

文章编号: 1671-1505(2024)02-0487-15 DOI:10.7605/gdxb.2024.02.038

页岩中的石英类型、成因及意义*

梅俊芳^{1,2} 梁超^{1,2} 操应长^{1,2} 韩豫^{1,2}

1 深层油气全国重点实验室(中国石油大学(华东)), 山东青岛 266580

2 中国石油大学(华东)地球科学与技术学院, 山东青岛 266580

摘要 石英作为页岩中重要组成部分,厘清其成因机制对重建页岩成岩过程及页岩油气储集层形成至关重要。页岩中石英成因复杂,利用普通薄片观察、扫描电镜、能谱分析、阴极发光等手段,可以识别出页岩中石英主要类型包括陆源碎屑石英、生物成因石英和成岩自生石英,其中成岩自生石英硅质来源主要有黏土矿物转化、长英质溶蚀和生物硅溶解、火山—热液活动。陆源碎屑石英多呈粉砂级,阴极发光下强发光,光谱一般为 2 个峰值,微米级生物成因石英不发光,黏土矿物成因石英多在伊利石等黏土矿物周围或嵌入其中。不同类型石英除形貌及赋存特征外,地球化学元素也存在差异。受热液活动影响的石英多富集 Fe、Mn 元素;陆源碎屑石英多富 Ti、Al 元素, SiO₂ 与 Zr 呈正相关;生物成因石英常与 TOC 含量呈正相关, Fe/Ti 值介于 0.4~20 之间。成岩自生石英为多阶段形成,与页岩埋藏成岩过程有着密切关联,影响着页岩储集层性质,主要形成于早、中成岩阶段。陆源碎屑石英与生物成因石英有利于抑制压实作用,保护原生孔隙,黏土矿物转化、长英质溶蚀等成岩自生石英过程发育溶蚀孔、有机孔等孔隙,石英充填部分孔隙降低孔隙度。明确页岩中石英成因,对于页岩沉积环境分析及有利储集层的分布预测都有重要意义。

关键词 石英 硅循环 硅质来源 成因机制 成岩演化 页岩储集层

第一作者简介 梅俊芳,女,2000 年生,硕士研究生,研究方向为细粒沉积学。E-mail: s21010031@s.upc.edu.cn。

通讯作者简介 梁超,男,1986 年生,教授,主要从事细粒沉积学研究。E-mail: liangchao0318@163.com。

中图分类号: P571 **文献标志码:** A

Types, genesis and significance of quartz in shales

MEI Junfang^{1,2} LIANG Chao^{1,2} CAO Yingchang^{1,2} HAN Yu^{1,2}

1 National Key Laboratory of Deep Oil and Gas (China University of Petroleum (East China)), Shandong Qingdao 266580, China

2 School of Geosciences, China University of Petroleum (East China), Shandong Qingdao 266580, China

Abstract Quartz is an important part of shale, making it crucial to clarify its genetic mechanism for the reconstruction of shale diagenetic process and the formation of shale oil and gas reservoir. The genesis of quartz in shale is complex, with the main types, including terrigenous detrital quartz, biogenic quartz and diagenetic authigenic quartz, identifiable through ordinary thin section observation, scanning electron microscopy, energy spectrum analysis and cathodoluminescence. The main sources of diagenetic authigenic

*国家自然科学基金项目(编号:42172165,41902134)和中央高校基本科研业务费专项资金资助(编号:22CX06001A)和泰山学者计划(编号:TSQN201812030)联合资助。[Co-funded by the National Natural Science Foundation of China (Nos. 42172165, 41902134), the Fundamental Research Funds for the Central Universities (No. 22CX06001A) and the Taishan Scholars Program (No. TSQN201812030)]

收稿日期:2023-05-09 改回日期:2023-10-08

quartz silica are clay mineral transformation, felsic dissolution and biosilicon dissolution, and volcano-hydrothermal activity. Terrigenous detrital quartz is mostly silt-grade and strongly emits light under cathodoluminescence, typically displaying a two-peak spectrum. Micron-sized biogenic quartz does not emit light, and clay mineral-derived quartz is predominantly found around or embedded within clay minerals, such as illite. In addition to the morphology and occurrence characteristics of different types of quartz, there are also differences in geochemical elements. Quartz affected by hydrothermal activities is rich in Fe and Mn, while terrigenous detrital quartz is rich in Ti and Al elements. Detrital SiO_2 and Zr are positive correlation, as does biogenic quartz with TOC content. The biogenic quartz Fe/Ti ranges between 0.4 and 20. Diagenetic authigenic quartz is formed in multiple stages, which is closely related to the burial diagenesis process of shale and affects the properties of shale reservoirs. Diagenetic authigenic quartz is mainly formed in early and middle diagenetic stages. Terrigenous detrital quartz and biogenic quartz are conducive to inhibiting compaction and protecting primary pores. Processes involving diagenetic authigenic quartz, like clay mineral transformation and felsic dissolution create dissolution pores and organic pores, with quartz filling some pores, thereby reducing porosity. Identifying the origin of quartz in shale is of great significance to the analysis of shale sedimentary environment and the prediction of favorable reservoir distribution.

Key words quartz, silicon cycle, siliceous source, genetic mechanism, diagenetic evolution, shale reservoir

About the first author MEI Junfang, born in 2000, a master degree candidate, is engaged in fine-grained sedimentology research. E-mail: s21010031@s.upc.edu.cn.

About the corresponding author LIANG Chao, born in 1986, professor, is mainly engaged in fine-grained sedimentology research. E-mail: liangchao0318@163.com.

石英是页岩的重要组成部分, 石英的形成是地质硅循环的重要环节。在过去相当长的时间内, 认为页岩中石英多来自陆源碎屑 (Blatt and Schultz, 1976; Milliken, 1994; Schieber *et al.*, 2000)。但近年来研究发现, 在很多盆地的页岩中自生石英占相当大的比例, 如美国晚白垩世 Eagle Ford 页岩区中 85% 的石英为自生石英 (Milliken *et al.*, 2016); 在中国四川盆地五峰—龙马溪组页岩中, 自生石英含量可达 50% (赵建华等, 2016; Ye *et al.*, 2022)。研究表明页岩中石英有多种成因: 陆源碎屑石英, 即来自岩浆岩或碎屑岩风化形成的石英, 通过风、河流等方式进入深水环境沉积; 生物成因石英, 即硅质海绵骨针、放射虫等生物在生长时吸收水体中的 Si^{4+} , 在埋藏过程中生物中硅质完成一系列由不稳定的蛋白石-A 向较稳定蛋白石-CT 转化, 最终形成稳定的石英 (Williams *et al.*, 1985; Zhao *et al.*, 2016); 成岩过程中, 黏土矿物转化、碎屑石英溶解、长石溶蚀过程以及火山—热液活动沉积物也会产生 SiO_2 , 为成岩自生石英生成提供硅质来

源 (Van de Kamp, 2008; Peltonen *et al.*, 2008; White *et al.*, 2011; 远光辉等, 2013)。不同成因石英在页岩中具有不同的形态及赋存特征, 也存在元素地球化学等方面差异, 如颗粒大小、阴极发光强度及 Si、Al 等元素含量等, 研究中多借助场发射扫描电镜、能谱分析和阴极发光等技术方法, 结合地球化学元素特征等进行石英类型判别。

通过石英成因过程的系统研究, 可以了解陆源碎屑石英输入反映的气候及风化强度、分析生物硅质富集程度所反映的环境生态特点、重建页岩埋藏成岩演化过程, 同时有利于理解全球硅循环的动力学及模式 (Schieber *et al.*, 2000)。石英作为页岩的重要组分构成, 对页岩储集层形成至关重要, 石英颗粒作为脆性矿物增加页岩的抗压实能力, 其形成过程中产生孔隙可作为页岩储集层的储集空间 (刘树根等, 2011; 姜在兴等, 2014; 管全中等, 2021; 王濡岳等, 2022), 明确页岩中石英类型及成因对页岩油气勘探开发有重要意义。

1 石英的类型

近年来, 学者们通过研究美国 Barnett、Woodford、Marcellus 页岩和中国含油气盆地页岩 (Bowker, 2003; Loucks and Ruppel, 2007; Hart *et al.*, 2013; Xu *et al.*, 2021; 郭雯等, 2021) 发现, 石英来源多样, 具有多种成因类型, 可以是盆地内部或者盆地外部来源的碎屑, 也可以是不同来源的自生组分, 以各种形式出现于页岩中。

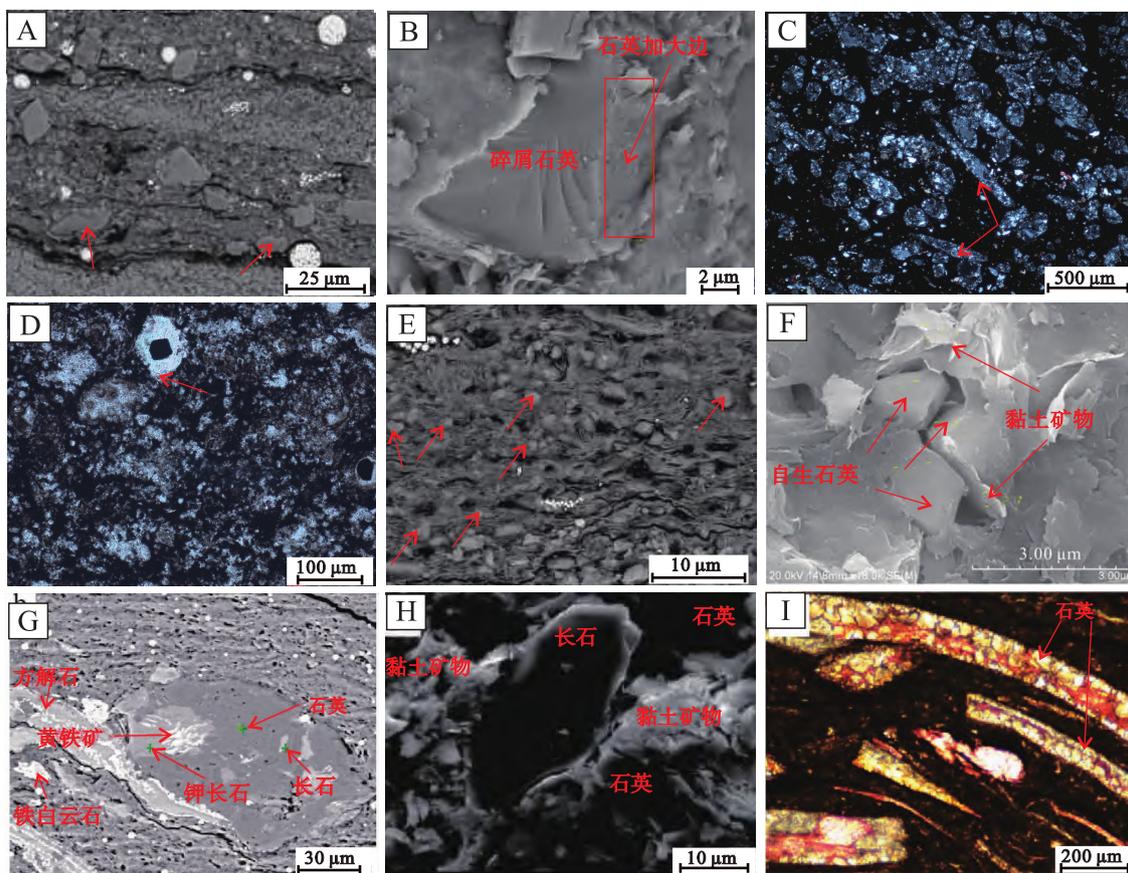
1.1 陆源碎屑石英

页岩中陆源碎屑大多源于母岩的风化产物, 通过风、河流等方式搬运至深水环境中沉积。石英抗风化能力较强, 在搬运过程中保存较好, 成为陆源

碎屑中含量最高的一种矿物成分。在搬运和沉积过程中, 石英颗粒表面可以保存不同地质营力下形成的微形貌特征和组合 (Vos *et al.*, 2014)。页岩中陆源碎屑石英多漂浮在黏土矿物中(图 1-A), 形态多呈次圆一次棱角状, 粒径呈粉砂级, 多介于 10~50 μm , 部分碎屑石英颗粒存在次生加大现象(图 1-B)。

1.2 生物石英

生物石英硅质主要源于浮游硅质生物的躯壳, 如放射虫、海绵骨针等生物及其碎屑。硅质海绵骨针、放射虫等生物在生长时吸收水体中的 Si^{4+} , 转化为不太稳定的蛋白石-A, 生物死亡后在盆地内堆积。在埋藏早期, 受温度和压力作用, 不稳定的



A—粉砂级陆源碎屑石英漂浮在黏土矿物中, 呈次圆状一次棱角状, 东营凹陷沙河街组, NY1 井, 3349.46 m; B—碎屑石英颗粒表面见搬运痕迹, 见石英加大边, 沁水盆地山西—太原组, YW 井 (钟秋, 2011); C—海绵骨针, 四川盆地五峰组, L204 井, 3791.19 m; D—海绵骨针, 四川盆地五峰组, L204 井, 3847.7 m; E—短链状自生石英嵌在黏土矿物中, 东营凹陷沙河街组, NY1 井, 3317.52 m; F—被黏土矿物包裹的微晶自生石英, 东营凹陷沙河街组, FY1 井, 3308.4 m (Liang *et al.*, 2018); G—碎屑长石溶蚀形成次生石英, 同时残留未蚀变长石, 松辽盆地青山口组, K 井, 2326.02 m (白斌等, 2022); H—介壳页岩中中长石溶蚀, 溶蚀孔中充填石英和黏土矿物, 四川盆地自流井组, B 井 (王昕尧等, 2022); I—介壳边缘发育自生石英, 四川盆地自流井组, A 井 (王昕尧等, 2022)

图 1 不同成因类型石英特征

Fig. 1 Quartz characteristics in different genetic types

蛋白石-A 溶解并向较稳定蛋白石-CT 转化, 最后逐渐形成更稳定的隐晶质、微晶及粗晶石英 (秦亚超, 2010)。生物成因石英可见 2 种赋存特征: 一种是继承了生物原始结构与构造, 可见放射虫、海绵骨针等生物碎片(图 1-C, 1-D), 生物生长过程中吸取 SiO₂ 组成自身的躯壳, 死亡后埋藏保存 (赵国连, 1999); 另一种是无生物结构的隐晶/微晶质石英集合体, 是生物骨架经过水-岩作用溶解再经重结晶作用形成的自生石英 (孙川翔等, 2019; 张瑜等, 2022), 其无明显生物骨架, 多通过主微量元素和生物硅含量等确定其生物成因。

1.3 成岩自生石英

除以上陆源碎屑石英和生物成因石英类型以外, 成岩过程中硅质沉淀会产生成岩自生石英, 硅质主要有以下几种来源。

1.3.1 黏土矿物转化

在成岩过程之中, 随着温度压力的不断增大, 黏土矿物会发生转化, 其转化模式遵循的一般规律是蒙皂石→伊/蒙混层→伊利石、高岭石→伊利石 (王秀平等, 2014)。大约 70 °C 到 100 °C 之间, 蒙脱石或伊蒙混层转变为伊利石或者高伊利石含量的伊蒙混层。伊利石化一般认为是动力学控制反应, 此过程中反应需要钾源, 大多数来自钾长石溶解, 反应过程可简写为: $\text{Semctite} + \text{Al}^{3+} + \text{K}^+ = \text{Illite} + \text{Si}^{4+}$ (Hower *et al.*, 1976), 伊利石化进行到钾供给耗尽。如果温度大于 130 °C 时钾仍可以用, 高岭石也向伊利石转化 (Bjorlykke, 1998)。由于页岩渗透率极低, 页岩中黏土矿物转化释放的大量游离硅不能随意流动和扩散, 因此在原地沉淀, 随着转化过程进行, 最终形成微米级颗粒呈短链状、小晶簇状聚集或板片状石英存在于黏土矿物之间(图 1-E, 1-F) (Metwally and Chesnokov, 2011; Liang *et al.*, 2018)。

1.3.2 长英质溶蚀

长石是一种酸不稳定组分, 容易在酸性流体环境下发生溶蚀, 最常见的是钾长石和钠长石溶蚀产生高岭石, 公式分别为: $2\text{KAlSi}_3\text{O}_8(\text{钾长石}) + 2\text{H}^+ + \text{H}_2\text{O} = \text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4(\text{高岭石}) + 4\text{SiO}_2(\text{硅质}) + 2\text{K}^+$; $2\text{NaAlSi}_3\text{O}_8(\text{钠长石}) + 2\text{H}^+ + \text{H}_2\text{O} = \text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4(\text{高岭石}) + 4\text{SiO}_2(\text{硅质}) + 2\text{Na}^+$ (邱隆伟等, 2001; 黄思静等, 2009)。

页岩有机质进入生油窗, 有机质脱羧作用生成大量有机酸, 并释放 CO₂, 为长石溶蚀提供酸性环境 (张永旺等, 2021)。同时长石溶蚀也可以为黏土矿物转化提供所需的 K⁺, 促进黏土矿物转化, 脱硅生成大量自生石英。该类自生石英附近常见未被完全溶蚀的碎屑长石(图 1-G) (白斌等, 2022)。以四川盆地自流井组为例, 可见生物介壳边缘发育成岩自生石英, 介壳附近多黏土矿物与长石颗粒, 王昕尧等 (2022) 认为介壳边缘交代方解石的硅质是由黏土矿物转化和长石溶蚀过程提供(图 1-H, 1-I)。碎屑石英在碱性成岩环境下可发生溶蚀, 颗粒表面被溶蚀产生孔隙, 边缘溶蚀呈港湾状, 生成硅浓度饱和时就近沉淀, 以石英加大边或自生石英晶体形式存在 (万友利等, 2014)。

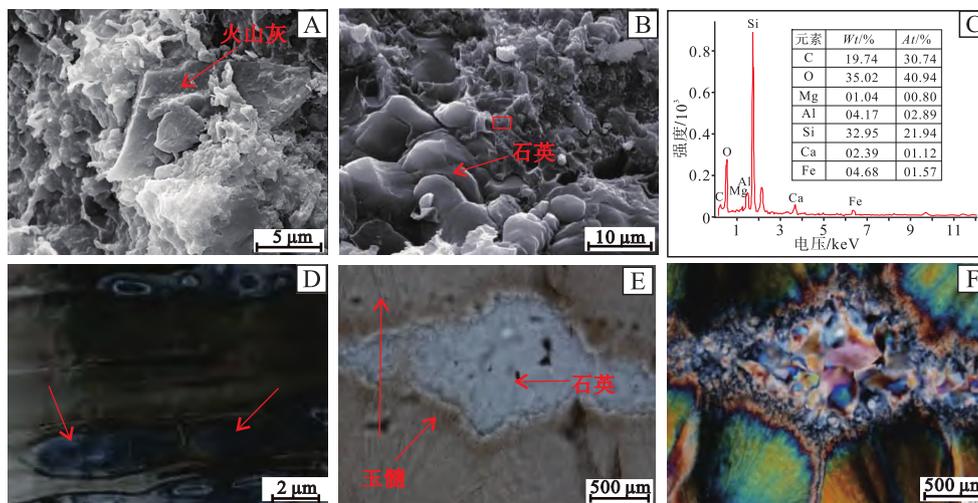
1.3.3 火山—热液活动

火山及热液活动可以为盆地提供大量细粒物质。火山喷发带来凝灰物质(图 2-A), 其中火山玻璃为极不稳定物质, 在沉积埋藏过程中, 会发生脱玻化, 形成石英、长石等微晶颗粒和部分非晶态的二氧化硅(图 2-B) (赵海玲等, 2009; 马剑等, 2015)。该类自生石英附近的非晶态物质能谱显示其 Si/Al 值为 7~9, 与上地幔中 Si/Al 值一致, 远大于大陆地壳的 Si/Al 值 (~3.8) (图 2-C) (刘国恒等, 2016)。富 SiO₂ 热液流体常在凝灰质页岩中形成硅质透镜体及脉体(图 2-D), 频繁热液活动影响下硅质岩主要矿物组成为玉髓、微晶石英(图 2-E, 2-F)。湖底热液活动影响下地层常沉积指示性矿物, 如鄂尔多斯盆地延长组长 7³ 亚段页岩中的重晶石和白铁矿、三塘湖盆地芦苇沟组中的菱锆矿 (刘国恒等, 2019; 翟立国, 2020; 焦鑫等, 2021)。

2 不同类型石英识别

2.1 陆源碎屑石英

页岩中碎屑石英是母岩经风化作用后由河流等地质营力搬运至沉积盆地中沉积形成, 常具有较好的磨圆度, 多呈次棱角状—次圆状 (易婷等, 2020)。阴极发光特征是区分石英成因类型的有效手段 (Ye *et al.*, 2022), 阴极发光特征与母岩类型及形成所经历的温度条件有关, 来源于岩浆岩 (>573 °C) 的石英以蓝紫色为主; 来源于变质岩



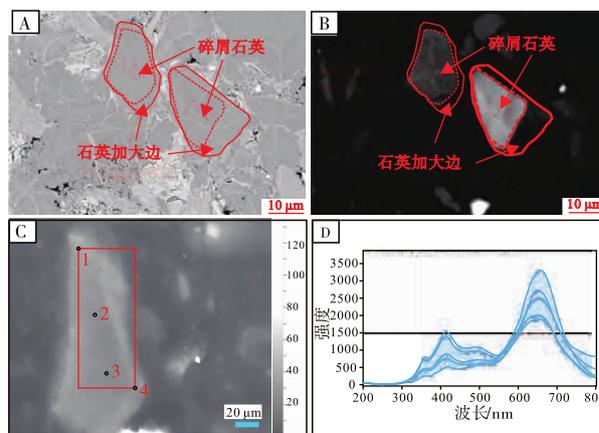
A—页岩中火山玻璃碎片，马朗凹陷芦草沟组，LU1 井，3062.18 m (刘国恒等，2016)；B—凝灰质页岩中脱玻化作用形成，石英扫描电镜图片，马朗凹陷芦草沟组，LU1 井，3062.18 m (刘国恒等，2016)；C—为 B 图框中部分能谱图，马朗凹陷芦草沟组，LU1 井，3062.18 m；D—凝灰质页岩中顺层分布的硅质结核（由微晶石英组成），三塘湖盆地二叠系芦草沟组（焦鑫等，2021）；E—玉髓颗粒沿边缘向中心放射生长的黄褐色放射纹，微晶石英颗粒充填玉髓孔隙，单偏光，马朗凹陷芦草沟组，LU1 井；F—与图 E 同区域正交偏光显微图像，马朗凹陷芦草沟组，LU1 井（翟立国，2020）

图 2 火山—热液活动影响下石英特征

Fig. 2 Quartz characteristics under influence of volcanic-hydrothermal activity

(300~573℃) 的石英以棕色、褐紫色为主；来自沉积岩 (<300℃) 的石英不发光 (张本琪等，2003；林春明等，2021)。陆源碎屑石英在 SEM-CL 图像表现为强发光(图 3-A 至 3-C)，阴极发光光谱一般有 2 个谱峰，其中主峰在 620~650 nm 处，次峰在 420~450 nm 处(图 3-D) (Peltonen *et al.*, 2008；赵建华等，2016)。

在搬运和沉积过程中，石英颗粒表面可以保存不同地质营力形成的微形貌和组合，因此通过提取单个石英颗粒，观察表面特征和分析粒度可以判断其搬运机制 (Vos *et al.*, 2014)。比如碟形坑、新月形坑、麻点或麻面等特征是典型的风成特征，而水下磨光面、直或弯撞击沟等特征是水下搬运的标志(图 4) (江新胜等，2003；汤海磊，2020)。碎屑石英粒径受搬运介质、搬运动力强弱及距离影响，形成不同环境下沉积物粒度频率曲线(图 5-A) (Sun *et al.*, 2002)。以西宁盆地始新世泥岩为例，陆源碎屑石英粒度频率曲线与中国黄土高原沉积物粒度频率曲线相似(图 5-B)，具有风成搬运粒度特征，频率曲线双峰分布，呈负偏态非对称状，主峰峰值一般在 32~63 μm 之间，多在细粒端 2~5 μm 处出现第 2 个峰值。



A—陆源碎屑石英及石英加大边扫描电镜图像，四川盆地五峰—龙马溪组 (Ye *et al.*, 2022)；B—为图 A 的 CL 图像，碎屑石英（强发光）和石英加大边（弱—不发光），四川盆地五峰—龙马溪组 (Ye *et al.*, 2022)；C—边缘棱角分明的陆源碎屑石英，SEM-CL 图像显示荧光较强，东营凹陷沙河街组，NY1 井，3453.3 m；D—图 C 中陆源碎屑石英的双峰光谱，东营凹陷沙河街组，NY1 井，3453.3 m

图 3 陆源碎屑石英形态及阴极发光特征

Fig. 3 Morphology and cathodoluminescence characteristics of terrigenous detrital quartz

2.2 生物石英及成岩自生石英

通过形态观察，自生成因石英比碎屑石英粒径小，生物石英多继承了生物原始结构与构造，可见

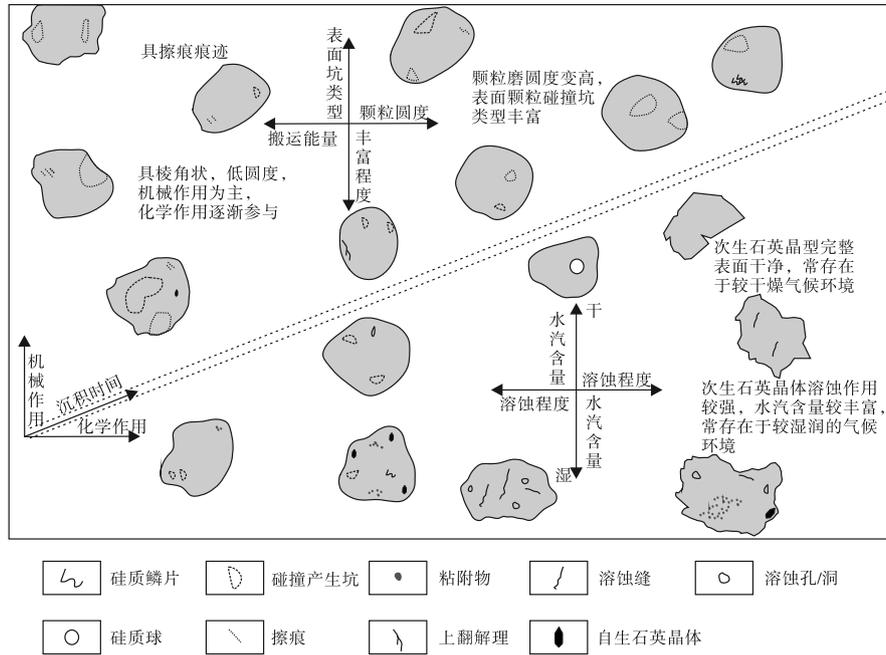
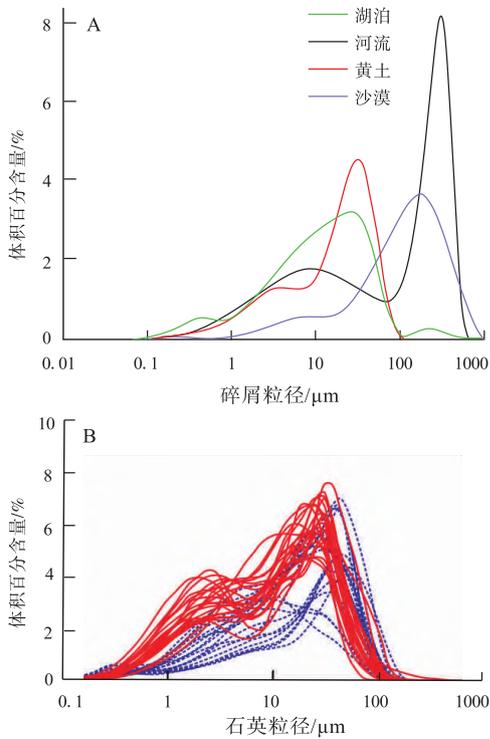


图 4 风成石英颗粒表面特征演化与沉积环境示意图 (据汤海磊, 2020)

Fig. 4 Schematic diagram of evolution of surface characteristics of aeolian quartz particles and sedimentary environment (after Tang, 2020)



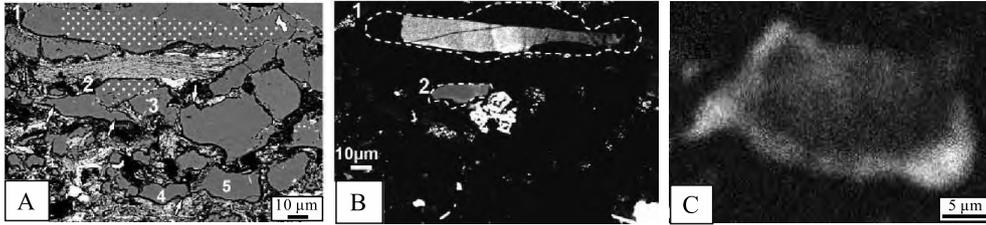
A—典型沉积相的标准粒度频率曲线 (Sun *et al.*, 2002); B—西
宁盆地始新世泥岩中石英粒度分布特征, 频率曲线表现为风成
搬运的双峰不对称特征, 红色为西宁盆地, 蓝色为中国黄土
高原 (Licht *et al.*, 2014)

图 5 不同沉积环境下粒度频率曲线特征

Fig. 5 Characteristics of particle size frequency curves
in different sedimentary environments

放射虫、海绵骨针等生物碎片。Schieber 等 (2000) 对美国东部泥盆系页岩研究发现粉砂级石英并非是陆源碎屑, 借助阴极发光测试手段判别该石英是在成岩过程中形成, 与硅质生物骨骼的溶解和再沉淀有关(图 6)。低温自生石英阴极发光强度弱, 常呈弱发光—不发光。生物成因石英形成过程为: 蛋白石-A 转化为蛋白石-CT, 蛋白石-CT 溶解再沉淀形成石英, 前人研究发现, 蛋白石-A 在阴极射线照射下不发光, 蛋白石-CT 在阴极射线照射下显示蓝色, 主峰对应波长 450 nm 左右, 因此生物成因石英阴极发光光谱呈钟型, 在 400 nm 左右出现次峰(图 7) (Thyberg *et al.*, 2010; 刘洪林等, 2018)。

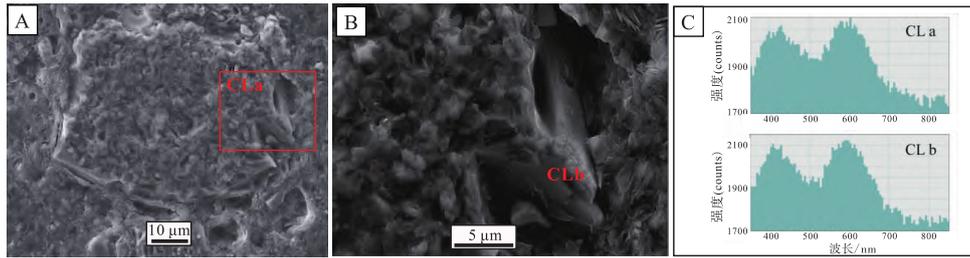
页岩 Si-Al 含量交会图上, 可见较高 Si 值, 该部分高于伊利石 Si/Al 值以上的 Si 称为过量硅(图 8-A)。过量硅含量是指高于正常碎屑沉积环境下的 SiO₂ 含量, 其计算公式为: $Si_{\text{过量}} = Si_{\text{样品}} - [(Si/Al)_{\text{背景}} \times Al_{\text{样品}}]$, (Si/Al)_{背景} 多采用平均页岩比值 3.11 (Wedepohl, 1971; Ross and Bustin, 2009)。过量硅的存在表明页岩中 SiO₂ 除陆源碎屑供给外, 还有其他来源, 该部分 SiO₂ 常结合沉积背景和地球化学元素进行成因判别。受高温热液流影响的沉积物一般富集 Fe、Mn 等元素, 匮乏 Al、



A—白色箭头指向石英边缘的港湾状和裂片—尖状的突出；B—A 的阴极发光图像，只有 3 个颗粒具有较强的发光。虚线标记了石英颗粒的轮廓，颗粒 1、2 见石英边缘自生加大，颗粒 3 似乎是石英、云母和长石互生的变质岩石碎片，大部分颗粒不发光推断为自生石英；C—A 中颗粒 5 的阴极发光放大图像，发光特征具有条带性，与硅质充填藻囊形成石英的阴极发光特征相同，与碎屑石英相比较为弱—不发光

图 6 美国 New Albany 泥盆系页岩中粉砂级石英特征（据 Schieber *et al.*, 2000）

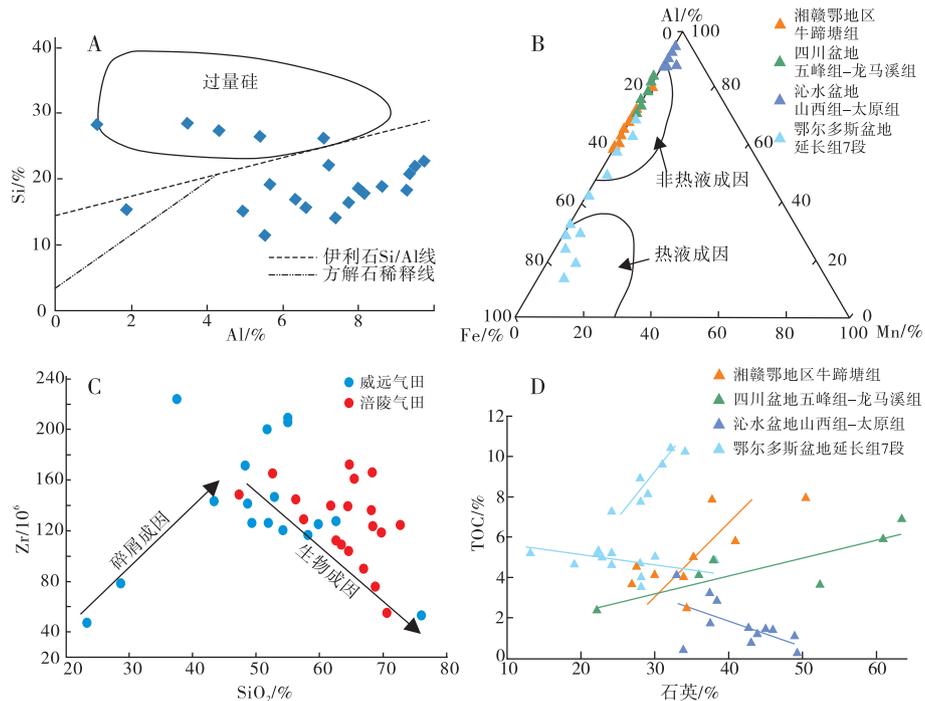
Fig. 6 Characteristics of silty quartz in the Devonian shale of New Albany, USA (after Schieber *et al.*, 2000)



A—隐晶—微晶不规则石英颗粒，具有典型的硅质岩形态，33/5-2 井，2370 m；B—A 中框内区域放大显示图像，微晶石英集合体的边缘存在粗结晶石英；C—为 A、B 中标注区域的阴极发光光谱特征

图 7 美国 North Sea 晚白垩世页岩自生石英扫描电镜及阴极发光光谱特征（据 Thyberg *et al.*, 2010）

Fig. 7 Scanning electron microscope and cathodoluminescence energy spectrum characteristics of the Late Cretaceous shale authigenic quartz in North Sea, USA (after Thyberg *et al.*, 2010)



A—页岩 Si-Al 相关性确定过量硅（据 Rowe *et al.*, 2008, 修改。数据来源为 Dong *et al.*, 2019）；B—Al-Fe-Mn 三端元图，根据投点位置确定热液成因与非热液成因（据 Yamamoto, 1987, 修改。数据来源为刘国恒等, 2019；钟秋, 2021；Tan *et al.*, 2021）；C—页岩中石英含量与 Zr 含量交互图（管全中等, 2021）；D—页岩中石英含量与 TOC 交互图（数据来源同 B）

图 8 利用地球化学元素判别石英成因

Fig. 8 Discrimination of quartz genesis by geochemical elements

Ti 等元素, 而 Al、Ti 与陆源碎屑输入有关。Al/(Al+Fe+Mn) 值可以有效地对沉积物中的石英成因进行划分 (彭军等, 2000; 蔡全升等, 2020; Tan *et al.*, 2021)。Yamamoto (1987) 认为纯热液 Al/(Al+Fe+Mn) < 0.01, 比值随热液输入减少而增加, 当比值大于 0.6 时, 石英为非热液成因, 并由此拟定了判别热液成因与非热液成因硅质的 Al-Fe-Mn 三角判别图解 (图 8-B)。Boström 等 (1972) 认为当 Fe/Ti 值介于 0.4~20 之间, 通常归属于正常的生物成因硅质; 当 Fe/Ti > 20, 一般受热液影响, 若同时 (Fe+Mn)/Ti > 25, 指示为典型的热水沉积物。

页岩中 SiO₂ 与 Zr 之间的相关性可以指示硅来自陆源碎屑还是生物 (图 8-C), 陆源碎屑沉积形成的硅酸盐沉积物中 Zr 是稳定存在的, 因此当 SiO₂ 与 Zr 呈正相关时指示页岩中的硅为碎屑来源, 当两者呈负相关时指示存在较多自生石英, 无相关指示石英具有多种成因 (郭雯等, 2021; 管全中等, 2021; 王拔秀等, 2022)。同时如果生物石英占主导, 二氧化硅含量常随着 TOC 含量增加而增加, 而陆源石英与 TOC 含量呈负相关 (图 8-D) (Xu *et al.*, 2021)。

借助电镜观察、阴极发光等实验方法识别出不同成因类型石英的差异性特征, 以更好地了解石英类型、二氧化硅的来源 (图 9)

3 石英成因研究意义

3.1 自生矿物成岩演化

石英类型多样, 包括陆源碎屑石英、生物成因石英及成岩自生石英。页岩形成经历压实、胶结、黏土矿物转化、有机质生烃及有机-无机成岩作用共同改造。受到构造-埋藏过程中温度-压力的控制, 在埋藏过程的不同阶段, 页岩中石英类型存在差异 (图 10)。

1) 生物硅质演化: 生物硅是生物成因的硅质沉积物, 主要源于硅藻、硅鞭毛藻、放射虫和海绵生物群。随着生物硅埋藏深度增加, 受温度、压力作用, 生物硅的结构会发生变化, 从不稳定蛋白石-A 逐步向结构更为有序、稳定程度更高的蛋白石-CT 转化, 再经进一步脱水、结晶, 最终转化为具有晶体结构的石英 (秦亚超, 2010)。通常埋藏温度为 30~50 °C 时, 蛋白石-A 即开始向蛋白石-CT 转化, 部分地层受有机质含量和水体环境 pH 值的

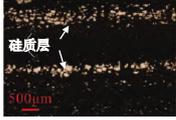
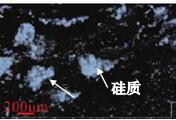
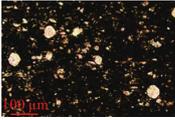
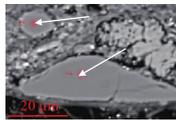
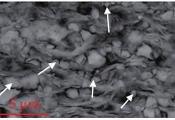
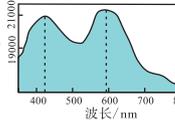
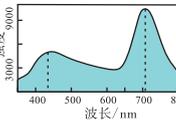
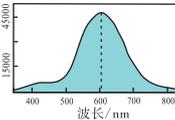
硅质来源特征	火山-热液硅	生物成因硅	陆源碎屑硅	成岩自生硅质来源
形貌/赋存特征	  多呈层状、结核状发育	  放射虫、海绵骨针等富硅生物	  漂浮于黏土基质表面见搬运痕迹	  见石英加大边/微晶石英镶嵌于黏土矿物中
地化特征	富集 Fe、Mn 元素 Al/(Al+Fe+Mn) 多小于 0.06	SiO ₂ 与 TOC 含量呈正相关 Fe/Ti 的值介于 0.4~20 之间 $Si_{\text{陆源}} = Si_{\text{样品}} - [(Si/Al)_{\text{碎屑}} \times Al_{\text{样品}}]$	多富 Ti、Al 元素 SiO ₂ 含量与 Zr 含量正相关	长石溶蚀产生 K ⁺ 蒙脱石的伊利石化需 K ⁺
阴极发光能谱				

图 9 不同硅质来源及其形成石英特征 (据 Thyberg *et al.*, 2010; 钟秋, 2021; 孟子圆, 2022; 王昕尧等, 2022; 张瑜等, 2022; 修改)

Fig. 9 Different silica sources and their quartz formation characteristics (modified from Thyberg *et al.*, 2010; Zhong, 2021; Meng, 2022; Wang *et al.*, 2022; Zhang *et al.*, 2022)

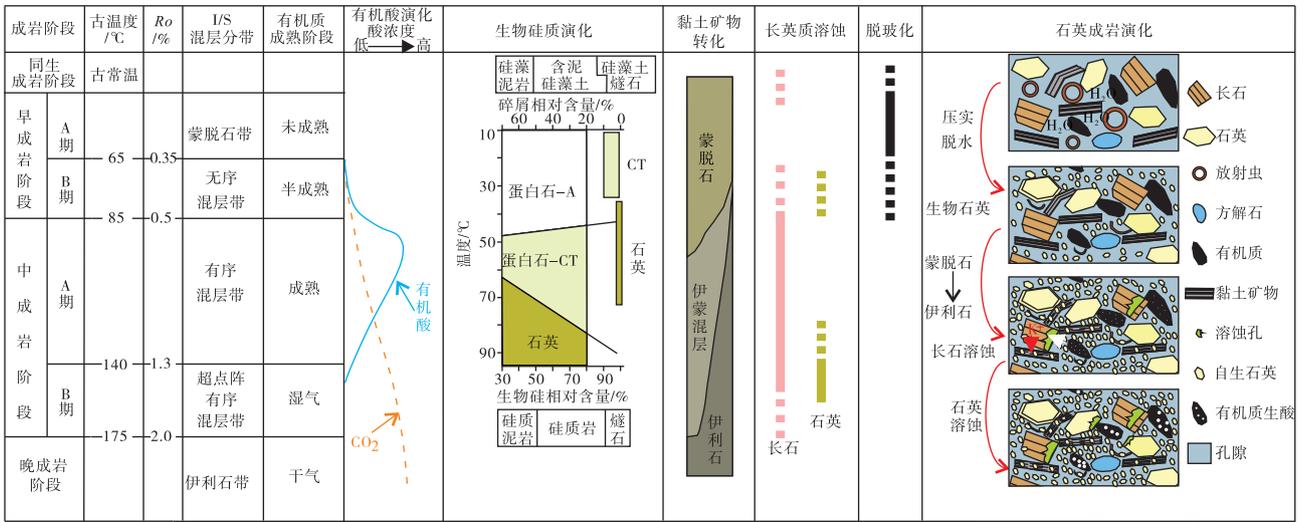


图 10 页岩成岩演化与石英成因关系

Fig. 10 Relationship between diagenetic evolution of shale and genesis of quartz

影响在 10~20 °C 也见蛋白石-CT (Williams *et al.*, 1985; Matheney and Knauth, 1993)。蛋白石-CT 向石英的转化温度则较高, 大多在 60~80 °C (Worden *et al.*, 2012), 温度越高, 蛋白石-CT 向石英转化转变所需时间越短。因此在进入沉积地层后不久就开始发生蛋白石-A 向蛋白石-CT 的转化, 在早成岩阶段即开始通过脱水和重结晶作用逐步向晶态的石英转化。

2) 黏土矿物转化: 在成岩过程中, 随温度、压力增加, 蒙脱石经无序混层→部分有序混层→有序混层→超点阵有序混层的演化过程, 最终生成伊利石。温度区间大致为 70~100 °C (Aplin and Macquaker, 2011)。在早成岩阶段 B 期, 转变开始, 在中成岩阶段 A 期, 蒙脱石向伊蒙混层和伊利石大量转化, 生成大量自生硅质。必须注意的是蒙脱石向伊利石转化反应需要消耗 K⁺, K⁺ 多由钾长石分解产生, 而富含 Fe²⁺、Mg²⁺ 环境下, 蒙脱石会向绿泥石转化 (朱筱敏, 2008)。

3) 长英质溶蚀: 早期沉积若为开放系统, 大气淋滤作用会造成部分长石溶蚀, 产生少量硅质。随着地层的埋深, 沉积有机质不断演化, 在早成岩 B 期—中成岩 A 期, 有机质进入半成熟—成熟阶段, 大量有机酸和 CO₂ 从干酪根中释放, 长石开始大量溶蚀, 生成硅质, 同时钾长石溶蚀产生 K⁺ 也促进蒙脱的石英伊利石化过程的进行 (Loucks *et al.*, 2012)。碎屑石英在埋藏过程中会发生压溶作用, 流体迁移后生成微晶石英。主要在中成岩阶

段 B 期的碱性环境下, 有机质演化进入末期, 有机酸被破坏, 各种成岩反应导致储集层中 H⁺ 大量消耗, 碱金属阳离子大量富集, 多种因素的综合效应使孔隙水介质碱性逐渐增强, 从而发生碎屑石英溶蚀, 产生硅质 (刘金库等, 2015)。

4) 凝灰质脱玻化作用: 火山玻屑是一种不稳定组分, 总是趋向晶体方向转化, 即为脱玻化作用, 脱玻化产物主要为石英和长石晶体, 并产生孔隙 (程日辉等, 2010)。脱玻化作用主要在早成岩浅埋过程中发生 (于振锋等, 2012)。

页岩成岩过程受多场耦合控制、有机—无机组分协同作用, 成岩自生石英多阶段形成, 与页岩埋藏成岩过程有着密切关联。早成岩阶段, 受压实作用影响, 脱出大量孔隙水, 蛋白石-A 溶解再沉淀形成蛋白石-CT, 蛋白石-CT 再溶解沉淀, 形成生物石英。含凝灰质页岩内火山玻屑进行脱玻化作用生成石英和长石晶体。中成岩阶段 A 期, 蒙脱石向伊蒙混层和伊利石大量转化, 生成大量嵌于黏土矿物中的石英。该阶段有机酸大量释放, 长石大量溶蚀生成自生石英, 同时为蒙脱石的伊利石化过程提供 K⁺。中成岩阶段 B 期, 随成岩作用进行, 孔隙水介质碱性逐渐增强, 碎屑石英碱性环境下易受压溶作用, 形成少量自生石英。

3.2 石英对页岩储集层的影响

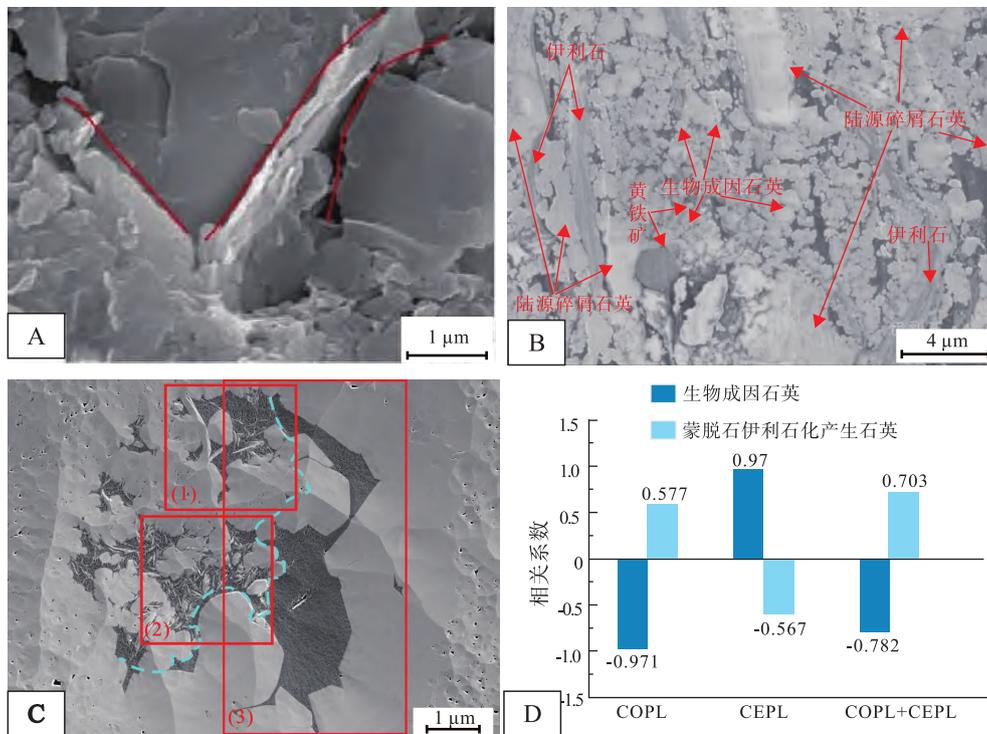
众多研究表明, 生物石英的发育与有机质的富集存在密切关系, 表现为生物硅含量与有机碳含量

具有正相关性 (金之钧等, 2016; Dong *et al.*, 2019; 蔡全升等, 2020)。浮游生物在硅化作用下, 形成残余内部腔体, 其内可充填大量有机质, 很大程度上促进了沉积岩中有机质含量的增加。因此, 生物成因石英含量高表明页岩沉积时的古生产力高, 生烃母质生物繁盛, 因而对有机质富集更有利; 陆源石英与黏土矿物转化石英的增多指示着陆源物质输入的增多, 生物石英减少常伴随着页岩沉积中有机质含量的减少 (聂海宽和张金川, 2012; 曾维特等, 2014)。

碎屑石英颗粒的存在对于压实作用具有抵抗作用, 有利于孔隙的保存, 同时与周边颗粒接触形成裂缝和孔隙 (图 11-A)。生物成因石英主要形成于早成岩阶段, 多以微晶聚集体和胶结物的形式充填在原生晶间孔和晶内孔中, 常和陆源碎屑石英一起构成颗粒支撑格架 (图 11-B), 能够有效抑制压实作用, 有利于保留原生孔隙。硅质生物体内常充填有机质, 其热演化产生有机孔可得到很好的保护

(图 11-C) (周晓峰等, 2022)。黏土矿物转化和凝灰质脱玻化过程是一种增孔作用, 体积缩小形成大量微孔隙, 但黏土矿物转化过程中产生的石英多嵌于黏土基质中, 减少页岩储集层储集空间 (图 11-D)。长英质溶蚀过程产生溶蚀微孔, 增加了储集层储集空间 (Ye *et al.*, 2022)。

脆性矿物含量是影响页岩基质孔隙和微裂缝发育程度、含气性及压裂改造方式的重要因素, 黏土矿物含量越低、脆性矿物含量越高, 岩石脆性越强、可压性越好 (邹才能等, 2010)。从岩石破裂机理来看, 石英具有较高的脆性, 在外力下容易破碎产生裂缝, 储集层中石英含量高, 天然裂缝往往比较发育, 水力压裂更容易产生较多的诱导裂缝, 从而沟通基质孔隙与天然裂缝利于烃类运移和产出 (唐颖等, 2012)。其中生物成因石英形成粒间孔多与有机质孔形成网络, 在压裂过程中容易形成复杂且连通性好的孔—缝体系, 有利于增强页岩储集层可压裂性; 陆源碎屑石英常漂浮于黏土矿物中,



A—石英颗粒边缘缝, 四川盆地五峰组—龙马溪组, 渝页 1 井, 290 m (梁超等, 2012); B—页岩中陆源碎屑石英和生物成因石英构成硅质支撑格架, 渝东地区五峰组—龙马溪组, 隆页 1 井 (孙川翔等, 2019); C—放射虫生物骨架中有机质类型及赋存特征, (1) 为富孔隙的有机质-黏土复合体、富孔隙的有机质、无孔隙的有机质共存, (2) 主要为富孔隙的有机质-黏土复合体, (3) 为富孔隙、无孔隙的有机质共存, 四川盆地五峰组—龙马溪组, Z205 井 (周晓峰等, 2022); D—四川盆地五峰组—龙马溪组页岩中不同类型石英对孔隙损失的影响: COPL 为压实孔隙度损失, CEPL 为胶结孔隙度损失 (Ye *et al.*, 2022)

图 11 石英类型对页岩储集空间的影响

Fig. 11 Effect of quartz type on shale reservoir space

此类结构特征使得对页岩储集层可压裂性贡献有限。

4 页岩中石英研究展望

通过总结国内外不同地区、不同时期的众多学者对页岩中石英成因类型的研究成果，认为研究取得进展主要体现在以下几个方面：(1) 基本明确了硅质多种来源；(2) 概括总结了不同成因类型石英特征；(3) 分析了不同成因类型石英对页岩储集层性质的影响。但是由于技术手段限制及页岩沉积环境、过程的复杂性无法较好地系统分析页岩中各种石英的形成，未来页岩中石英研究还存在一些方面亟需继续深入研究。

首先是页岩中石英的粒度及碎屑石英颗粒表面特征研究。石英粒度特征是判别陆源碎屑石英和其他类型石英指标之一，同时陆源碎屑石英作为页岩中普遍存在矿物，在搬运、沉积过程中性质稳定。通过分析石英粒度及碎屑石英颗粒表面特征有利于获得沉积物物源信息、识别搬运动力。如何获取页岩中石英颗粒粒度还未有一个完善方法，是否有可行方法提取出页岩中石英颗粒？

其次是多类型石英在页岩中占比问题。在页岩中，前人通过地球化学特征及岩石矿物学等研究认为在页岩中多硅质来源石英形成了多种类型石英。如何定量页岩中各成因类型石英含量？如何量化不同硅质来源的贡献程度？

针对上述未解决问题，建议在将来的研究中进一步开展以下方面的工作：一方面是善于运用新的技术手段。页岩矿物颗粒粒径小、紧密接触，常规实验仪器或未能达到观察精度、要求，需要运用高分辨率场发射扫描电镜 SEM，实现 AMICS 矿物定量分析、矿物形貌特征观察；运用 Ge、Si 等与热液活动相关元素建立方程分析页岩中石英硅质来源。另一个方面是结合对页岩中石英沉积环境分析，更加明确页岩中石英硅质来源及特征等：(1) 通过新同位素如 Sr-Nd 同位素的运用对页岩的沉积环境进行识别；(2) 基于硅质生物反映古生产力和古环境、陆源碎屑反映的沉积物搬运动力等，分析不同沉积环境对石英类型和分布的影响。通过观察石英形貌特征、硅质来源及沉积环境分析建立石英成因、分布与沉积环境之间的关联，深入研究页岩中石英成因。

5 结论

1) 页岩中石英类型多样，包括陆源碎屑石英、生物石英和成因过程中硅质沉淀生成石英。成岩自生石英硅质来源主要有黏土矿物转化、长英质溶蚀和生物硅溶解、凝灰质脱玻化作用等。

2) 陆源碎屑石英颗粒多呈粉砂级，但存在生物成因粉砂级石英集合体，因此，进行石英成因判别要结合电镜观察和各种实验测试分析方法。陆源碎屑石英颗粒表面碟形撞击坑、新月形撞击坑、麻点或麻面等特征多指示颗粒经风力搬运，而水下磨光面、直/弯撞击沟、V 形撞击坑等特征是水下搬运的标志。陆源石英阴极发光特征为强发光、双峰，生物成因及成岩自生石英弱—不发光，生物石英见钟型发光光谱。通过过量硅、Al-Fe-Mn 三角判别图解、SiO₂ 与 TOC、Zr 含量的相关性分析可以进一步的判别石英成因。

3) 埋藏成岩过程中陆源碎屑石英受应力，多与周边形成裂缝与孔隙。早成岩阶段生物成因石英生成，多与有机质共同充填生物腔体，有利于有机质富集和有机孔的保存。凝灰质页岩中火山玻璃屑在早成岩阶段完成脱玻化作用。中成岩阶段，有机酸大量释放，长石溶蚀生成石英，产生溶蚀孔，并为黏土矿物转化过程提供 K⁺；受温度和 K⁺ 的影响，该阶段蒙脱石向伊蒙混层和伊利石大量转化，生成大量自生石英，充填部分孔隙。晚期碱性环境下碎屑石英也会发生溶蚀，产生硅质、溶蚀孔。页岩的成岩是多组分协同作用过程，弄清石英的形成演化对重建细粒沉积物埋藏成岩过程具有重要意义。

4) 关于页岩中石英研究取得了许多进展，但在某些问题上如页岩中石英颗粒粒度特征、多种硅质来源贡献程度、量化不同类型石英含量等问题未得到较好的解决，未来研究中需借助更多的测试手段对该类问题进行深入研究。

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. Petroleum Exploration and Development, 49(5): 896-907]
- 蔡全升,陈孝红,张保民,刘安,韩京,张国涛,李炎桂. 2020. 鄂西宜昌地区五峰组—龙马溪组黑色岩系硅质来源及其油气地质意

- 义. 地质学报, 94(3): 931-946. [Cai Q S, Chen X H, Zhang B M, Liu A, Han J, Zhang G T, Li Y G. 2020. Origin of siliceous minerals in the black shale of the Wufeng and Longmaxi Formations in the Yichang area, western Hubei Province: geological significance for shale gas. *Acta Geologica Sinica*, 94(3): 931-946]
- 程日辉, 沈艳杰, 颜景波, 李庆峰, 李晓辉, 王英武, 李飞, 许中杰. 2010. 海拉尔盆地火山碎屑岩的成岩作用. 岩石学报, 26(1): 47-54. [Cheng R H, Shen Y J, Yan J B, Li Q F, Li X H, Wang Y W, Li F, Xiu Z J. 2010. Diagenesis of volcanoclastic rocks in Hailaer Basin. *Acta Petrologica Sinica*, 26(1): 47-54]
- 管全中, 董大忠, 张华玲, 孙莎莎, 张素荣, 郭雯. 2021. 富有机质页岩生物成因石英的类型及其耦合成储机制: 以四川盆地上奥陶统五峰组—下志留统龙马溪组为例. 石油勘探与开发, 48(4): 700-709. [Guan Q Z, Dong D Z, Zhang H L, Sun X X, Zhang S R, Guo W. 2021. Types of biogenic quartz and its coupling storage mechanism in organic-rich shales: a case study of the Upper Ordovician Wufeng Formation to Lower Silurian Longmaxi Formation in the Sichuan Basin, SW China. *Petroleum Exploration and Development*, 48(4): 700-709]
- 郭雯, 董大忠, 李明, 孙莎莎, 管全中, 张素荣. 2021. 富有机质页岩中石英的成因及对储层品质的指示意义: 以四川盆地东南部及周缘龙马溪组龙-1亚段为例. 天然气工业, 41(2): 65-74. [Guo W, Dong D Z, Li M, Sun X X, Guan Q Z, Zhang S R. 2021. Quartz genesis in organic-rich shale and its indicative significance to reservoir quality: a case study on the first submember of the first Member of Lower Silurian Longmaxi Formation in the southeastern Sichuan Basin and its periphery. *Natural Gas Industry*, 41(2): 65-74]
- 黄思静, 黄可可, 冯文立, 佟宏鹏, 刘丽红, 张雪花. 2009. 成岩过程中长石、高岭石、伊利石之间的物质交换与次生孔隙的形成: 来自鄂尔多斯盆地上古生界和川西凹陷三叠系须家河组的研究. 地球化学, 38(5): 498-506. [Huang S J, Huang K K, Feng W L, Tong H P, Liu L H, Zhang X H. 2009. Mass exchanges among feldspar, kaolinite and illite and their influences on secondary porosity formation in clastic diagenesis: a case study on the Upper Paleozoic, Ordos Basin and Xujiache Formation, Western Sichuan Depression. *Geochimica*, 38(5): 498-506]
- 焦鑫, 柳益群, 周鼎武, 李红, 孟子圆, 赵敏茹, 杨奕曜. 2021. 湖相烃源岩中的火山—热液深源物质与油气生成耦合关系研究进展. 古地理学报, 23(4): 789-809. [Jiao X, Liu Y Q, Zhou D W, Li H, Meng Z Y, Zhao M R, Yang Y Y. 2021. Progress on coupling relationship between volcanic and hydrothermal-originated sediments and hydrocarbon generation in lacustrine source rocks. *Journal of Palaeogeography (Chinese Edition)*, 23(4): 789-809]
- 江新胜, 徐金沙, 潘忠习. 2003. 鄂尔多斯盆地白垩纪沙漠石英沙粒表面特征. 沉积学报, 21(3): 416-422. [Jiang X S, Xu J S, Pan Z X. 2003. Microscopic features on quartz sand grain surface in the Cretaceous desert of Ordos Basin. *Acta Sedimentologica Sinica*, 21(3): 416-422]
- 姜在兴, 张文昭, 梁超, 王永诗, 刘惠民, 陈祥. 2014. 页岩油储层基本特征及评价要素. 石油学报, 35(1): 184-196. [Jiang Z X, Zhang W Z, Liang C, Wang Y S, Liu H M, Chen X. 2014. Characteristics and evaluation elements of shale oil reservoir. *Acta Petrolei Sinica*, 35(1): 184-196]
- 金之钧, 胡宗全, 高波, 赵建华. 2016. 川东南地区五峰组—龙马溪组页岩气富集与高产控制因素. 地学前缘, 23(1): 1-10. [Jin Z J, Hu Z Q, Gao B, Zhao J H. 2016. Controlling factors on the enrichment and high productivity of shale gas in the Wufeng-Longmaxi Formations, southeastern Sichuan Basin. *Earth Science Frontiers*, 23(1): 1-10]
- 梁超, 姜在兴, 杨懿婷, 魏小洁. 2012. 四川盆地五峰组—龙马溪组页岩岩相及储集空间特征. 石油勘探与开发, 39(6): 691-698. [Liang C, Jiang Z X, Yang Y T, Wei X J. 2012. Characteristics of shale lithofacies and reservoir space of the Wufeng-Longmaxi Formation, Sichuan Basin. *Petroleum Exploration and Development*, 39(6): 691-698]
- 林春明, 张霞, 赵雪培, 李鑫, 黄舒雅, 江凯禧. 2021. 沉积岩石学的室内研究方法综述. 古地理学报, 23(2): 223-244. [Lin C M, Zhang X, Zhao X P, Li X, Huang S Y, Jiang K X. 2021. Review of laboratory research methods for sedimentary petrology. *Journal of Palaeogeography (Chinese Edition)*, 23(2): 223-244]
- 刘国恒, 黄志龙, 郭小波, 刘再振, 高潇玉, 陈常超, 张成林, 王昕. 2016. 新疆三塘湖盆地马朗凹陷中二叠统芦草沟组泥页岩层系 SiO₂ 赋存状态与成因. 地质学报, 90(6): 1220-1235. [Liu G H, Huang Z L, Guo X B, Liu Z Z, Gao X Y, Chen C C, Zhang C L, Wang X. 2016. The SiO₂ occurrence and origin in the shale system of Middle Permian series Lucaogou Formation in Malang Sag, Santanghu Basin, Xinjiang. *Acta Geologica Sinica*, 90(6): 1220-1235]
- 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 & Experiment*, 41(1): 45-55, 67]
- 刘洪林, 郭伟, 刘德勋, 周尚文, 邓继新. 2018. 海相页岩成岩过程中的自生脆化作用. 天然气工业, 38(5): 17-25. [Liu H L, Guo W, Liu D X, Zhou S W, Deng J X. 2018. Authigenic embrittlement of marine shale in the process of diagenesis. *Natural Gas Industry*, 38(5): 17-25]
- 刘金库, 彭军, 石岩, 鲍作帆, 孙永亮, 刘学敏, 张泽. 2015. 致密砂岩储层石英溶蚀成因及对孔隙发育的影响: 以川中—川南过渡带须家河组为例. 石油学报, 36(9): 1090-1097. [Liu J K, Peng J, Shi Y, Bao Z F, Sun Y L, Liu X M, Zhang Z. 2015. The genesis of quartz dissolution in tight sand reservoirs and its impact on pore development: a case study of Xujiache Formation in the transitional zone of Central-Southern Sichuan Basin. *Acta Petrolei Sinica*, 36(9): 1090-1097]
- 刘树根, 马文辛, Luba J, 黄文明, 曾祥亮, 张长俊. 2011. 四川盆地东部地区下志留统龙马溪组页岩储层特征. 岩石学报, 27(8):

- 2239-2252. [Liu S G, Ma W X, Luba J, Huang W M, Zeng X L, Zhang C J. 2011. Characteristics of the shale gas reservoir rocks in the Lower Silurian Longmaxi Formation, East Sichuan basin, China. *Acta Petrologica Sinica*, 27(8): 2239-2252]
- 马剑, 黄志龙, 刘再振, 陈常超, 高潇玉. 2015. 三塘湖盆地条湖组含沉积有机质凝灰岩致密储层特征. *地质前缘*, 22(6): 185-196. [Ma J, Huang Z L, Liu Z Z, Chen C C, Gao X Y. 2015. Tight reservoir characteristics of sedimentary organic matter-bearing tuff in Tiaohu Formation of Santanghu Basin. *Earth Science Frontiers*, 22(6): 185-196]
- 孟子圆. 2022. 富深源物质的湖相烃源岩及其与有机质富集关系研究: 以新疆北部二叠系芦苇沟组为例. 西北大学博士学位论文. [Meng Z Y. 2022. Deep-derived sediments-rich lacustrine hydrocarbon source rocks and their relationship with organic matter accumulation: example from Permian Lucaogou Formation in northern Xinjiang. Doctoral dissertation of Northwest University]
- 聂海宽, 张金川. 2012. 页岩气聚集条件及含气量计算: 以四川盆地及其周缘下古生界为例. *地质学报*, 86(2): 349-361. [Nie H K, Zhang J C. 2012. Shale Gas Accumulation conditions and gas content calculation: a case study of Sichuan Basin and its periphery in the Lower Paleozoic. *Acta Geologica Sinica*, 86(2): 349-361]
- 彭军, 田景春, 伊海生, 夏文杰. 2000. 扬子板块东南大陆边缘晚前寒武纪热水沉积作用. *沉积学报*, 18(1): 107-113. [Peng J, Tian J C, Yi H S, Xia W J. 2000. The Late Precambrian hot water sedimentation of the Southeast Yangtze Plate Continental Margin. *Acta Sedimentologica Sinica*, 18(1): 107-113]
- 秦亚超. 2010. 生物硅早期成岩作用研究进展. *地质论评*, 56(1): 89-98. [Qin Y C. 2010. Research progress in early diagenesis of Biogenic Silica. *Geological Review*, 56(1): 89-98]
- 邱隆伟, 姜在兴, 操应长, 邱荣华, 陈文学. 2001. 泌阳凹陷碱性成岩作用及其对储层的影响. *中国科学(D辑: 地球科学)*, 31(9): 752-759. [Qiu L W, Jiang Z X, Cao Y C, Qiu R H, Chen W X. 2001. Alkali diagenesis and their effect on the reservoirs in Biyang Sag. *Science in China(Series D)*, 31(9): 752-759]
- 孙川翔, 聂海宽, 刘光祥, 张光荣, 杜伟, 王濤岳. 2019. 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. *地球科学*, 44(11): 3692-3704. [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]
- 汤海磊. 2020. 楚雄盆地东北部白垩纪风成沉积特征与古气候研究. 成都理工大学硕士学位论文. [Tang H L. 2020. Sedimentary characteristics and palaeoclimatic implications of the Cretaceous aeolian Erg System in the Northeastern Chuxiong Basin, China. Masteral dissertation of Chengdu University of Technology]
- 唐颖, 邢云, 李乐忠, 张滨海, 蒋时馨. 2012. 页岩储层可压裂性影响因素及评价方法. *地质前缘*, 19(5): 356-363. [Tang Y, Xing Y, Li L Z, Zhang B H, Jiang S X. 2012. Influence factors and evaluation methods of the eas shale fracability. *Earth Science Frontiers*, 19(5): 356-363]
- 万友利, 丁晓琪, 白晓亮, 黄方方, 朱志良. 2014. 塔中地区志留系海相碎屑岩储层石英溶蚀成因及影响因素分析. *沉积学报*, 32(1): 138-147. [Wan Y L, Ding X Q, Bai X L, Huang F F, Zhu Z L. 2014. Quartz dissolution causes and influencing factors in the Silurian marine clastic reservoir rocks in Central Tarim Basin. *Acta Sedimentologica Sinica*, 32(1): 138-147]
- 王拔秀, 张鹏辉, 梁杰, 陈建文, 孟祥豪, 付奕霖, 鲍衍君. 2022. 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. *沉积学报*, 143: 1-20. [Wang B X, Zhang P H, Liang J, Chen J W, Meng X H, Fu Y L, Bao Y J. 2022. Biogenic microcrystalline quartz and its influence on pore development in marine shale reservoirs. *Acta Sedimentologica Sinica*, 143: 1-20]
- 王濤岳, 胡宗全, 龙胜祥, 杜伟, 吴靖, 邹忠虎, 聂海宽, 王鹏威, 孙川翔, 赵建华. 2022. 四川盆地奥陶统五峰组一下志留统龙马溪组页岩储层特征与演化机制. *石油与天然气地质*, 43(2): 353-364. [Wang R Y, Hu Z Q, Long S X, Du W, Wu J, Wu Z H, Nie H K, Wang P W, Sun C X, Zhao J H. 2022. Reservoir characteristics and evolution mechanisms of the Upper Ordovician Wufeng-Lower Silurian Longmaxi shale, Sichuan Basin. *Oil & Gas Geology*, 43(2): 353-364]
- 王昕尧, 金振奎, 朱毅秀, 胡宗全, 刘光祥, 赵国伟, 李硕史, 书婷. 2022. 四川盆地自流井组陆相页岩石英成因研究. *沉积学报*, 40(4): 1010-1018. [Wang X Y, Jin Z K, Zhu Y X, Hu Z Q, Liu G X, Zhao G W, Li S S, Shu T. 2022. The genesis of quartz in Ziliujing nonmarine Shale, Sichuan Basin. *Acta Sedimentologica Sinica*, 40(4): 1010-1018]
- 王秀平, 牟传龙, 葛祥英, 陈小炜, 周恩恩, 王启宇, 梁薇, 陈超. 2014. 四川盆地南部及其周缘龙马溪组黏土矿物研究. *天然气地球科学*, 25(11): 1781-1794. [Wang X P, Mou C L, Ge X Y, Chen X W, Zhou K K, Wang Q Y, Liang W, Chen C. 2014. Study on clay minerals in the Lower Silurian Longmaxi Formation in Southern Sichuan Basin and its periphery. *Natural Gas Geoscience*, 25(11): 1781-1794]
- 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, Xiu 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]
- 于振锋, 程日辉, 赵小青, 孙凤贤. 2012. 海拉尔盆地乌尔逊—贝尔凹陷下白垩统火山碎屑岩成岩作用类型及序列. *地球科学(中国地质大学学报)*, 37(4): 851-859. [Yu Z F, Cheng R H, Zhao X Q, Sun F X. 2012. Types and succession of pyroclastic rocks diagenesis in Lower Cretaceous of Wuexun and Bei'er Depression in Hailaer Basin. *Earth Science(Journal of China University of Geosciences)*, 37(4): 851-859]
- 远光辉, 操应长, 葱克来, 王艳忠, 李晓艳, 杨田. 2013. 东营凹陷北带古近系碎屑岩储层长石溶蚀作用及其物性响应. *石油学报*, 34(5): 853-866. [Yuan G H, Cao Y C, Xi K L, Wang Y Z, Li X

- Y, Yang T. 2013. Feldspar dissolution and its impact on physical properties of Paleogene clastic reservoirs in the northern slope zone of the Dongying sag. *Acta Petrolei Sinica*, 34(5): 853-866]
- 曾维特, 张金川, 丁文龙, 王香增, 朱定伟, 刘珠江. 2014. 延长组陆相页岩含气量及其主控因素: 以鄂尔多斯盆地柳坪 171 井为例. *天然气地球科学*, 25(2): 291-301. [Zeng W T, Zhang J C, Ding W L, Wang X Z, Zhu D W, Liu Z J. 2014. The gas content of continental Yanchang Shale and its main controlling factors: a case study of Liuping-171 well in Ordos Basin. *Natural Gas Geoscience*, 25(2): 291-301]
- 赵国连. 1999. 生物作用在二氧化硅聚集沉淀过程中的意义: 以皖南浙西的硅岩为例. *沉积学报*, 17(1): 30-32, 34-37. [Zhao G L. 1999. The influence of biogenic procession on the accumulation and precipitation of silica: an example from south of Anhui and west of Zhejiang. *Acta Sedimentologica Sinica*, 17(1): 30-32, 34-37]
- 赵海玲, 黄微, 王成, 狄永军, 齐井顺, 肖勇, 刘杰. 2009. 火山岩中脱玻化孔及其对储层的贡献. *石油与天然气地质*, 30(1): 47-52, 58. [Zhao H L, Huang W, Wang C, Di Y J, Qi J S, Xiao Y, Liu J. 2009. Micropores from devitrification in volcanic rocks and their contribution to reservoirs. *Oil & Gas Geology*, 30(1): 47-52, 58]
- 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]
- 张本琪, 余宏忠, 姜在兴, 王玉静, 王卫红. 2003. 应用阴极发光技术研究母岩性质及成岩环境. *石油勘探与开发*, 30(3): 117-120. [Zhang B Q, Xu H Z, Jiang Z X, Wang Y J, Wang W H. 2003. Characteristics and diagenetic environments of source rocks by cathodoluminescence. *Petroleum Exploration and Development*, 30(3): 117-120]
- 张永旺, 蒋善斌, 李峰. 2021. 东营凹陷沙河街组砂岩储层砂泥岩界面对长石溶蚀的影响. *地质学报*, 95(3): 883-894. [Zhang Y W, Jiang S B, Li F. 2021. Influence of sandstone-shale contacts on feldspar diagenesis in the sandstone reservoir of the Shahejie Formation in the Dongying depression, Bohai Bay basin. *Acta Geologica Sinica*, 95(3): 883-894]
- 张瑜, 黄德将, 张六六, 万传辉, 罗欢, 邵德勇, 孟康, 闫建萍, 张同伟. 2022. 鄂西宜昌地区寒武系水井沱组页岩生物成因硅特征及其对页岩气富集的影响. *地学前缘*, 23(3): 83-100. [Zhang Y, Huang D J, Zhang L L, Wan C H, Luo H, Shao D Y, Meng K, Yan J P, Zhang T W. 2022. Biogenic silica of the Lower Cambrian Shuijingtuo Formation in Yichang, western Hubei Province: features and influence on shale gas accumulation. *Earth Science Frontiers*, 23(3): 83-100]
- 翟立国. 2020. 陆相湖盆热液喷流沉积的硅质岩研究: 以新疆三塘湖盆地二叠系芦苇沟组为例. 西北大学硕士学位论文. [Zhai L G. 2020. The study on siliceous rocks of exhalative hydrothermal deposition in Lacustrine Basin; a case study of the permian Lucaogou Formation in Santanghu Basin, Xinjiang. Masteral dissertation of Northwest University]
- 钟秋. 2021. 海相、海陆交互相页岩中石英成因及脆性指数对比研究. 中国矿业大学硕士学位论文. [Zhong Q. 2021. Comparative study on the origin of quartz and brittleness index in marine and marine continental shale. Masteral dissertation of China University of Mining and Technology]
- 周晓峰, 郭伟, 李熙喆, 张晓伟, 梁萍萍, 于均民. 2022. 四川盆地五峰组—龙马溪组有机质类型与有机孔配置的放射虫硅质页岩岩石学证据. *中国石油大学学报(自然科学版)*, 46(5): 12-22. [Zhou X F, Guo W, Li X Z, Zhang X W, Liang P P, Yu J M. 2022. Mutual relation between organic matter types and pores with petrological evidence of radiolarian siliceous shale in Wufeng-Longmaxi Formation, Sichuan Basin. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)*, 46(5): 12-22]
- 朱筱敏. 2008. 沉积岩石学(第四版). 北京: 石油工业出版社, 132-136. [Zhu X M. 2008. *Sedimentary Petrology (Vol. 4)*. Beijing: Petroleum Industry Press, 132-136]
- 邹才能, 董大忠, 王社教, 李建忠, 李新景, 王玉满, 李登华, 程克明. 2010. 中国页岩气形成机理、地质特征及资源潜力. *石油勘探与开发*, 37(6): 641-653. [Zou C N, Dong D Z, Wang S J, Li J Z, Li X J, Wang Y M, Li D H, Chen K M. 2010. Geological characteristics, formation mechanism and resource potential of shale gas in China. *Petroleum Exploration and Development*, 37(6): 641-653]
- Aplin A C, Macquaker J H S. 2011. Mudstone diversity: origin and implications for source, seal, and reservoir properties in petroleum systems. *AAPG Bulletin*, 95(12): 2031-2059.
- Bjorlykke K. 1998. Clay mineral diagenesis in sedimentary basins—a key to the prediction of rock properties: examples from the North Sea Basin. *Clay Minerals*, 33(1): 15-34.
- Blatt H, Schultz D J. 1976. Size distribution of quartz in mudrocks. *Sedimentology*, 23(6): 857-866.
- Boström K, Joensuu O, Valdes S, Riera M. 1972. Geochemical history of South Atlantic Ocean sediments since Late Cretaceous. *Marine Geology*, 12(2): 85-121.
- Bowker K A. 2003. Recent developments of the Barnett Shale play, Fort Worth Basin. *West Texas Geological Society Bulletin*, 42(6): 4-11.
- 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.
- Hart B S, Macquaker J, Taylor K G. 2013. Mudstone (“shale”) depositional and diagenetic processes: implications for seismic analyses of source-rock reservoirs. *Interpretation*, 1(1): B7-B26.
- Hower J, Eslinger E V, Hower M E, Perry E A. 1976. Mechanism of burial metamorphism of argillaceous sediment: 1. Mineralogical and chemical evidence. *Geo Science World*, 87(5): 725-737.
- Liang C, Cao Y C, Liu K Y, Jiang Z X, Wu J, Hao F. 2018. Diagenetic

- variation at the lamina scale in lacustrine organic-rich shales: implications for hydrocarbon migration and accumulation. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 229: 112–128.
- Licht A, Cappelle M V, Abels H A, Ladant J B, Trabuco-Alexandre J, France-Lanord C, Donnadieu Y, Vandenberghe J, Rigaudier T, Lécuyer C. 2014. Asian monsoons in a late Eocene greenhouse world. *Nature*, 513(7519): 501–506.
- 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(4): 579–601.
- Loucks R G, Reed R M, Ruppel S C, Hammes U. 2012. Spectrum of pore types and networks in mudrocks and a descriptive classification for matrix-related mudrock pores. *AAPG Bulletin*, 96(6): 1071–1098.
- Matheny R K, Knauth L P. 1993. New isotopic temperature estimates for early silica diagenesis in bedded cherts. *Geology*, 21(6): 519–522.
- Metwally Y M, Chesnokov E M. 2011. Clay mineral transformation as a major source for authigenic quartz in thermo-mature gas shale. *Applied Clay Science*, 55: 138–150.
- Milliken K L. 1994. Cathodoluminescent textures and the origin of quartz silt in Oligocene mudrocks, South Texas. *Journal of Sedimentary Research*, 64(3a): 567–571.
- Milliken K L, Ergene S M, Ozkan A. 2016. Quartz types, authigenic and detrital, in the Upper Cretaceous Eagle Ford Formation, South Texas, USA. *Sedimentary Geology*, 339: 273–288.
- Peltonen C, Marcussen O, Bjorlykke K, Jahren J. 2008. 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.
- Ross D, Bustin R M. 2009. Investigating the use of sedimentary geochemical proxies for paleoenvironment interpretation of thermally mature organic-rich strata: examples from the Devonian-Mississippian shales, Western Canadian Sedimentary Basin. *Chemical Geology*, 260(1–2): 1–19.
- 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(1–2): 16–25.
- Schieber J, Krinsley D, Riciputi L. 2000. Diagenetic origin of quartz silt in mudstones and implications for silica cycling. *Nature*, 406(6799): 981–985.
- Sun D H, Bloemendal J, Rea D K, Vandenberghe J, Jiang F C, An Z S, Su R X. 2002. Grain-size distribution function of polymodal sediments in hydraulic and aeolian environments, and numerical partitioning of the sedimentary components. *Sedimentary Geology*, 152(3–4): 263–277.
- Tan J Q, Wang Z H, Wang W H, Hilton J, Guo J H, Wang X K. 2021. Depositional environment and hydrothermal controls on organic matter enrichment in the lower Cambrian Niutitang shale, southern China. *AAPG Bulletin*, 105(7): 1329–1356.
- Thyberg B, Jahren J, Winje T, Bjorlykke K, Faleide J I, Marcussen Ø. 2010. Quartz cementation in Late Cretaceous mudstones, northern North Sea: changes in rock properties due to dissolution of smectite and precipitation of micro-quartz crystals. *Marine and Petroleum Geology*, 27(8): 1752–1764.
- Van de Kamp P C. 2008. Smectite-illite-muscovite transformations, quartz dissolution, and silica release in shales. *Clays and Clay Minerals*, 56(1): 66–81.
- Vos K, Vandenberghe N, Elsen J. 2014. Surface textural analysis of quartz grains by scanning electron microscopy (SEM): from sample preparation to environmental interpretation. *Earth-Science Reviews*, 128: 93–104.
- Wedepohl K H. 1971. Environmental influences on the chemical composition of shales and clays. *Physics & Chemistry of the Earth*, 8: 305–333.
- White R J, Spinelli G A, Mozley P S, Dunbar N W. 2011. Importance of volcanic glass alteration to sediment stabilization: offshore Japan. *Sedimentology*, 58: 1138–1154.
- Worden R H, French M W, Mariani E. 2012. Amorphous silica nanofilms result in growth of misoriented microcrystalline quartz cement maintaining porosity in deeply buried sandstones. *Geology*, 40(2): 179–182.
- Williams L A, Parks G A, Crerar D A. 1985. Silica diagenesis: I. Solubility controls. *Journal of Sedimentary Petrology*, 55(3): 301–311.
- Xu H, Zhou W, Hu Q H, Yi T, Ke J, Zhao A K, Lei Z H, Yu Y. 2021. Quartz types, silica sources and their implications for porosity evolution and rock mechanics in the Paleozoic Longmaxi Formation shale, Sichuan Basin. *Marine and Petroleum Geology*, 128: 105036.
- Ye Y P, Tang S H, Xi Z D, Jiang D X, Duan Y. 2022. Quartz types in the Wufeng–Longmaxi Formations in southern China: implications for porosity evolution and shale brittleness. *Marine and Petroleum Geology*, 137: 105479.
- Yamamoto K. 1987. Geochemical characteristics and depositional environments of cherts and associated rocks in the Franciscan and Shimanto Terranes. *Sedimentary Geology*, 52(1–2): 65–108.
- Zhao J H, Jin Z K, Jin Z J, Wen X, Geng Y K. 2016. 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.

(责任编辑 李新坡; 英文审校 徐杰)