙发育产生直接或间接的影响。在酸性开放阶段,有机酸/还原性流体促进伊

利石化与脉状自生石英沉淀,前者通过形成“纸房结构”等微观结构产生孔隙,后者构建刚性骨架实现长期保孔。同期出现的钠长石与铁白云石更多指示“开放-酸性”体系,反映该成岩环境对伊利石化作用和自生石英生成的促进作用。在碱性胶结阶段,沿层理或充填裂缝的方解石重结晶导致孔喉细化或消亡,成岩白云石作为典型碱性封闭体系指示矿物,反映普遍减孔及孔隙连通性的削弱。而局部可见的铁白云石-白云石交替生长现象,则记录了pH值及酸-碱成岩环境变化影响下的铁离子含量波动,可作为间接反映页岩成岩过程中增孔-减孔的转折性标志。上述过程可归纳为“成岩流体-自生矿物-孔隙演化”模式(图14)。该模式为“同类矿物差异化作用”的现象提供地质解释,并可用于页岩油甜点评价。

6 结论

本研究围绕济阳坳陷 $\text{Es}^{3\text{L}}-\text{Es}^{4\text{U}}$ 的咸化湖盆页岩,结合扫描电镜(SEM)、阴极发光(CL)及能谱(EDS)等方法,揭示了自生矿物的类型、结构特征及其对微观孔隙的多重控制效应,获得主要认识如下:

1) 沙河街组页岩自生矿物类型丰富且在纹层之间呈显著分异性。碳酸盐纹层以方解石和白云石为

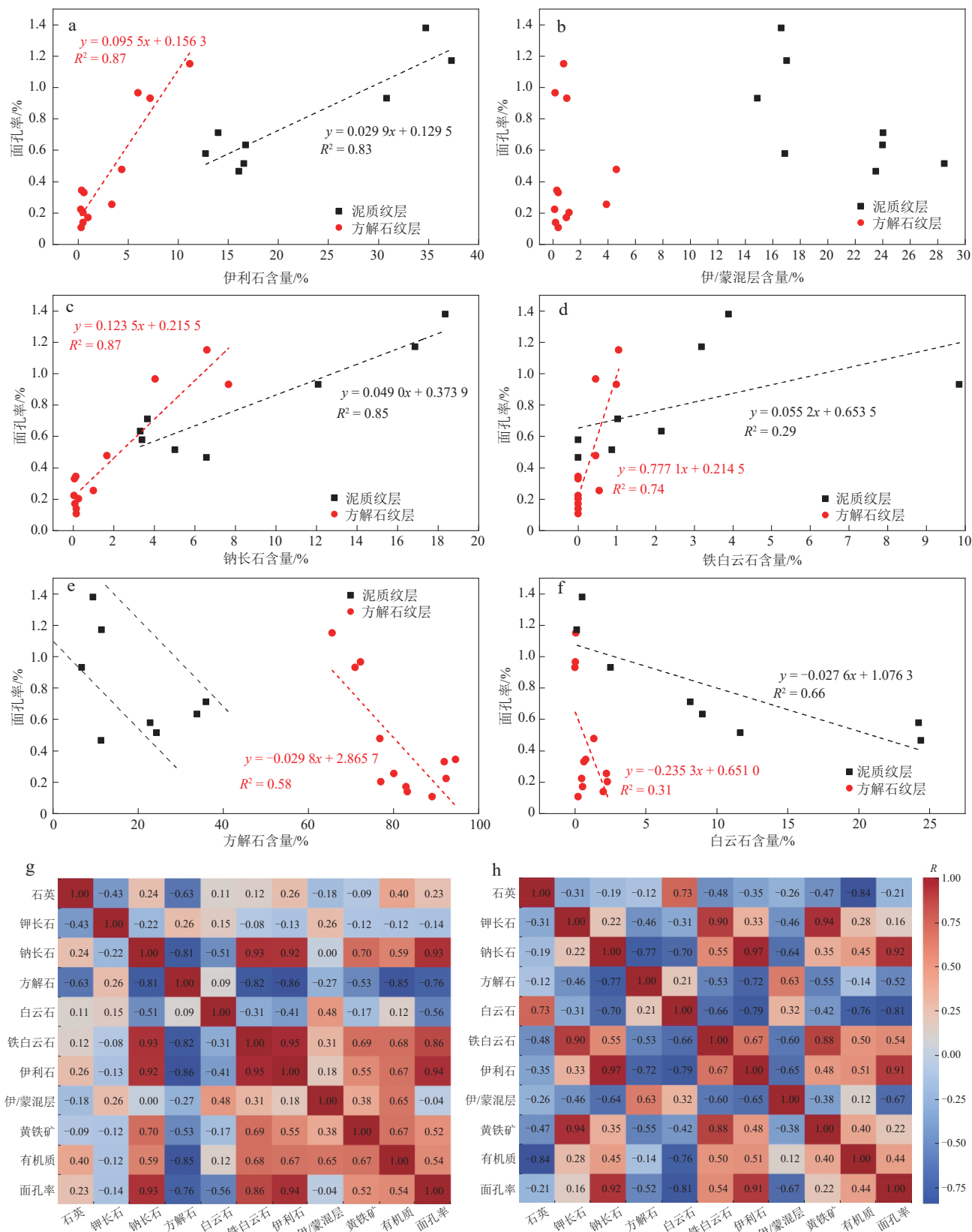


图11 济阳坳陷沙河街组页岩组分与面孔率的相关性

Fig. 11 Correlations between various mineral contents and thin-section porosity for shales of the Shahejie Formation, Jiyang Depression
 a—f. 分别为伊利石、伊/蒙混层、钠长石、铁白云石、方解石以及白云石含量和面孔率的相关性散点图;g,h. 分别为方解石纹层和泥质纹层中各组分含量与面孔率相关性热图,颜色偏暖色调为正相关关系,偏冷色调为负相关关系,相关性表示为皮尔逊相关性系数 R ,无量纲
 (图中页岩组分含量是基于AMICS全自动矿物分析系统获得的,面孔率是基于扫描电镜的二次电子图像提取获得的。)

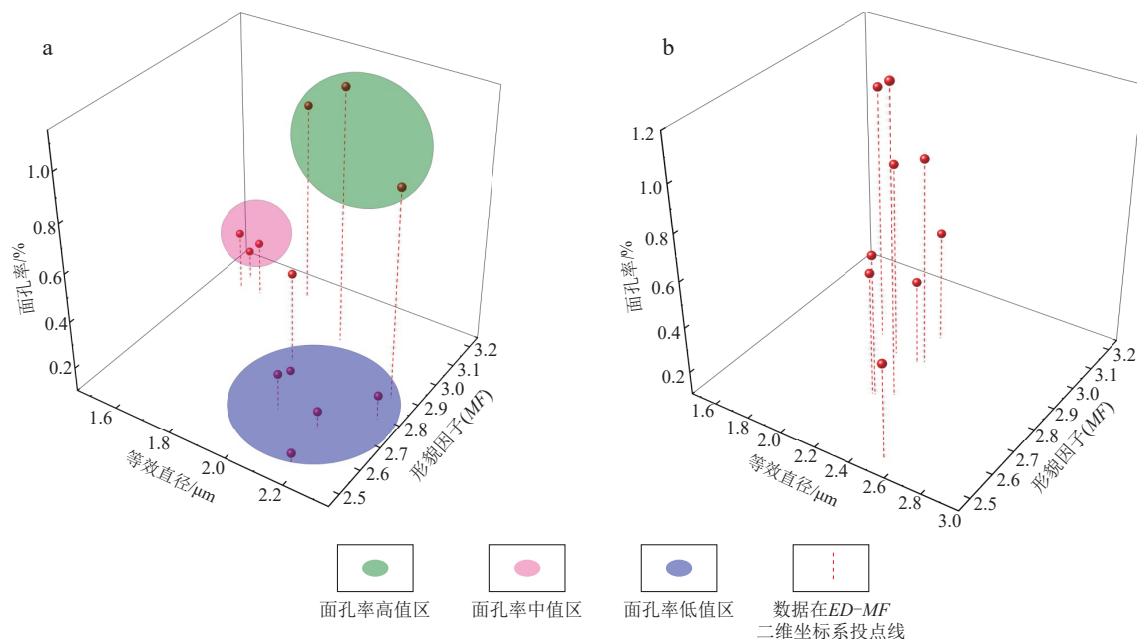


图12 济阳坳陷沙河街组纹层中石英形貌参数与面孔率的相关性

Fig. 12 Correlations between the morphological parameters of quartz in laminae and thin-section porosity for shales of the Shahejie Formation, Jiyang Depression

a. 方解石纹层,绿色区域为面孔率高值区,该区域纹层中石英集合体具有适中的等效直径(1.77 ~ 2.26)和形貌因子(2.88 ~ 3.16),蓝色区域为面孔率低值区,该区域中纹层中石英集合体具有较高等效直径(1.91 ~ 2.28)和较低形貌因子(2.53 ~ 2.87),红色区域为面孔率中等区域,该区域中该区域中纹层中石英集合体具有较低等效直径(1.55 ~ 1.63)和较高形貌因子(3.09 ~ 3.14); b. 泥质纹层,纹层中面孔率随着形貌因子的增大和等效直径的降低而升高
(图中ED为矿物颗粒等效直径,MF为形貌因子。)

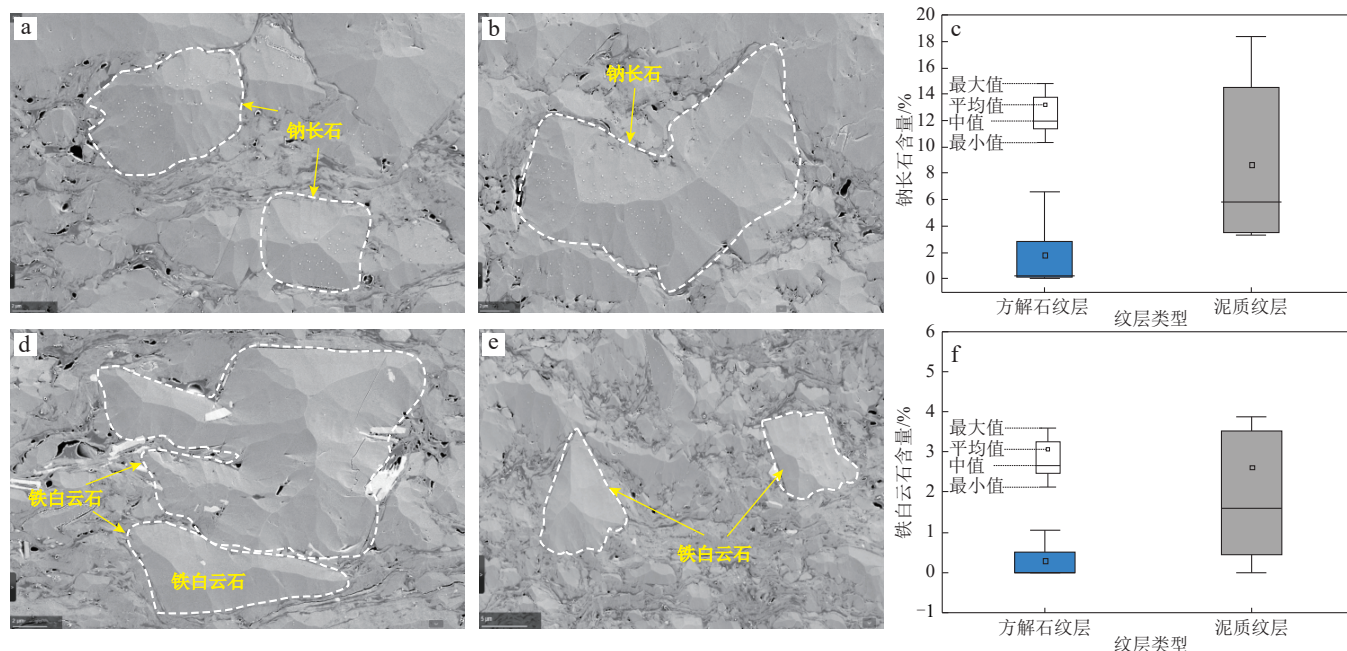


图13 济阳坳陷沙河街组钠长石及铁白云石表面特征及含量分布

Fig. 13 Surface characteristics and contents of albites and ankerites from the Shahejie Formation, Jiyang Depression

a, b. 页岩中钠长石扫描电镜图像,钠长石表面无孔隙,部分边缘表现出较好的晶体形态,部分边缘表现出磨圆;c. 不同纹层中钠长石质量占比统计:方解石纹层中钠长石质量占比介于0.05% ~ 7.67%,平均值为1.82%,而泥质纹层中钠长石质量占比介于3.3% ~ 18.36%,平均值为8.66%;d, e. 页岩中铁白云石扫描电镜图像,铁白云石表面无孔隙,部分颗粒边缘表现出较好晶体形态,部分颗粒边缘表现出磨圆;f. 不同纹层中铁白云石质量占比统计:方解石纹层中铁白云石质量占比介于0 ~ 1.05%,平均值为0.29%,而泥质纹层中铁白云石质量占比介于0 ~ 9.85%,平均值为2.62%

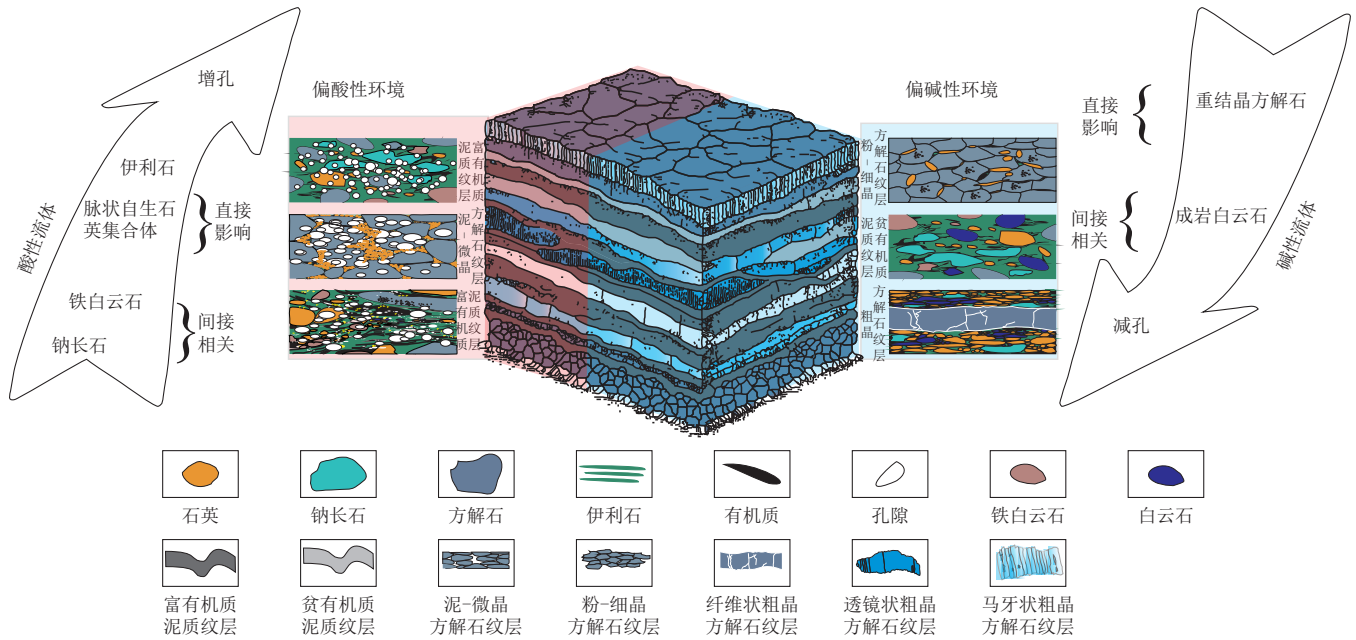


图14 济阳坳陷沙河街组页岩中成岩流体类型及自生矿物对孔隙演化的影响

Fig. 14 Schematic diagram showing the impacts of the diagenetic fluid types and authigenic minerals on pore evolution in shales of the Shahejie Formation, Jiyang Depression

主,黏土质纹层则富含伊利石、自生石英和钠长石等陆源物质的演化产物。这种矿物组合格局不仅记录了沉积-成岩环境的变化轨迹,也为储层质量的空间差异奠定了基础。

2) 不同自生矿物在孔隙演化中扮演着截然不同的角色。伊利石与自生石英是直接“造孔者”,前者在蒙脱石向伊利石转化过程中通过脱水收缩并形成“纸房结构”保留了纳米-微米级孔隙,后者则以脉状骨架结构在压实过程中为孔隙提供支撑。相比之下,成岩方解石则是典型的“闭孔者”,其次生加大和重结晶过程持续侵占原有孔隙。另外,虽然钠长石与铁白云石本身不具备储集空间,却是酸性流体活跃期的见证者,其出现往往意味着孔隙保存条件相对优越。与之相反的是碱性流体活跃期,白云石沉淀占据主导,孔隙保存能力下降。

3) 构建了酸-碱交替的成岩演化模式:在早期弱碱性阶段,碳酸盐沉淀强烈,孔隙迅速封闭;随着有机质热解进入酸性阶段,伊利石化、钠化作用及铁白云石沉淀增强,孔隙发育显著改善;成岩阶段出现的酸-碱环境切换导致了页岩储层孔隙在“增孔-保孔”和“胶结-减孔”之间的动态循环。

4) 定量分析并揭示矿物参数与面孔率的密切联系。在方解石纹层中,面孔率与钠长石和铁白云石含量呈强正相关,而与方解石含量呈显著负相关。而且,形貌因子较高的石英聚集体与有机质共生时,其周围

面孔率显著提升。这些指标不仅揭示了自生矿物与孔隙系统的内在成因联系,更将为储层甜点评价提供关键的微观地质依据。

参考文献

- [1] 郭旭升, 申宝剑, 王鹏威, 等. 基于源-储单元的页岩油气甜点段评价优选新思路[J]. 石油与天然气地质, 2025, 46(1): 1-14.
GUO Xusheng, SHEN Baojian, WANG Pengwei, et al. A new approach to the evaluation and optimal selection of shale oil and gas sweet-spot intervals based on source rock-reservoir units [J]. Oil & Gas Geology, 2025, 46(1): 1-14.
- [2] 胡宗全, 刘忠宝, 李倩文, 等. 基于变尺度岩相组合的陆相页岩源-储耦合机理探讨——以四川盆地侏罗系页岩层段为例[J]. 石油与天然气地质, 2024, 45(4): 893-909.
HU Zongquan, LIU Zhongbao, LI Qianwen, et al. Exploring source rock-reservoir coupling mechanisms in lacustrine shales based on varying-scale lithofacies assemblages: A case study of the Jurassic shale intervals in the Sichuan Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2024, 45(4): 893-909.
- [3] BRISTOW T F, KENNEDY M J, MORRISON K D, et al. The influence of authigenic clay formation on the mineralogy and stable isotopic record of lacustrine carbonates [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2012, 90: 64-82.
- [4] CHEN Lei, JIANG Zhenxue, LIU Keyu, et al. Effect of lithofacies on gas storage capacity of marine and continental shales in the Sichuan Basin, China [J]. Journal of Natural Gas Science

- and Engineering, 2016, 36(Part A): 773–785.
- [5] MILLIKEN K. A compositional classification for grain assemblages in fine-grained sediments and sedimentary rocks [J]. Journal of Sedimentary Research, 2014, 84(12): 1185–1199.
- [6] TANG Xianglu, JIANG Zhenxue, JIANG Shu, et al. Heterogeneous nanoporosity of the Silurian Longmaxi Formation shale gas reservoir in the Sichuan Basin using the QEMSCAN, FIB-SEM, and nano-CT methods [J]. Marine and Petroleum Geology, 2016, 78: 99–109.
- [7] ZHAO Jianhua, JIN Zhijun, JIN Zhenkui, et al. 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 [J]. Marine and Petroleum Geology, 2017, 86: 655–674.
- [8] SUN Mengdi, ZHAO Jiale, PAN Zhejun, et al. Pore characterization of shales: A review of small angle scattering technique [J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2020, 78: 103294.
- [9] XIONG Zhouhai, CAO Yingchang, LIANG Chao, et al. Origin and significance of authigenic quartz and albite in lacustrine calcareous fine-grained sedimentary rocks [J]. Marine and Petroleum Geology, 2022, 143: 105799.
- [10] 任文希, 曾小军, 王光付, 等. 陆相页岩有机质-黏土矿物复合孔隙体系中多组分烃类-水混合物赋存的分子模拟——以四川盆地侏罗系自流井组大安寨段为例[J]. 石油与天然气地质, 2025, 46(1): 304–314.
- REN Wenxi, ZENG Xiaojun, WANG Guangfu, et al. Molecular simulations of a multicomponent hydrocarbon-water mixture in the organic matter-clay mineral composite pore system of lacustrine shales: A case study of the Da'anzhai Member of the Jurassic Ziliujing Formation, Sichuan Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2025, 46(1): 304–314.
- [11] 林中凯, 张少龙, 李传华, 等. 湖相页岩油地层岩相组合类型划分及其油气勘探意义——以博兴洼陷沙河街组为例[J]. 油气藏评价与开发, 2023, 13(1): 39–51.
- LIN Zhongkai, ZHANG Shaolong, LI Chuanhua, et al. Types of shale lithofacies assemblage and its significance for shale oil exploration: A case study of Shahejie Formation in Boxing Sag [J]. Petroleum Reservoir Evaluation and Development, 2023, 13(1): 39–51.
- [12] 赵仁文, 肖佃师, 卢双舫, 等. 高一过成熟陆相断陷盆地页岩与海相页岩储层特征对比——以徐家围子断陷沙河子组和四川盆地龙马溪组为例[J]. 油气藏评价与开发, 2023, 13(1): 52–63, 99.
- ZHAO Renwen, XIAO Dianshi, LU Shuangfang, et al. Comparison of reservoir characteristics between continental shale from faulted basin and marine shale under high-over mature stage: Taking Shahezi Formation in Xujiaweizi faulted basin and Longmaxi Formation in Sichuan Basin as an example [J]. Petroleum Reservoir Evaluation and Development, 2023, 13(1): 52–63, 99.
- [13] ZHANG Shun, LIU Huimin, LIU Yali, et al. Main controls and geological sweet spot types in Paleogene shale oil rich areas of the Jiyang Depression, Bohai Bay Basin, China [J]. Marine and Petroleum Geology, 2020, 111: 576–587.
- [14] LIU Huimin, ZHANG Shun, SONG Guoqi, et al. Effect of shale diagenesis on pores and storage capacity in the Paleogene Shahejie Formation, Dongying Depression, Bohai Bay Basin, east China [J]. Marine and Petroleum Geology, 2019, 103: 738–752.
- [15] 刘惠民, 包友书, 张守春, 等. 陆相富碳酸盐页岩结构特征与页岩油可动性——以济阳坳陷古近系沙河街组页岩为例[J]. 石油勘探与开发, 2023, 50(6): 1150–1161.
- LIU Huimin, BAO Youshu, ZHANG Shouchun, et al. Structural characteristics of continental carbonate-rich shale and shale oil movability: A case study of the Paleogene Shahejie Formation shale in Jiyang Depression, Bohai Bay Basin, China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2023, 50(6): 1150–1161.
- [16] 郭旭升, 马晓潇, 黎茂稳, 等. 陆相页岩油富集机理探讨[J]. 石油与天然气地质, 2023, 44(6): 1333–1349.
- GUO Xusheng, MA Xiaoxiao, LI Maowen, et al. Mechanisms for lacustrine shale oil enrichment in Chinese sedimentary basins [J]. Oil & Gas Geology, 2023, 44(6): 1333–1349.
- [17] ZHANG Shun, LIU Huimin, WANG Min, et al. Shale pore characteristics of Shahejie Formation: Implication for pore evolution of shale oil reservoirs in Dongying Sag, North China [J]. Petroleum Research, 2019, 4(2): 113–124.
- [18] 李政. 陆相盆地不同岩性页岩含油性及其可动性比较——以渤海湾盆地东营凹陷古近系沙四上亚段为例[J]. 石油实验地质, 2020, 42(4): 545–551, 595.
- LI Zheng. Comparison of oil-bearing properties and oil mobility of shale with different lithologies in continental basins: A case study of the upper fourth member of Paleogene Shahejie Formation in Dongying Sag, Bohai Bay Basin [J]. Petroleum Geology and Experiment, 2020, 42(4): 545–551, 595.
- [19] ZHANG Tongwei, ELLIS G S, RUPPEL S C, et al. Effect of organic-matter type and thermal maturity on methane adsorption in shale-gas systems [J]. Organic Geochemistry, 2012, 47: 120–131.
- [20] 滕建彬, 邱隆伟, 张守鹏, 等. 济阳坳陷古近系沙河街组湖相富有机质页岩白云石成因及成岩演化[J]. 石油勘探与开发, 2022, 49(6): 1080–1093.
- TENG Jianbin, QIU Longwei, ZHANG Shoupeng, et al. Origin and diagenetic evolution of dolomites in Paleogene Shahejie Formation lacustrine organic shale of Jiyang Depression, Bohai Bay Basin, East China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2022, 49(6): 1080–1093.
- [21] 李超, 罗晓容. 泥岩化学压实作用研究进展[J]. 地球科学与

- 环境学报, 2017, 39(6): 761-772.
- LI Chao, LUO Xiaorong. Review on mudstone chemical compaction [J]. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 2017, 39(6): 761-772.
- [22] MIAO Zhuowei, ZHANG Kuihua, ZHANG Pengfei, et al. The staged growth of bedding-parallel fibrous calcite veins, from synsedimentary period to oil-generative window [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2024, 160: 106660.
- [23] LUAN Guoqiang, DONG Chunmei, AZMY K, et al. Origin of bedding-parallel fibrous calcite veins in lacustrine black shale: A case study from Dongying Depression, Bohai Bay Basin [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2019, 102: 873-885.
- [24] NIE Haikuan, LIU Quanyou, LI Pei, et al. Quartz types, formation mechanism, and its effect on shale oil and gas enrichment: A review [J]. *Earth-Science Reviews*, 2025, 261: 105011.
- [25] 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.
- [26] ZHANG Pengfei, ZHANG Kuihua, MIAO Zhuowei, et al. Early diagenetic origin of authigenic quartz in lacustrine calcareous shale of the Shahejie formation, Eastern China: implications for shale reservoirs [J]. *Carbonates and Evaporites*, 2024, 39(4): 107.
- [27] 刘国恒. 湖相泥页岩自生石英形成机理及对储层性质的影响 [D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2017.
- LIU Guoheng. The formation mechanism of authigenic quartz in lacustrine shale and influence to reservoir property [D]. Beijing: China University of Petroleum (Beijing), 2017.
- [28] CHEN Xianglin, SHI Wanzhong, HU Qinhong, 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 and Petroleum Geology*, 2022, 138: 105548.
- [29] 李军亮, 王民, 秦峰, 等. 陆相富碳酸盐页岩纹层组合对页岩油富集的控制作用——以渤海湾盆地济阳坳陷古近系沙河街组页岩为例 [J]. *石油与天然气地质*, 2025, 46(2): 392-406.
- LI Junliang, WANG Min, QIN Feng, et al. Controlling effects of lamina assemblages on shale oil enrichment for lacustrine carbonate-rich shales: A case study of shales in the Paleogene Shahejie Formation, Jiyang Depression, Bohai Bay Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2025, 46(2): 392-406.
- [30] 孔政, 程紫燕, 乔俊程, 等. 东营凹陷牛庄洼陷古近系不同纹层组合富碳酸盐页岩的微观储渗能力 [J]. *中国石油大学学报(自然科学版)*, 2025, 49(2): 68-81.
- KONG Zheng, CHENG Ziyang, QIAO Juncheng, et al. Microscopic storage and seepage capacities in laminated carbonaceous shale of Paleogene in Niuzhuang sub-sag, Dongying Sag [J]. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)*, 2025, 49(2): 68-81.
- [31] 刘惠民. 济阳坳陷古近系页岩油地质特殊性及其勘探实践——以沙河街组四段上亚段—沙河街组三段下亚段为例 [J]. *石油学报*, 2022, 43(5): 581-594.
- LIU Huimin. Geological particularity and exploration practice of Paleogene shale oil in Jiyang Depression: A case study of the upper submember of Member 4 to the lower submember of Member 3 of Shahejie Formation [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2022, 43(5): 581-594.
- [32] 王勇. 济阳坳陷古近系沙三下—沙四上亚段咸化湖盆证据及页岩油气地质意义 [J]. *中国石油大学学报(自然科学版)*, 2024, 48(3): 27-36.
- WANG Yong. Evidence of Paleogene saline lake basin in the 3rd and 4th members of Shahejie Formation in Jiyang Depression and geological significance of shale oil and gas [J]. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)*, 2024, 48(3): 27-36.
- [33] CURTIS C D, COLEMAN M L, LOVE L G. Pore water evolution during sediment burial from isotopic and mineral chemistry of calcite, dolomite and siderite concretions [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1986, 50(10): 2321-2334.
- [34] MOZLEY P S, DAVIS J M. Internal structure and mode of growth of elongate calcite concretions: Evidence for small-scale, microbially induced, chemical heterogeneity in groundwater [J]. *GSA Bulletin*, 2005, 117(11/12): 1400-1412.
- [35] GHAFUR A A. The origin, differential diagenesis and microporosity characteristics of carbonate mud across a Late Paleogene ramp (Iraqi Kurdistan region) [J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2020, 192: 107247.
- [36] MOZLEY P S. The internal structure of carbonate concretions in mudrocks: A critical evaluation of the conventional concentric model of concretion growth [J]. *Sedimentary Geology*, 1996, 103(1/2): 85-91.
- [37] MUNNECKE A, WRIGHT V P, NOHL T. The origins and transformation of carbonate mud during early marine burial diagenesis and the fate of aragonite: A stratigraphic sedimentological perspective [J]. *Earth-Science Reviews*, 2023, 239: 104366.
- [38] LIU Huimin, ZHANG Shun, LIU Yali, et al. Characteristics of lithofacies combinations and reservoir property of carbonate-rich shale in Dongying Depression, eastern China [J]. *Frontiers in Earth Science*, 2022, 10: 857729.
- [39] MILLIKEN K L, DAY-STIRRAT R J. Cementation in mudrocks: Brief review with examples from cratonic basin mudrocks [M]// CHATELLIER J Y, JARVIE D M. *Critical Assessment of Shale Resource Plays*. Tulsa: American Association of Petroleum Geologists, 2013: 133-150.
- [40] 刘惠民, 孙善勇, 操应长, 等. 东营凹陷沙三段下亚段细粒沉积岩岩相特征及其分布模式 [J]. *油气地质与采收率*, 2017, 24

- (1): 1-10.
- LIU Huimin, SUN Shanyong, CAO Yingchang, et al. Lithofacies characteristics and distribution model of fine-grained sedimentary rock in the lower Es₃ member, Dongying sag [J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2017, 24(1): 1-10.
- [41] 王勇, 刘惠民, 宋国奇, 等. 湖相泥页岩中碳酸盐成因及页岩油气地质意义——以东营凹陷沙河街组四段上亚段—沙河街组三段下亚段烃源岩为例[J]. *石油学报*, 2017, 38(12): 1390-1400.
- WANG Yong, LIU Huimin, SONG Guoqi, et al. Carbonate genesis and geological significance of shale hydrocarbon in lacustrine facies mud shale: A case study of source rocks in the upper submember of Member 4 and lower submember of Member 3 of Shahejie Formation, Dongying Sag [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2017, 38(12): 1390-1400.
- [42] ZHAO Ziru, DONG Chunmei, MA Pengjie, et al. Origin of dolomite in lacustrine organic-rich shale: A case study in the Shahejie Formation of the Dongying Sag, Bohai Bay Basin [J]. *Frontiers in Earth Science*, 2022, 10: 909107.
- [43] CAO Yingchang, YUAN Guanghui, LI Xiaoyan, et al. Characteristics and origin of abnormally high porosity zones in buried Paleogene clastic reservoirs in the Shengtuo area, Dongying Sag, East China [J]. *Petroleum Science*, 2014, 11(3): 346-362.
- [44] LI Yingli, CAI Jingong, WANG Xuejun, et al. Smectite-illitization difference of source rocks developed in saline and fresh water environments and its influence on hydrocarbon generation: A study from the Shahejie Formation, Dongying Depression, China [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2017, 80: 349-357.
- [45] 孟元林, 黄文彪, 王粤川, 等. 超压背景下粘土矿物转化的化学动力学模型及应用[J]. *沉积学报*, 2006, 24(4): 461-467.
- MENG Yuanlin, HUANG Wenbiao, WANG Yuechuan, et al. A kinetic model of clay mineral transformation in overpressure setting and its applications [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2006, 24(4): 461-467.
- [46] 李晓霞, 谷渊涛, 万泉, 等. 泥页岩中有机质-黏土复合体的微观结构、变形作用及源-储意义[J]. *石油与天然气地质*, 2023, 44(2): 452-467.
- LI Xiaoxia, GU Yuantao, WAN Quan, et al. Micro-architecture, deformation and source-reservoir significance of organic-clay composites in shale [J]. *Oil & Gas Geology*, 2023, 44(2): 452-467.
- [47] LIU Guoheng, LIU Keyu, ZHAI Gangyi, et al. Crystallinity and formation of silica in Palaeozoic shales: A new quantification calculation method based on X-Ray diffraction [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2023, 150: 106124.
- [48] REMY R R, FERRELL R E. Distribution and Origin of Analcime in Marginal Lacustrine Mudstones of the Green River Formation, South-Central Uinta Basin, Utah [J]. *Clays and Clay Minerals*, 1989, 37(5): 419-432.
- [49] ZHANG Zongxuan, JIANG Zaixing, YANG Yepeng. Coevolution of minerals in lacustrine mudstone during diagenesis: A case study of the Dongying Depression in the Bohai Bay Basin [J]. *Frontiers in Earth Science*, 2025, 13: 1502476.

(编辑 张 晟)