

东海陆架盆地西湖凹陷宝武地区平湖组石英溶蚀作用及机制

刘开道^{1,2}, 王俊辉^{1,2}, 阴国锋³, 陈锦霖^{1,2}, 武洋^{1,2}, 李勇霖^{1,2}, 代正明^{1,2}, 姚文娇^{1,2}, 姜在兴⁴, 徐杰⁵

[1. 中国石油大学(北京) 油气资源与工程全国重点实验室, 北京 102249; 2. 中国石油大学(北京) 地球科学学院, 北京 102249; 3. 中国石油化工股份有限公司 上海海洋油气分公司, 上海 200120; 4. 中国地质大学(北京) 能源学院, 北京 100083; 5. 中国地质大学(北京) 海洋学院, 北京 100083]

摘要:为了明确西湖凹陷平湖斜坡带宝武地区平湖组石英溶蚀的成岩环境、特征、机制及其对储层的影响,综合利用岩石薄片、扫描电镜、烃源岩地球化学参数、X射线衍射和重矿物等分析测试资料,研究了相关的成岩环境及其演化规律。研究表明:①研究区存在酸性和碱性两种石英溶蚀作用,其溶蚀机理存在显著差异。酸性环境下石英在碱金属离子作用下与有机酸络合形成络合物导致溶蚀,碱性环境下石英直接与 OH^- 离子反应生成 HSiO_3^- 离子而发生溶蚀。成岩环境演化影响石英的溶蚀,根据溶蚀边界特征可将其划分为交代型溶蚀和增孔型溶蚀两种类型。②高岭石交代型溶蚀是碱金属离子作用下有机酸溶蚀的结果。伊利石、绿泥石和碳酸盐矿物交代型溶蚀是碱性溶蚀的结果。增孔型溶蚀在酸性和碱性环境中均可发生。石英溶蚀程度呈现明显的环境分异性,溶蚀强度从碱性环境—酸性环境—酸—碱过渡环境—弱酸性环境依次减弱。石英溶蚀程度与晶体扭曲面的数量、温度和碱金属离子含量呈正相关关系。③石英增孔型溶蚀的演化序列为扭曲面溶蚀—平坦面(雨痕状)溶蚀—平坦面(蜂窝状)溶蚀—石英颗粒部分缺失;交代型溶蚀的演化序列为高岭石交代溶蚀—碳酸盐矿物交代溶蚀—伊利石交代溶蚀—绿泥石交代溶蚀。粒缘溶蚀、次生加大边溶蚀和自生石英溶蚀改善孔隙结构,增加渗透率。黏土矿物交代溶蚀石英颗粒形成粒间及晶间溶孔对形成储层孔隙贡献较大。

关键词:溶蚀机制;成岩环境;石英溶蚀;平湖组;西湖凹陷;东海陆架盆地

中图分类号:TE122.2

文献标识码:A

Quartz dissolution and its mechanisms in the Pinghu Formation, Baowu area, Xihu Sag, East China Sea Shelf Basin

LIU Kaixiao^{1,2}, WANG Junhui^{1,2}, YIN Guofeng³, CHEN Jinlin^{1,2}, WU Yang^{1,2}, LI Yonglin^{1,2}, DAI Zhengming^{1,2}, YAO Wenjiao^{1,2}, JIANG Zaixing⁴, XU Jie⁵

[1. State Key Laboratory of Petroleum Resources and Engineering, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China; 2. College of Geosciences, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China; 3. Shanghai Offshore Oil & Gas Company, SINOPEC, Shanghai 200120, China; 4. School of Energy Resources, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China; 5. School of Ocean Sciences, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China]

Abstract: This study aims to determine the diagenetic environments, characteristics, and mechanisms of quartz dissolution in the Pinghu Formation within the Baowu area, Pinghu slope zone, Xihu Sag, East China Sea Shelf Basin (ECSSB) and to assess the impact of quartz dissolution on reservoirs. By integrating data from rock thin-section observation, scanning electron microscopy (SEM), X-ray diffraction analysis, and heavy mineral analysis, along with the geochemical parameters of source rocks, we explore the quartz dissolution-related diagenetic environments and their evolutionary patterns. The research results indicate the occurrence of acidic and alkaline quartz dissolution with significantly different mechanisms in the study area. In the acidic diagenetic environment, quartz dissolves through complexation with organic acids in the presence of alkali metal ions, while in the alkaline diagenetic environment, quartz reacts directly with OH^- to form HSiO_3^- . The evolution of diagenetic environments affects quartz dissolution, which can be classified into two types based on the characteristics of dissolution boundaries: metasomatic and porosity-enhancing types. The metasomatic

收稿日期:2024-12-24;修回日期:2025-03-31。

第一作者简介:刘开道(2001—),男,博士研究生,岩石学与储层地质学。E-mail: 2023210043@student.cup.edu.cn。

通信作者简介:王俊辉(1988—),男,副教授、博士研究生导师,沉积学与实验地层学。E-mail: wangjunhui@cup.edu.cn。

基金项目:中国石油大学(北京)科研基金项目(2462020BJRC002, 2462022YXZZ010)。

dissolution by kaolinite occurs through organic acid dissolution in the presence of alkali metal ions, whereas the metasomatic dissolution by illite, chlorite, and carbonate minerals is driven by alkaline dissolution. The porosity-enhancing dissolution occurs in both acidic and alkaline environments. The degree of quartz dissolution varies significantly with the diagenetic environment, decreasing in the order of alkaline, acidic, acidic-alkaline transitional, and weakly acidic environments. Furthermore, this degree is positively correlated with the number of kinking crystal planes, temperature, and alkali metal ion content. The porosity-enhancing quartz dissolution includes kinking plane dissolution, flat plane dissolution (raindrop imprint-like), and flat plane dissolution (honeycomb-like), leading to the partial missing of quartz grains. The metasomatic quartz dissolution involves kaolinite, carbonate minerals, illite, and chlorite. Additionally, grain-edge dissolution, secondary overgrowth rim dissolution, and authigenic quartz dissolution improve pore structures and increase reservoir permeability. Notably, the metasomatic dissolution of quartz grains by clay minerals leads to the formation of intergranular and intercrystalline dissolution pores, significantly increasing the reservoir porosity.

Key words: dissolution mechanism, diagenetic environment, quartz dissolution, Pinghu Formation, Xihu Sag, East China Sea Shelf Basin (ECSSB)

引用格式:刘开道,王俊辉,阴国锋,等. 东海陆架盆地西湖凹陷宝武地区平湖组石英溶蚀作用及机制[J]. 石油与天然气地质, 2025, 46(4): 1349–1366. DOI: 10. 11743/ogg20250421.

LIU Kaixiao, WANG Junhui, YIN Guofeng, et al. Quartz dissolution and its mechanisms in the Pinghu Formation, Baowu area, Xihu Sag, East China Sea Shelf Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2025, 46(4): 1349–1366. DOI: 10. 11743/ogg20250421.

绝大多数碎屑岩储层与次生孔隙密切相关。目前,有关次生孔隙的讨论集中在长石和岩屑等铝硅酸盐矿物和碳酸盐矿物的溶蚀作用^[1-3]。相比之下,由于人们认为石英溶蚀难以形成有助于改善储层品质的次生孔隙,相关研究较少。然而,实际勘探开发实践表明,石英溶蚀形成的次生孔隙对储层改善可能具有不可忽视的贡献。

研究表明,石英溶蚀作用既可发生于碱性成岩环境,也可发生于酸性环境^[4-10],两种环境下的溶蚀机理存在显著差异^[6,11]。在碱性环境下,石英通过与 OH^- 离子反应生成 HSiO_3^- 离子而发生溶蚀。例如,邱隆伟等^[12-14]认为柯克亚凝析气田、鄂尔多斯盆地大牛地地区和泌阳凹陷的石英溶蚀作用均为碱性环境下的直接溶蚀结果;张胜斌等^[15]认为东营凹陷沙河街组的石英溶蚀同样与碱性环境密切相关。在酸性环境下,有机酸通过与石英表面相互作用,导致 $\text{Si}-\text{O}-\text{Si}$ 键易断裂,从而引发石英溶蚀。钟大康和朱筱敏等^[9]认为塔里木盆地的石英溶蚀与古油藏破坏产生的有机酸有关,各种脂族酸、芳香酸、羧基酸和酮酸等一元或多元有机酸通过与 SiO_2 络合导致石英的溶蚀;于雯泉等^[5]结合苏北盆地金湖凹陷储层石英溶蚀特征,通过溶蚀模拟实验发现,在酸性条件下, H^+ 离子会连接在 $\text{Si}-\text{O}-\text{Si}$ 的桥氧上,攻击石英表面的硅氧键,降低石英溶蚀反应的活化能,从而加速溶蚀过程;万友利等^[10]认为在地层中存在有机酸(如草酸和柠檬酸)时,能够降低石英颗粒和次生加大边表面的 H_4SiO_4 浓度,从而促进石英溶蚀。

前人研究塔里木盆地石英溶蚀成因时指出,有机酸对石英的溶蚀作用强烈但局限^[9-10]。西湖凹陷平湖组作为自生自储的煤系地层,其酸性环境持续时间较长^[16],在该地层中发现了大量石英溶蚀现象,但这种在酸性环境下发生的石英溶蚀的类型、形成机制及其对储层的影响尚未明确。因此,本文选取研究区16口井的样品,通过重点分析碎屑组分、石英的溶蚀特征及其分布情况,明确石英溶蚀的类型、影响因素及其与成岩环境之间的关系,系统揭示该地区次生孔隙的成因机制,从而为西湖凹陷宝武地区平湖组优质储层优选提供依据,深化对储层的成因机制的理论认识。

1 地质概况

西湖凹陷位于东海陆架盆地的东北部,整体呈NNE向展布,面积约 $5.9 \times 10^4 \text{ km}^2$,是前古近系基底上发育的断陷盆地^[17]。古近系作为西湖凹陷重要的地层单元,既是烃源岩主要发育层位,也是油气主要富集层位^[18]。西湖凹陷构造演化经历了古新世—始新世断陷、渐新世—中新世拗陷和上新世—第四纪区域沉降3个阶段^[2-3,16,19]。根据边界特征和断裂活动差异,西湖凹陷西部斜坡带自北至南可划分为杭州斜坡带、平湖斜坡带和天台斜坡带。其中,平湖构造带作为中央富集区,目前勘探程度最高。平北斜坡带位于平湖构造带的北部,是目前斜坡带勘探程度最高的地区,也是西湖凹陷最富油气的有利区带之一。

研究区位于平湖斜坡带北部中段宝武地区,面积约为550 km²(图1a,b)。钻井揭示的地层序列显示,西湖凹陷沉积地层自下而上依次为始新统宝武组和平湖组,渐新统花港组,中新统龙井组、玉泉组和柳浪组,以及上新统三潭组和东海群^[1-2]。本次研究目的层为始新统平湖组。

平湖组为一套潮坪背景下发育的三角洲沉积,自下而上可划分为平(平湖组)下段下部、平下段上部、平中段和平上段(图1c)。平湖组沉积受频繁海进作用和海退作用影响,纵向上呈现砂、泥岩薄互层,砂体厚度较薄且不连续^[1-2]。岩性以深灰色粉砂质泥岩、黑色泥岩和浅灰色细-中砂岩为主,有利沉积微相包括砂坪、沿岸沙坝和障壁砂坝,埋藏深度为3 400~4 800 m^[16,19-21],通过分析研究区16口井的岩石薄片和全岩矿物X射线衍射数据,发现岩石类型以岩屑石英砂岩和长石岩屑砂

岩为主(平均含量为石英71.65%,长石8.85%,岩屑19.50%)。岩屑以变质岩岩屑(占比45.13%)和火成岩岩屑(占比33.64%)为主,成分成熟度均值为2.85,砂岩粒度以中-细砂为主(占比73.57%),颗粒磨圆度以次棱-次圆状为主。颗粒间主要呈线接触或凹凸-线接触,点-线接触较为少见。

2 实验样品与分析方法

系统分析914幅普通薄片、1 075幅铸体薄片和983幅扫描电镜图像,研究成岩矿物的晶体产状及其共生关系,全面解析矿物间的相互作用和成岩过程中石英溶蚀的特征、影响因素及其演化规律。通过选取代表性视域的石英、长石和岩屑颗粒薄片,统计颗粒的溶蚀比例,揭示其纵向演化规律。基于扫描电镜特

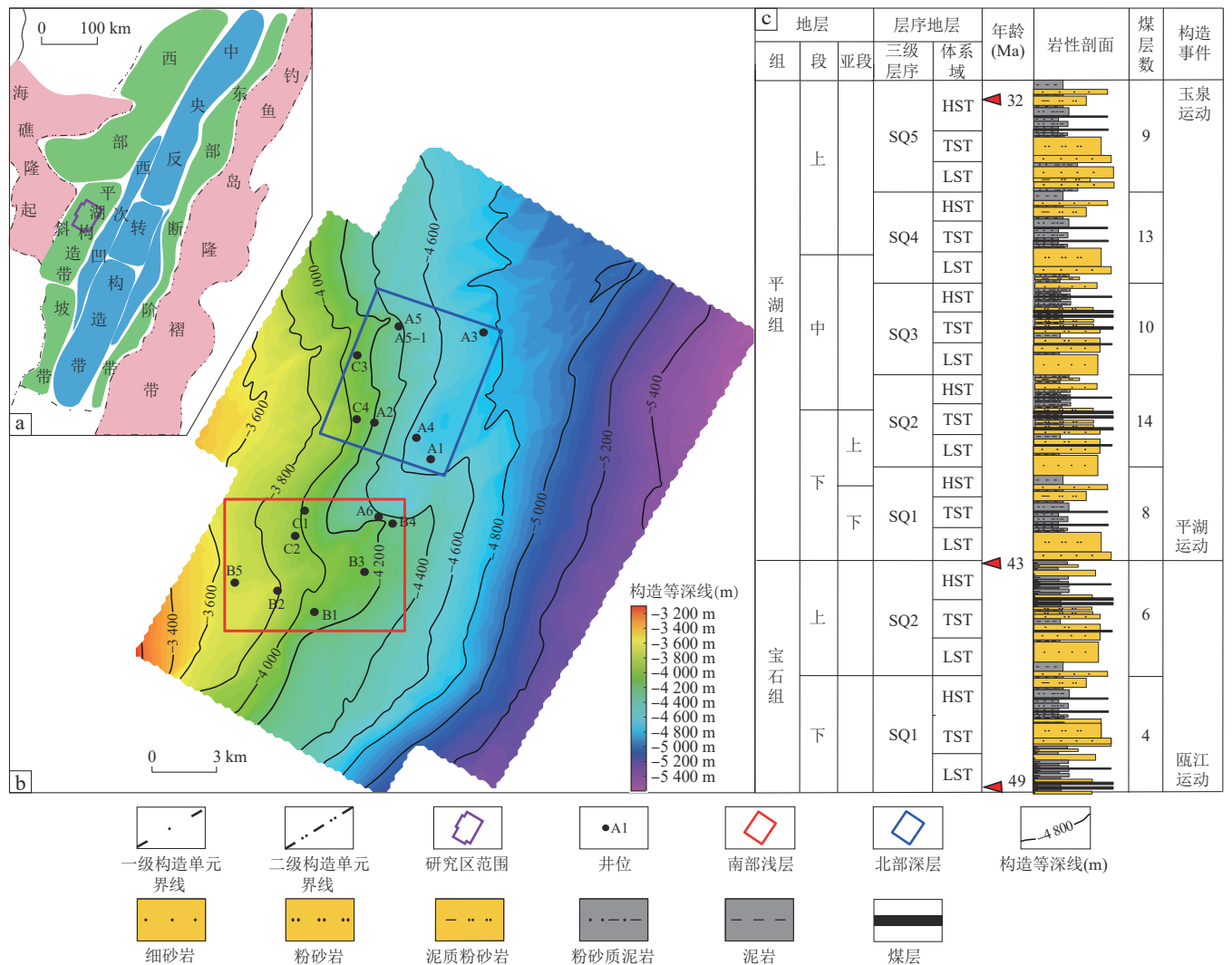


图1 东海陆架盆地西湖凹陷地质概况(据文献[22-23]修改)

Fig.1 Geological overview of the Xihu Sag, ECSSB (modified after references [22-23])

a. 区域构造位置;b. 平湖构造带T₄⁰(平湖组底部)构造等T₀图;c. 平湖组综合柱状图

征分析,解析石英扭曲面与溶蚀形貌的成因联系,建立增孔型溶蚀与交代型溶蚀的演化序列。基于重矿物组合分析,结合构造图与沉积相特征,综合判识物源属性,揭示环境中碱金属离子含量。结合X射线衍射、地球化学和流体数据,分析黏土和含铁碳酸盐矿物在纵向上的含量分布,确定生烃作用发育层段。通过矿物变化、溶蚀程度和烃类组成特征,推断成岩环境的酸碱演化过程。系统分析石英溶蚀形态分类及演化过程,揭示其成因机制、环境控制因素与储层效应。

3 石英溶蚀特征

3.1 石英溶蚀微观形貌

基于岩石薄片和扫描电镜分析,发现平湖斜坡带北部中段宝武地区的石英溶蚀现象普遍存在且形态多样(图2)。通过借鉴前人的研究成果^[4,9-10,24-26],本文系统总结该区域石英的微观溶蚀形态特征(表1),并在

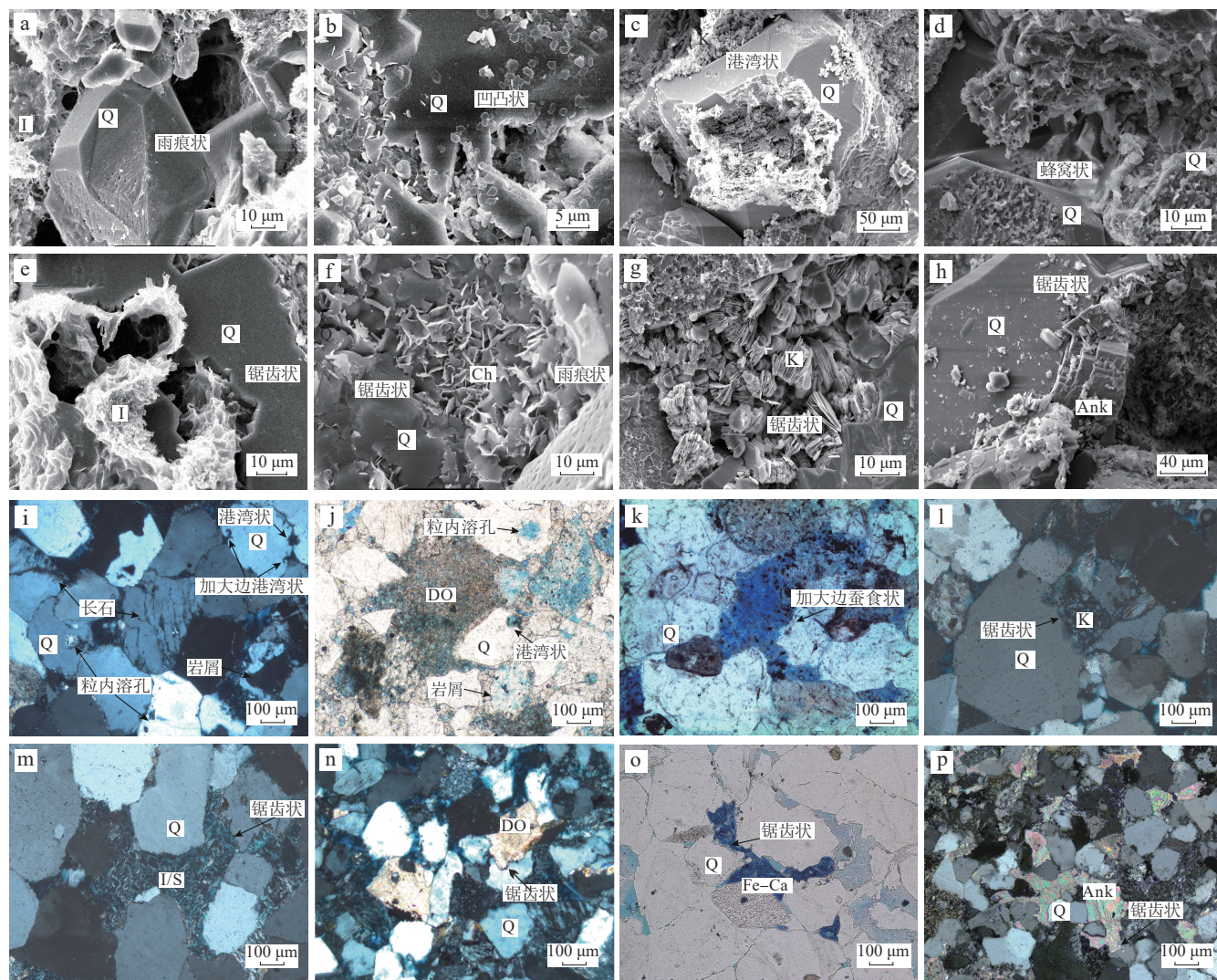


图2 西湖凹陷宝武地区平湖组石英镜下溶蚀特征照片

Fig. 2 Microscopic characteristics of quartz dissolution in the Pinghu Formation, Baowu area, Xihu Sag

a. 雨痕状溶蚀,埋深4 511.0 m,A3井,扫描电镜;b. 凹凸状溶蚀,埋深3 654.5 m,A3井,扫描电镜;c. 港湾状溶蚀,埋深4 122.0 m,A5-1井,扫描电镜;d. 蜂窝状溶蚀,埋深4 025.0 m,A5井,扫描电镜;e. 伊利石交代溶蚀,埋深4 054.4 m,A2井,扫描电镜;f. 绿泥石交代溶蚀,并见右下角雨痕状溶蚀,埋深4 565.0 m,A4井,扫描电镜;g. 高岭石交代溶蚀,埋深4 233.5 m,A5井,扫描电镜;h. 铁白云石交代溶蚀,埋深4 128.4 m,A5-1井,扫描电镜;i. 见长石、岩屑、石英及其次生加大边溶蚀,A4井,正交光,埋深4 327.0 m,铸体薄片;j. 岩屑溶蚀,石英粒内溶孔和港湾状溶蚀,埋深4 183.7 m,A1井,正交光,铸体薄片;k. 石英次生加大边呈蚕食状溶蚀,埋深4 206.3 m,B4井,单偏光,铸体薄片;l. 高岭石交代溶蚀,埋深4 161.0 m,A3井,正交光,铸体薄片;m. 自生伊蒙混层矿物交代溶蚀,埋深4 666.0 m,A3井,正交光,铸体薄片;n. 白云石交代溶蚀,埋深3 920.0 m,A5井,正交光,铸体薄片;o. 铁方解石交代溶蚀,埋深4 560.0 m,A4井,单偏光,铸体薄片;p. 铁白云石交代溶蚀,埋深4 254.0 m,A4井,正交光,普通薄片

Q. 石英;I. 伊利石;Ch. 绿泥石;K. 高岭石;DO. 白云石;Fe-Ca. 铁方解石;Ank. 铁白云石

表 1 西湖凹陷宝武地区平湖组石英溶蚀形态特征

Table 1 Quartz dissolution morphologies in the Pinghu Formation, Baowu area, Xihu Sag

形态特征	边界特征	特征描述	举例	溶蚀类型
雨痕状	边界光滑、清晰	扫描电镜下,石英颗粒表面存在许多溶蚀凹坑,呈雨痕状	图 2a	增孔型
凹凸状	边界光滑、清晰	扫描电镜下,石英颗粒溶蚀边界清晰,呈凹凸状	图 2b	增孔型
港湾状	边界清晰	偏光显微镜和扫描电镜下,石英及其加大边溶蚀边界清晰,呈港湾状	图 2c—e	增孔型
蜂窝状	边界清晰	扫描电镜下,石英颗粒边界清晰,呈蜂窝状	图 2d	增孔型
蚕食状	边缘模糊、不规则	偏光显微镜下,石英加大边溶蚀边界模糊不规则,呈蚕食状	图 2k	增孔型
粒内溶孔	颗粒内部溶蚀	偏光显微镜下,石英颗粒内部缺失	图 2j	增孔型
锯齿状	边界模糊	偏光显微镜和扫描电镜下,石英溶蚀边界参差,呈锯齿状	图 2e—h,l—p	交代型

已有分类的基础上^[27-33]进行了进一步整理和分类。

1) 增孔型溶蚀:石英晶体边界被溶蚀后直接增加孔隙空间的类型。研究区埋深 3 650 ~ 4 560 m 范围内均有分布(图 2a—d,f,i—k)。扫描电镜下观察到的溶蚀边界主要呈雨痕状(图 2a)、凹凸状(图 2b)、港湾状(图 2c)和蜂窝状(图 2d);偏光显微镜下观察到的溶蚀边界主要呈现港湾状(图 2i,j)、蚕食状(图 2k)和石英内部溶蚀形成粒内溶孔(图 2i,j)。

2) 交代型溶蚀:交代作用伴随原始矿物的部分或完全溶解,本文中,交代型溶蚀是指石英在成岩过程中被溶蚀后形成的空间被黏土矿物或碳酸盐矿物占据的现象。该过程使石英边界呈现模糊、不完整的特点,在镜下呈锯齿状^[27]。根据交代矿物类型,可进一步分为高岭石交代型溶蚀(图 2g,l)、伊利石交代型溶蚀(图 2e)、绿泥石交代型溶蚀(图 2f)和碳酸盐矿物交代型

溶蚀(图 2h,n—p)。其中,伊利石、绿泥石和含铁碳酸盐矿物的交代型溶蚀埋深普遍大于高岭石交代型溶蚀。

3.2 石英溶蚀量

研究区岩石类型以石英和长石为主,本文通过分析镜下普通薄片和铸体薄片,对储层中石英溶蚀量(溶蚀比例)进行计算。选取 45 幅代表性视域的石英颗粒照片,统计 60 个石英颗粒的溶蚀比例。通过连接港湾状、锯齿状或凹凸状溶蚀边界的两端,确定石英颗粒的原始边缘^[5](图 3),同时考虑粒间溶孔面积。通过计算原始边界与溶蚀后边界面积的比值,得出溶蚀量的平均值,并进一步计算最保守的石英溶蚀比例。

研究结果表明,发生溶蚀的石英颗粒中,溶蚀部分占颗粒面积的 1.97% ~ 15.64%(由于石英颗粒原始形态不规则,所测数据可能存在偏差),平均溶蚀比例为

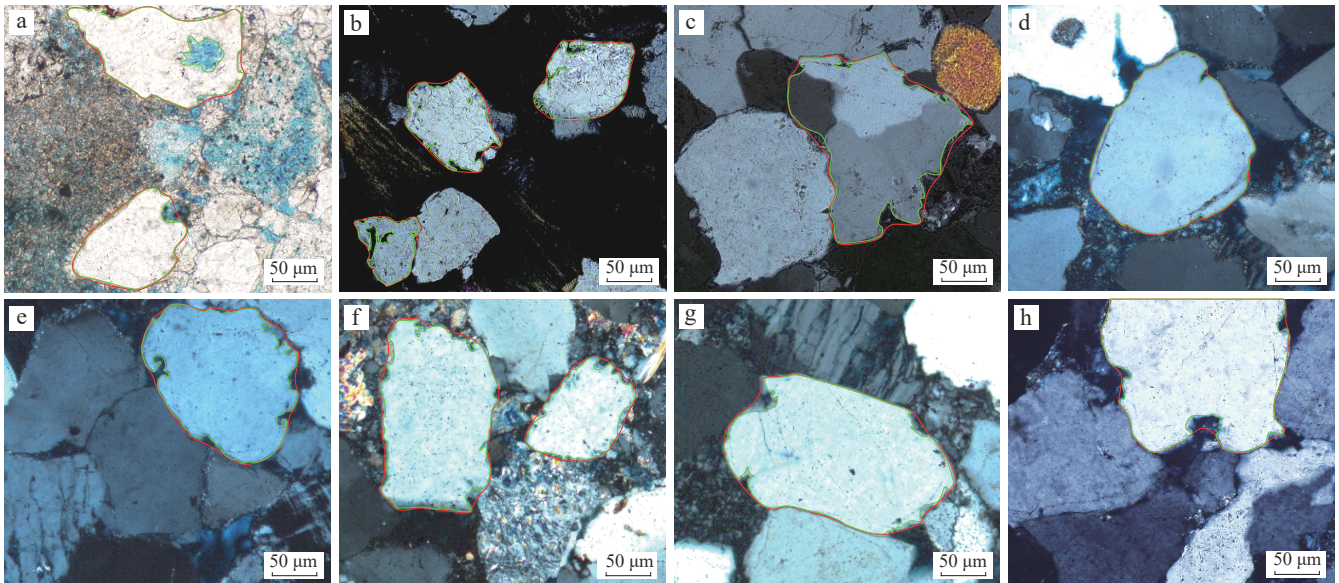


图 3 西湖凹陷宝武地区平湖组石英溶蚀量分析镜下照片(铸体薄片)

Fig. 3 Microscopic images showing quartz dissolution amount in the Pinghu Formation, Baowu area, Xihu Sag

a. 埋深 4 183.7 m, A1 井, 单偏光; b. 埋深 4 061.8 m, A2 井, 正交光; c. 埋深 4 160.0 m, A3 井, 正交光; d. 埋深 3 710.0 m, A4 井, 正交光; e. 埋深 4 327.0 m, A4 井, 正交光; f. 埋深 3 973.8 m, A5 井, 正交光; g. 埋深 4 127.2 m, A5-1 井, 正交光; h. 埋深 4 047.0 m, B4 井, 正交光
(图中红线为颗粒原始边缘界限; 绿线为颗粒溶蚀后界限。)

8.63%,其中埋深3 800 m以浅占比为5.11%,埋深3 800~4 200 m占比为9.04%,埋深4 200~4 450 m占比为7.75%,埋深4 450 m以深占比为11.24%(图4a)。通过总结116个薄片硅质胶结物的含量(图4b),发现硅质胶结物含量总体上随深度的增加而增加,在埋深4 200~4 400 m含量较高,而在埋深4 000~4 200 m和4 400 m以深含量有所减少。

基于上述数据,可推断石英的溶蚀程度依次为碱性环境>酸性环境>酸-碱过渡带>弱酸性环境,相较于酸-碱过渡带,酸性环境与碱性环境中石英溶蚀作用形成的次生孔隙更为发育;自生石英和次生加大边的溶蚀作用削弱了硅质胶结对储层的破坏作用。

4 石英溶蚀机制

Marley等^[34]通过激光拉曼光谱和傅立叶变换红外光谱实验证实,草酸可与硅酸中的硅络合生成草酸二氧化硅酯[反应式(1)],进而降低硅酸在水溶液中的浓度并加速 SiO_2 的溶解。Bennett等^[7]提出了有机酸阴离子对 SiO_2 的溶解和表面络合的模式:石英在有机酸环境中,有机酸的电荷向硅原子转移,使得末端 $\text{Si}-\text{O}-\text{H}$ 键更短、更强(图5c,红色短键),而 $\text{Si}-\text{O}-\text{Si}$ 键则被延长、削弱(图5c,蓝色长键),使其易被水解,形成二氧化硅-有机酸络合物。此外,石英溶蚀形成的 SiO_2 以

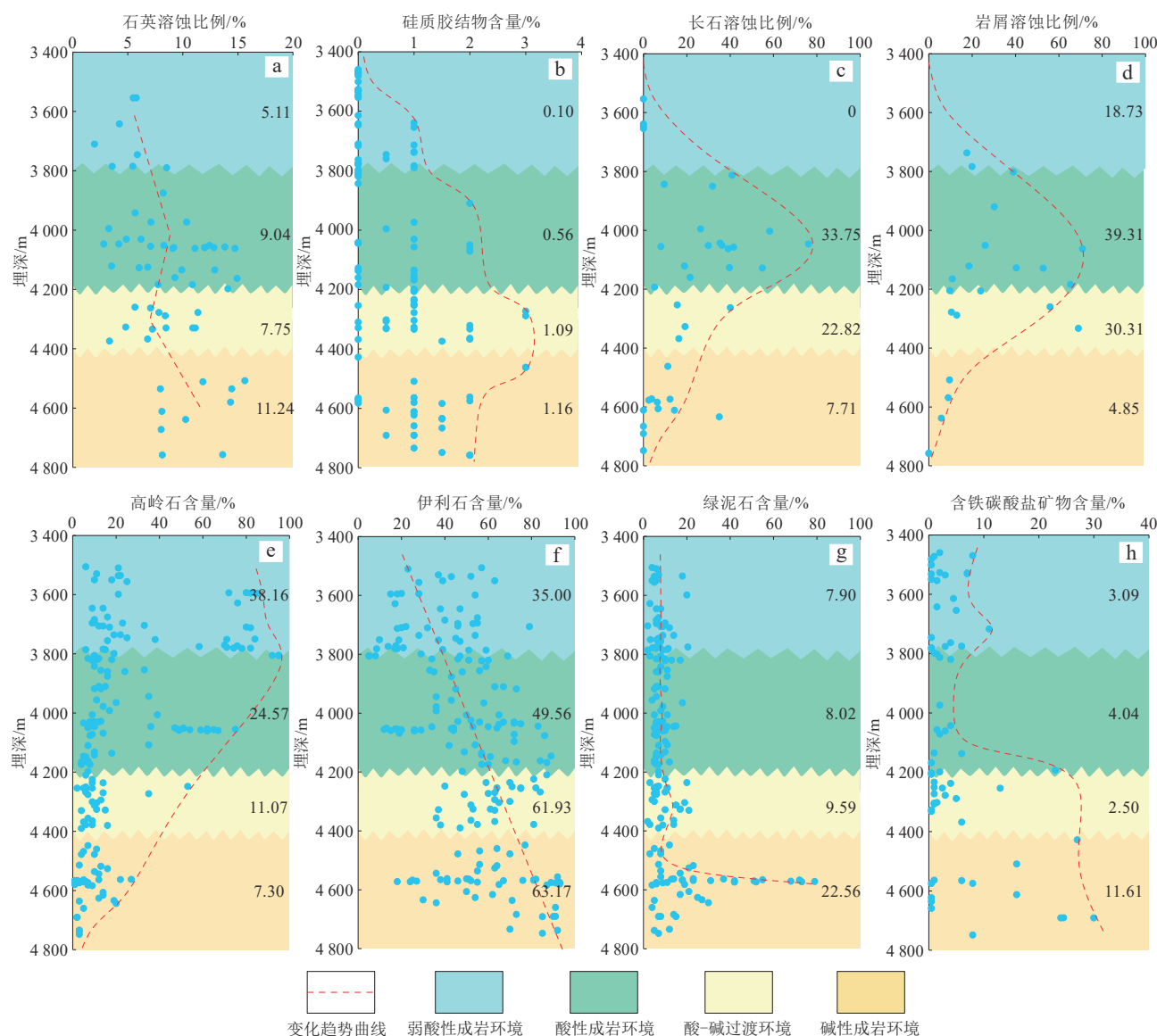


图4 西湖凹陷宝武地区平湖组不同矿物溶蚀-胶结作用垂向演化

Fig. 4 Vertical evolutions of the dissolution and cementation of varying minerals in the Pinghu Formation, Baowu area, Xihu Sag

a. 石英溶蚀比例; b. 硅质胶结物含量; c. 长石溶蚀比例; d. 岩屑溶蚀比例; e. 高岭石含量; f. 伊利石含量; g. 绿泥石含量; h. 含铁碳酸盐矿物含量
(图中数值代表不同成岩环境下相应特征参数的平均值。)

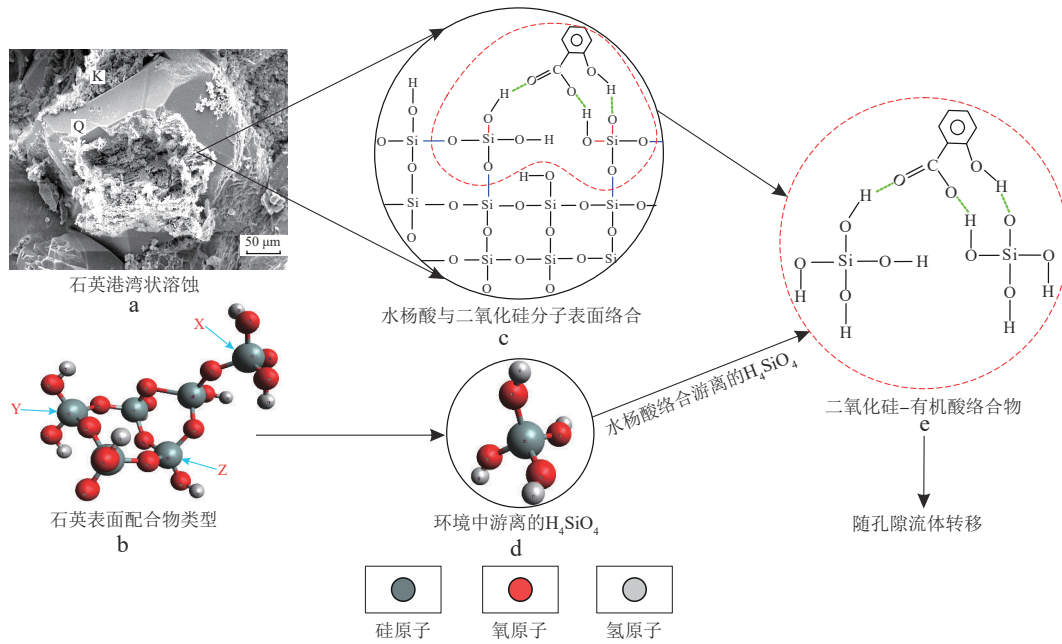


图5 水杨酸酯与二氧化硅分子形成络合物分子过程示意图(据文献[7]修改)

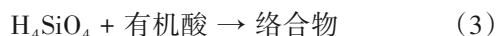
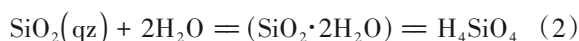
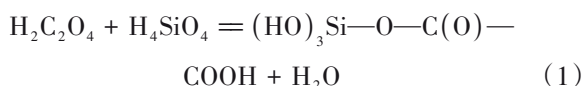
Fig. 5 Molecular structure diagrams showing the formation of salicylate-silica complexes (modified after reference [7])

a. 石英溶蚀特征扫描电镜照片;b. 石英表面配合物类型示意图;c. 水杨酸与石英表面反应分子结构示意图;d. 环境中游离的二氧化硅分子结构示意图;e. 二氧化硅-水杨酸络合物分子结构示意图

X. $-Si(OH)_3$; Y. $=Si(OH)_2$; Z. $\equiv Si(OH)$

H_4SiO_4 分子的形式向孔隙水扩散[反应式(2)](图5d), 有机酸的 H^+ 离子连接到 $Si-O-Si$ 的桥氧上形成二氧化硅-有机酸络合物(图5e)。这些络合物随着孔隙流体转移,降低了环境中游离 H_4SiO_4 的浓度^[5-7,27,35-36],使石英能够继续分解,即反应(3)向右进行,从而促使反应(2)向右进行,最终提高石英的溶解速率。

酸性环境下,石英溶蚀由有机酸络合反应主导[反应式(2)和反应式(3)],而碱性环境下则直接与 OH^- 离子反应生成 $HSiO_3^-$ 离子[反应式(4)],随着 OH^- 离子含量的增加,反应向右进行^[11,37]。石英溶蚀形成的 SiO_2 以 H_4SiO_4 分子的形式向孔隙水扩散,由于孔隙水中的 Ca^{2+} 和 HCO_3^- 离子浓度高于 H_4SiO_4 ,因浓度差引发扩散而导致碳酸盐矿物对石英颗粒发生交代型溶蚀^[4]。有机酸被裂解破坏生成大量 CO_3^{2-} 离子,伊利石和绿泥石在富含 CO_3^{2-} 离子孔隙水中可游离出 K_2CO_3 ,形成的局部强碱环境能加速石英溶蚀,且溶蚀形成的 SiO_2 可通过黏土矿物扩散转移^[2,29],从而发生伊利石和绿泥石交代型溶蚀。



式中:qz为石英;aq为溶液状态;l为液体;s为固体。

5 成岩酸性环境和碱性环境演化特征

通过统计分析西湖凹陷宝武地区11口井的平湖组烃源岩数据,发现在埋深4 400 m以浅的地层存在多个煤层作为烃源岩,其干酪根类型主要为 II_2 型,具有较高的总有机碳含量(TOC)和镜质体反射率(R_o),已达到生烃门槛^[38-39](表2)。有机质逐渐成熟后,生烃作用产生大量油气和大量富含 CO_2 以及有机酸的酸性

表2 西湖凹陷宝武地区平湖组埋深4 400 m以浅深度段11口井烃源岩有机地化数据统计

Table 2 Statistics of source rock parameters in 11 wells at depths less than 4 400 m in the Pinghu Formation, Baowu area, Xihu Sag

井号	埋深/m	样品类型	干酪根类型	TOC/%	R_o /%
A5-1	4 130.0	煤	II_2 型	7.73	0.63
A5-1	4 130.2	煤	II_2 型	2.86	0.63
C2	4 035.0	煤	II_2 型	46.40	0.60
A3	4 453.5	煤	II_2 型	2.31	0.78
A4	3 975.0	煤	II_2 型	2.80	0.64
B5	3 800.0	泥岩	II_2 型	21.99	0.55
A2	3 966.0	煤	III型	60.70	0.60
A5	4 341.5	煤	II_2 型	5.28	0.63

流体^[40-42]。这些酸性流体排驱进入储层,导致成岩环境向酸性转变。平湖组储层呈“三明治”式结构(泥岩中间夹砂岩),有利于有机酸快速进入储层,进而引发长石和岩屑等铝硅酸盐的强烈溶蚀^[16,43-46]。镜下薄片分析显示,研究区长石和岩屑等矿物的溶蚀现象普遍存在,主要发育粒内溶孔(图6)。通过统计计算长石和岩屑溶蚀部分面积与颗粒原有面积的比值,得出长石(图4c)和岩屑(图4d)的溶蚀比例。统计结果显示,长石和岩屑在埋深3 800~4 200 m深度段溶蚀程度较高,在埋深3 800 m以浅深度段和4 400 m以深深度段

溶蚀程度较低。

随着埋深增加,地层气/油比增大,凝析气大量生成。参考《凝析油气藏划分标准》(SY/T6168—1995),埋深4 000 m以深的地层主要发育高含凝析油型和特高含凝析油型两类凝析气藏(图7)。随着埋深增加,烃源岩中有机质被破坏,酸性孔隙流体逐渐向碱性转化^[2]。

黏土矿物组合的纵向分布受成岩环境控制。其中,高岭石与长石的蚀变发育于酸性的流体环境^[45-50];伊利石和绿泥石则是由高岭石转化而成,发育于碱性

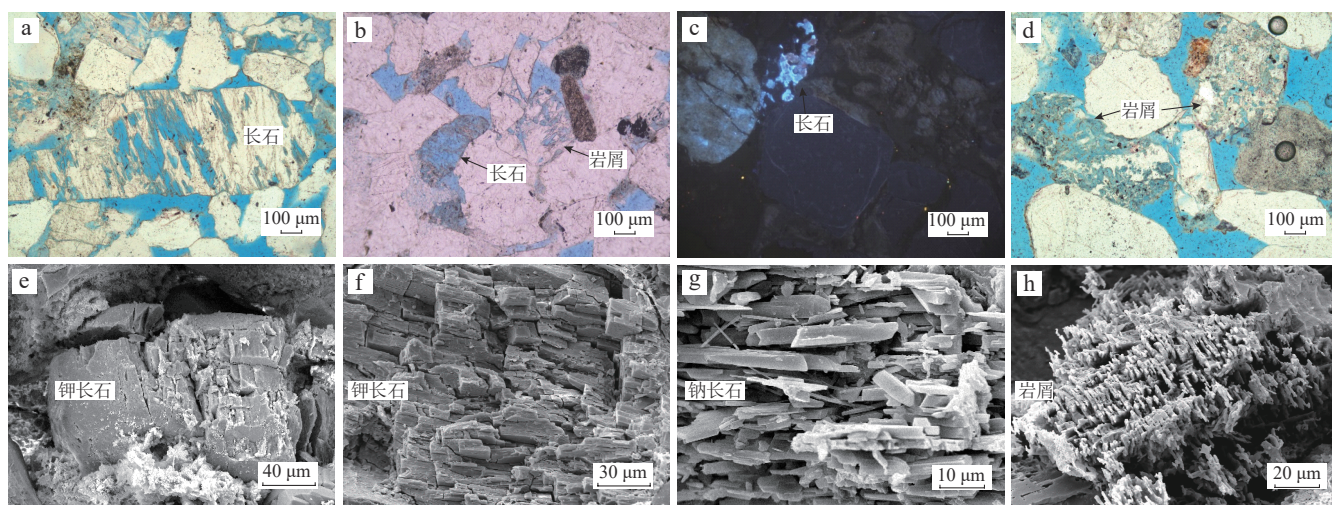


图6 西湖凹陷宝武地区平湖组长石及岩屑溶蚀镜下特征照片

Fig. 6 Microscopic characteristics of feldspar and lithic dissolution in the Pinghu Formation, Baowu area, Xihu Sag

a. 长石溶蚀形成粒内溶孔,埋深3 850.0 m, A5-1井,单偏光,铸体薄片;b. 长石溶蚀形成粒内溶孔,埋深4 051.2 m, A2井,单偏光,铸体薄片;c. 长石溶蚀,残余部分发亮蓝色光,埋深3 624.0 m, A5井,阴极发光,铸体薄片;d. 岩屑溶蚀形成粒内溶孔,埋深4 128.8 m, A5-1井,单偏光,铸体薄片;e. 钾长石沿解理溶蚀,埋深4 123.0 m, A5-1井,扫描电镜;f. 钾长石沿解理溶蚀,埋深4 307.0 m, A4井,扫描电镜;g. 钠长石淋滤溶蚀,埋深3 481.0 m, A2井,扫描电镜;h. 岩屑溶蚀形成次生孔,埋深4 374.0 m, A1井,扫描电镜

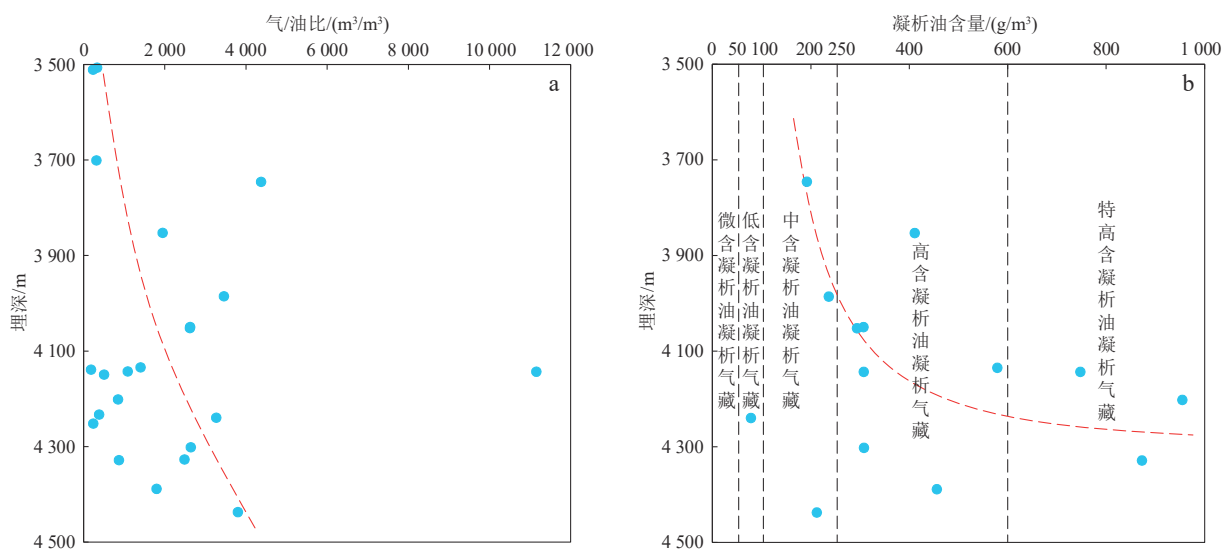


图7 西湖凹陷宝武地区平湖组气/油比(a)与凝析油含量(b)随埋深的变化

Fig. 7 Gas-to-oil ratio (a) and gas condensate content (b) varying with depth in the Pinghu Formation, Baowu area, Xihu Sag

环境^[26,51-52]。此外,含铁碳酸盐矿物由有机酸裂解破坏生成的 CO_3^{2-} 离子与孔隙介质中的 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 和 Fe^{2+} 等碱性离子相结合形成^[2],其规模出现标志着成岩环境转变为碱性。X射线衍射统计数据(图4e—h)表明,埋深4 200 m以浅深度段的高岭石含量较多,伊利石、绿泥石和含铁碳酸盐矿物含量较少;埋深4 400 m以深深度段则呈现相反的特征。研究区南部受宝云亭隆起(图1b,红色框)的影响,地形抬升导致平湖组埋深较浅,使得其酸碱转换带相较于北部(图1b,蓝色框)的深度较浅(图8),这种差异导致储层质量呈现明显的南北分异。

通过总结研究区平湖组不同深度的成岩现象规

律,可判断该区成岩环境大致经历了从浅到深的弱酸性、酸性、酸-碱过渡到碱性的演化过程(图9)。具体而言,大致上埋深3 800 m以浅为弱酸环境,埋深3 800~4 200 m为酸性环境,埋深4 200~4 400 m为酸-碱过渡阶段,埋深4 400 m以深为碱性环境。

6 石英溶蚀影响因素

6.1 温度与pH值

在酸性溶液实验条件下,石英颗粒表面仅在温度超过200 °C时发生微弱溶蚀^[27]。根据埋藏史和地温演

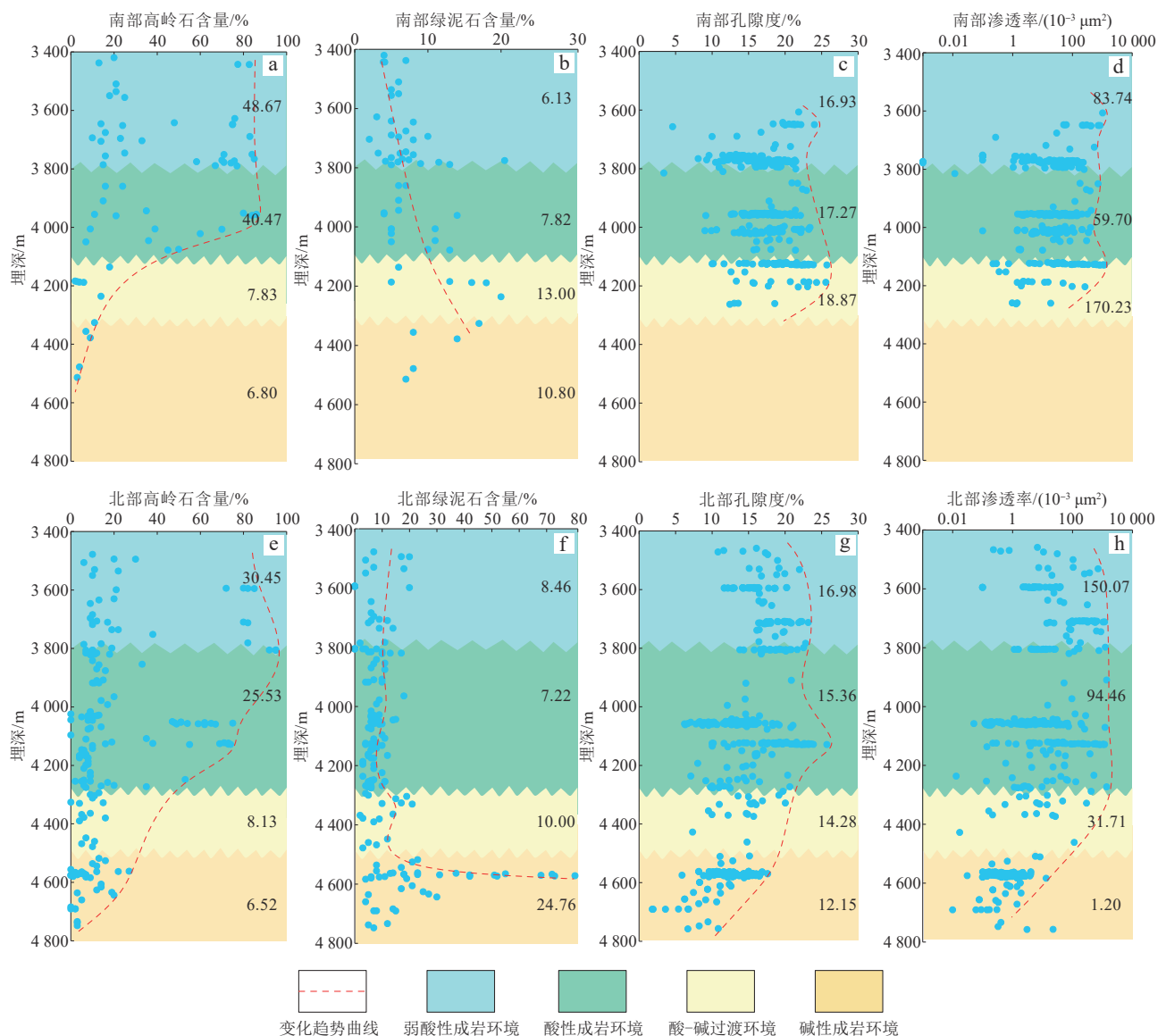


图8 西湖凹陷宝武地区南部与北部黏土矿物含量和储层质量垂向演化

Fig. 8 Vertical evolutions of clay mineral content and reservoir quality in the southern and northern Baowu area, Xihu Sag

a. 南部高岭石含量; b. 南部绿泥石含量; c. 南部孔隙度; d. 南部渗透率; e. 北部高岭石含量; f. 北部绿泥石含量; g. 北部孔隙度; h. 北部渗透率
(图中数值代表不同成岩环境下相应特征参数的平均值。)

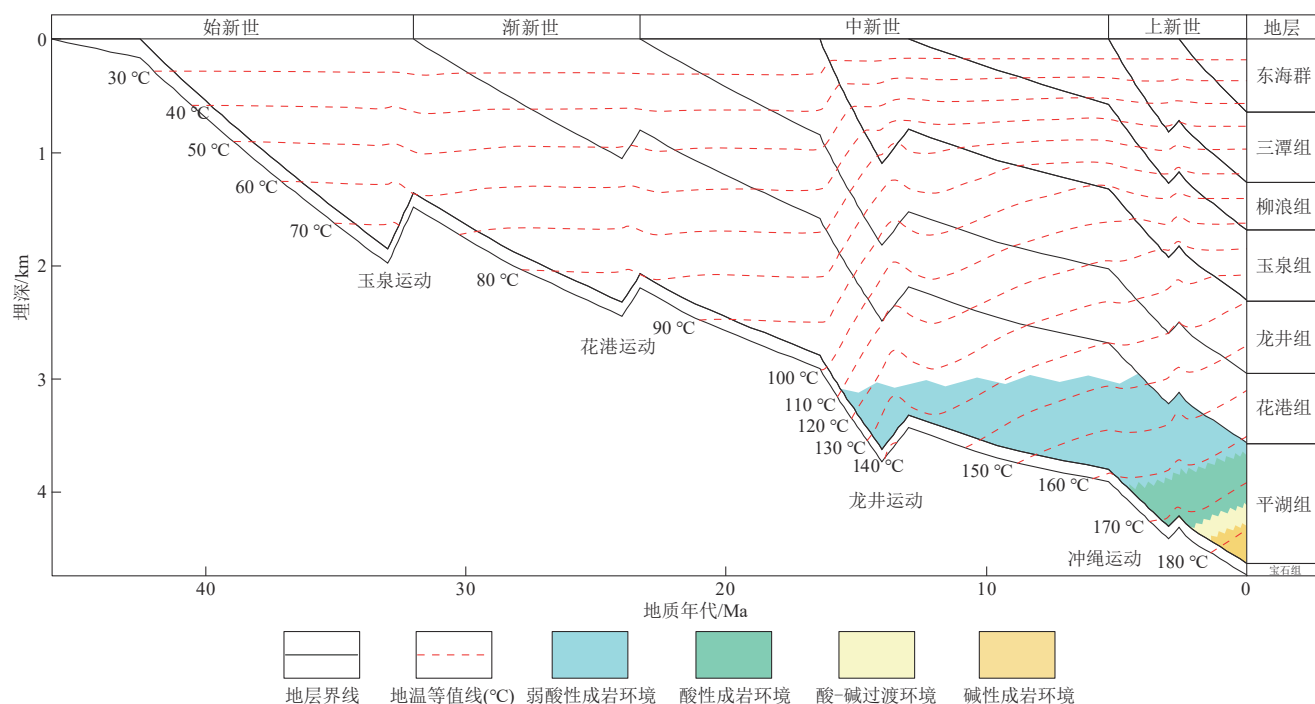


图9 西湖凹陷宝武地区平湖组埋藏史与成岩环境划分

Fig. 9 Burial history and diagenetic environment division of the Pinghu Formation, Baowu area, Xihu Sag

化史(图9)的恢复结果^[53],计算出研究区地温范围一般为120~185℃,低于200℃。因此,在仅受温度影响的情况下,该区酸性环境中的石英难以发生溶蚀作用。

在碱性环境中,Harvey Blatt等认为SiO₂的溶解度随着pH值和温度的升高而增大,当pH值大于9.8、温度大于25℃时,石英将发生溶解^[54]。陈修和曲希玉等通过对石英水热实验研究证实,在碱性条件下,石英晶体比在酸性条件下更易溶解,且所需温度更低,故石英溶蚀速率随温度和pH值的增大而升高^[27-28,55]。

6.2 碱金属离子

于雯泉等通过溶蚀模拟实验发现,在有机酸(草酸)存在的条件下,加入Fe³⁺离子会使石英发生“盐效应”,导致Si—O—Si键易断裂(反应4),降低反应所需的活化能,从而增强石英溶蚀作用^[5]。这一结果证实了石英的溶解速率与吸附在Si—O表面上的阳离子数量呈正相关,即碱金属离子含量越高,石英溶蚀速率越大;Dove等^[56]的实验证明,石英在电解质溶液中的溶解速率比在纯水中提升30~100倍,表明碱金属离子的存在能够增加石英的溶蚀速率。

由于不同构造背景的母岩被风化后,经搬运和沉积作用所形成的碎屑岩具有特定的沉积地球化学特征^[57-58],环境中碱金属离子含量受物源母岩类型影响。重矿物组合分析方法是识别物源类型研究的理论基

础。锆石、电气石、金红石、磷灰石和云母代表来自酸性岩浆岩母源的重矿物组合;赤褐铁矿、白钛矿、磁铁矿、锐钛矿和角闪石属于中-基性岩浆岩母源的重矿物组合;石榴石来源于变质岩母源^[59-60]。通过统计分析重矿物含量和组合特征,并结合沉积相图(图10a)及构造图(图1b)等资料,本文对研究区平湖组的物源进行了分析。统计结果(图10b,c)表明,研究区物源除广泛发育的变质石英岩母岩(占比45.01%)外,还有来自于凹陷西部的海礁隆起的中-基性岩浆岩母岩(占比33.53%),同时也包括少量临近海礁隆起的酸性岩浆岩母岩(占比21.46%)^[17,59-62]。变质岩母岩和中-基性岩浆岩母岩中富含铁、铝矿物,导致成岩环境中Fe³⁺、Fe²⁺和Al³⁺离子的含量较大;长石和岩屑等铝硅酸盐矿物在酸性环境中的大量溶蚀释放出大量的Al³⁺离子;此外,黏土矿物的转化及其脱水作用使成岩环境中主要赋存H⁺、K⁺、Fe³⁺、Si⁴⁺和Al³⁺等离子。以B4井为例,Al和Fe元素占比分别为13%和5%。

在埋深4 200 m以浅地层,富含的铁离子(特别是Fe³⁺离子)可降低石英溶蚀反应活化能^[62],促进有机酸和石英的络合反应,释放出更多的H⁺离子[反应式(5)]。同时,铝离子水解生成H⁺离子[反应式(6)]^[61-63]。上述反应增加了H⁺离子的浓度,进一步增强了环境的酸性,促进石英和其他矿物的溶蚀。储层中大量发育的高岭石具有较大的孔隙比表面积和良好的吸附性能^[64],使周

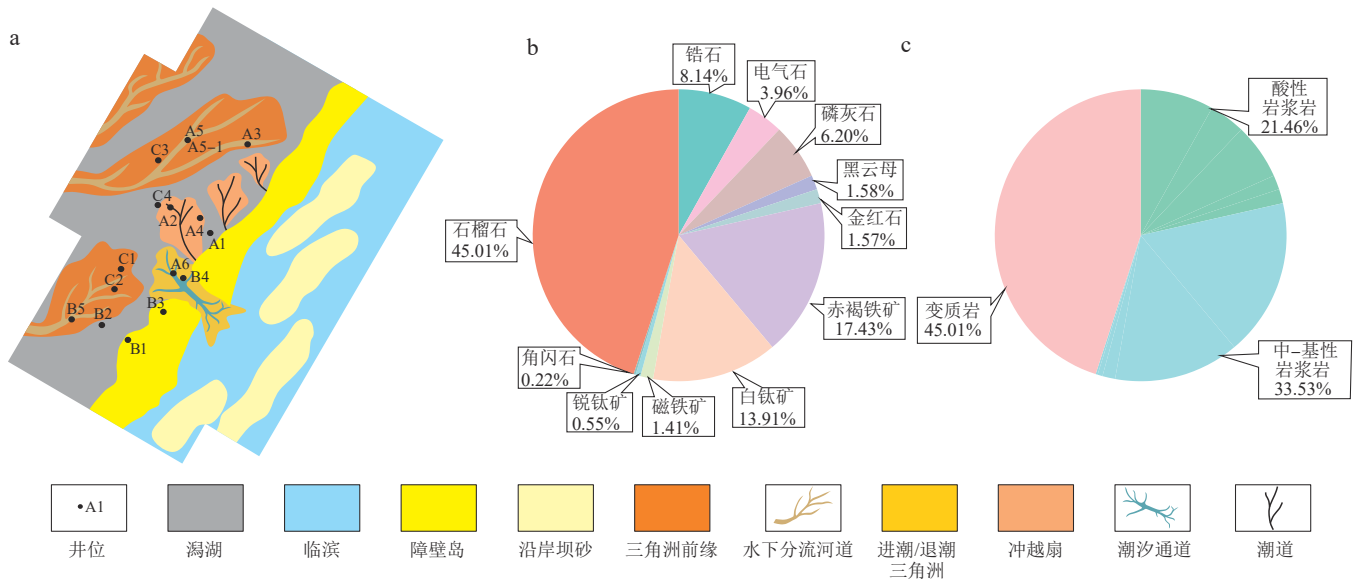


图10 西湖凹陷宝武地区平湖组重矿物组成分析

Fig. 10 Heavy mineral analysis of the Pinghu Formation, Baowu area, Xihu Sag

a. SQ1高位域沉积相平面图; b. 重矿物含量占比; c. 物源母岩类型占比

围碱金属离子浓度更高,更易发生交代溶蚀。

在埋深4 400 m以深,储层中伊利石、绿泥石和含铁碳酸盐矿物大量存在。伊利石和绿泥石的形成需要大量 K^+ 、 Fe^{2+} 和 Mg^{2+} 等碱金属离子^[65],且含铁碳酸盐胶结物的大量出现也表明该区富含 Fe^{2+} 离子。伊利石和绿泥石具有较强的吸附性,能够吸附大量上述碱金属离子,并在富含 CO_3^{2-} 离子孔隙水中游离出 K_2CO_3 ,形成的局部强碱环境加速石英溶蚀,导致石英边界发生强烈交代溶蚀^[2,29]。

6.3 晶体缺陷与表面结构

根据Kossel晶体理论,晶体生长过程中能出现3种晶面:平坦面(F面)、阶梯面(S面)和扭曲面(K面)。石英的结构单元是硅氧四面体,配位数为4,理想的石英晶面表面的四面体通过1~3个键(图5b中X—Z)同其他硅氧四面体相连。仅1个键(图5b中X)连接的硅氧四面体非常不稳定,因此石英主要包括F面和K面,缺少S面^[28]。石英表面存在单配位和双配位的氧原子,单配位氧原子可通过吸附 H^+ 离子达到电荷平衡,形成 $Si-OH$ 表面基团。综上,石英表面主要存在两种表面配合物:($=Si(OH)_2$)(图5b中Y)和($\equiv Si-OH$)(图5b中Z)连接的 SiO_2 四面体,双配位的溶解速度明显高于三配位的配合物,即石英的K面相对于F面更易被溶蚀^[66-67]。在乙酸(pH=3)的实验条件下,发现石英首先在表面的裂纹和缝隙处开始溶蚀(288 h),随后石英的边角、裂纹和断口处进一步溶蚀(960 h)^[68]。因此,石英的角和边缘

上的溶蚀更易发生。

扫描电镜观察结合矿物晶体学分析发现,晶体的边角(图11a,b)、晶体发育缺陷(图11c,d)和因外界因素导致的晶面条纹(图11e)、断口(图11f,g)及裂纹(图11h)等部位,晶体K面的数量多,石英溶蚀最为明显。受晶体K面的影响,溶蚀表现为港湾状、凹凸状、晶体缺陷和粒内溶孔等形态。相比之下,F面较难溶蚀,随着溶蚀作用加强,F面溶蚀首先形成溶孔较浅的雨痕状,发展为溶孔较深的蜂窝状^[28],进一步发展导致石英颗粒部分缺失(图11b—d)。

此外,长石-石英复合矿物中石英的溶蚀速率与溶解度显著高于单一石英体系,表明长石的存在可显著促进石英溶解^[68]。宝武地区平湖组长石平均含量为8.85%,对石英溶蚀起一定促进作用。

7 成岩序列与石英溶蚀演化

根据平湖斜坡带北部中段宝武地区平湖组11口的勘探井资料分析统计,该地区 R_o 分布范围为0.49%~1.18%,平均值为0.62%;最高热解峰温(T_{max})主要分布范围为425.00~455.00℃,平均值为435.54℃;未见蒙脱石,伊/蒙混层(I/S)中的蒙脱石(S)占比主要分布范围为5.00%~50.00%,平均值为24.05%。参考《碎屑岩成岩阶段划分标准》(SY/T 5477—2003),判断宝武地区平湖组成岩演化阶段处于中成岩阶段A—B期(图12)。

增孔型溶蚀最先发生于晶体K面(图12a),而后发生于F面。F面的溶蚀首先表现为雨痕状溶蚀(图12b)。随着石英溶蚀程度的增大,雨痕状溶蚀逐渐发展为蜂窝状溶蚀(图12c),最后会出现石英颗粒部分缺失(图12d)。增孔型溶蚀仅表现为溶蚀程度差异,虽然在酸性环境和碱性环境均可发生,但对成岩环境的判别意义有限。相比之下,交代型溶蚀可通过交代矿物的不同判断溶蚀环境,具有环境指示意义。在中成岩阶段A期,随着有机酸含量增加,在大量碱金属离子和高岭石作用下,发生高岭石交代溶蚀(图12e)。在中成岩阶段B期,平湖组储层进入碱性环境,碳酸盐矿物、伊利石和绿泥石交代型溶蚀大量发育(图12f—h)。因此,研究区石英溶蚀演化可归纳为以下两个序列。

1) 增孔型溶蚀演化(根据石英的溶蚀程度由弱到强):K面溶蚀、F面(雨痕状)溶蚀、F面(蜂窝状)溶蚀和石英颗粒部分缺失;

2) 交代型溶蚀演化(根据交代的矿物类型由浅到深):高岭石交代溶蚀、碳酸盐矿物交代溶蚀、伊利石交代溶蚀和绿泥石交代溶蚀。

8 石英溶蚀对储层的影响

石英的增孔型溶蚀能够直接增加储层的有效孔隙空间,改善储层的孔隙结构和渗透性;石英的交代型溶蚀通过与其他矿物的交代过程影响孔隙结构,其对储层的影响取决于交代矿物的类型。此外,石英交代型溶蚀的矿物类型可作为判断成岩环境酸碱性的重要指示,对储层质量评价具有指示意义。

1) 在酸性流体作用下,长石和岩屑的剧烈溶蚀主要形成粒内溶孔(图6),显著增加储层孔隙度。由于平湖组埋深普遍大于3 500 m,压实作用较强,颗粒之间主要呈线接触或凹凸—线接触^[69-71],故长石和岩屑溶蚀形成的粒内溶孔对储层的渗透性影响较为局限。然而,石英颗粒边缘溶蚀可形成大量的粒缘溶孔和溶缝^[29],能够有效沟通粒内溶孔,从而增加储层渗透率,改善孔隙结构。

2) 石英的溶蚀与沉淀是一个动态平衡的过程,受环境封闭性、温度和pH值等因素影响。宝武地区平湖组位于盖层厚度高值区且断层断距较小,断—盖配置垂向封闭性较好^[72],加之纵向砂体薄且不连续,整体储层处于封闭环境。因此,矿物溶蚀产生的次生矿物很难向外运移,石英溶蚀程度随反应时间的增加而增强,直至达到溶蚀—沉淀动态平衡^[68]。石英次生加大

及自生石英的硅质来源,除石英自身的溶蚀和压溶作用外,还包括长石等铝硅酸盐矿物的溶蚀,以及高岭石向伊利石的转化等过程^[73-76]。虽然上述硅质沉淀所形成的次生加大及自生石英能占据孔隙空间、破坏孔隙,但石英的溶蚀能够降低硅质胶结对储层的破坏程度,且溶蚀后的孔隙难以被其他物质充填,从而提供一定的油气储集空间。根据石英的溶蚀程度和硅质胶结物的含量(图5a,b)可知,酸性环境和碱性环境下的石英溶蚀对储层具有显著改善作用,而酸—碱过渡带则效果相反。

3) 晚期伊利石、绿泥石和含铁碳酸盐矿物大量形成,并在碱性环境下稳定存在,降低储层质量。但是,黏土矿物交代溶蚀石英后,其占据的孔隙空间相较于石英原来占据的空间有所减少,反而能释放出部分储集空间,利于储层建设。相比之下,含铁碳酸盐矿物交代溶蚀石英所占据的空间基本不变,对储层质量变化影响较小^[29]。

9 结论

1) 平湖斜坡带北部中段宝武地区平湖组的成岩环境表现出弱酸性、酸性、酸—碱过渡和碱性的演化特征,且石英溶蚀现象普遍存在。根据溶蚀边界特征,总体可划分为交代型溶蚀和增孔型溶蚀2种类型。其中,高岭石交代型溶蚀是在碱金属离子作用下有机酸溶蚀的结果;伊利石、绿泥石和碳酸盐矿物交代型溶蚀则是碱性溶蚀的结果。因此,交代型溶蚀的交代矿物类型可作为判断成岩环境的重要指标。增孔型溶蚀在酸性和碱性环境中均可发生。

2) 石英在酸性环境与碱性环境中的溶蚀机制存在显著差异。地形差异通过影响成岩环境演化的深度,从而间接影响石英的溶蚀。酸性环境下,石英在碱金属离子作用下与有机酸络合形成络合物导致溶蚀;碱性环境下,石英直接与OH⁻离子反应生成HSiO₃⁻离子而发生溶蚀。石英溶蚀程度与晶体K面的数量、温度和碱金属离子含量呈正相关,且不同环境下的溶蚀程度为碱性环境>酸性环境>酸—碱过渡带>弱酸性成岩环境。石英的溶蚀与沉淀是一个动态平衡的过程,酸性与碱性环境下石英的溶蚀作用为主导,对储层的建设性效应强于沉淀破坏,酸—碱过渡带则反之。

3) 研究区石英增孔型溶蚀的演化序列为K面溶蚀—雨痕状溶蚀—蜂窝状溶蚀—石英颗粒部分缺失;交代型溶蚀的演化序列为高岭石交代溶蚀—碳酸盐矿物交代溶蚀—伊利石交代溶蚀—绿泥石交代溶蚀。

4) 石英的粒缘溶蚀有助于增加储层的渗透率,改善孔隙结构;自生石英及次生加大边的溶蚀能降低硅质胶结对储层的破坏作用;碳酸盐交代溶蚀对储层影响较小;黏土矿物交代溶蚀石英颗粒形成的粒间及晶间溶孔对储层贡献较大。

参 考 文 献

- [1] 李盛谦, 曾澍辉, 刘亚洲, 等. 东海盆地西湖凹陷孔雀亭地区古近系平湖组储层成岩作用及孔隙演化[J]. 岩性油气藏, 2023, 35(5): 49-61.
LI Shengqian, ZENG Jianhui, LIU Yazhou, et al. Reservoir diagenesis and pore evolution of Paleogene Pinghu Formation in Kongqueying area of Xihu Sag, East China Sea Basin [J]. Lithologic Reservoirs, 2023, 35(5): 49-61.
- [2] 肖晓光, 侯国伟, 张武, 等. 西湖凹陷平湖组低渗储层成岩环境及孔隙演化[J]. 海相油气地质, 2021, 26(1): 60-70.
XIAO Xiaoguang, HOU Guowei, ZHANG Wu, et al. Diagenetic environment and pore evolution of the low permeability reservoir of Pinghu Formation in Xihu Sag [J]. Marine Origin Petroleum Geology, 2021, 26(1): 60-70.
- [3] 李志远, 黄志龙, 马崇林, 等. 西湖凹陷西次凹平湖组储层质量控制因素与孔隙演化[J]. 中国海上油气, 2023, 35(5): 47-60.
LI Zhiyuan, HUANG Zhilong, MA Chonglin, et al. Reservoir quality control factors and pore evolution of Pinghu Formation in the western sub-sag of Xihu Sag [J]. China Offshore Oil and Gas, 2023, 35(5): 47-60.
- [4] 郑宇超, 林小兵, 刘莉萍, 等. 石英颗粒边界溶蚀类型特征及成因探讨[J/OL]. 沉积学报: 1-18 [2024-12-01]. <https://doi.org/10.14027/j.issn.1000-0550.2023.103>.
ZHENG Yuchao, LIN Xiaobing, LIU Liping, et al. Discussion of the characteristics and causes of different types of quartz grain boundary dissolution [J/OL]. Acta Sedimentologica Sinica: 1-18 [2024-12-01]. <https://doi.org/10.14027/j.issn.1000-0550.2023.103>.
- [5] 于雯泉, 陈勇, 杨立干, 等. 酸性环境致密砂岩储层石英的溶蚀作用[J]. 石油学报, 2014, 35(2): 286-293.
YU Wenquan, CHEN Yong, YANG Ligan, et al. Dissolution of quartz in tight sandstone reservoirs in an acidic environment [J]. Acta Petrolei Sinica, 2014, 35(2): 286-293.
- [6] NANGIA S, GARRISON B J. Reaction rates and dissolution mechanisms of quartz as a function of pH [J]. The Journal of Physical Chemistry A, 2008, 112(10): 2027-2033.
- [7] BENNETT P C, MELCER M E, SIEGEL D I, et al. The dissolution of quartz in dilute aqueous solutions of organic acids at 25 °C [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1988, 52(6): 1521-1530.
- [8] 赵立平, 李祖兵, 付亮亮, 等. 鄂尔多斯盆地苏75区块中部盒8段储层特征及主控因素[J]. 断块油气田, 2025, 32(1): 88-95.
ZHAO Liping, LI Zubing, FU Liangliang, et al. Characteristics and main controlling factors of He 8 Member reservoir in the middle of Block Su 75, Ordos Basin [J]. Fault-Block Oil and Gas Field, 2025, 32(1): 88-95.
- [9] 钟大康, 朱筱敏, 周新源, 等. 初论塔里木盆地砂岩储层中SiO₂的溶蚀类型及其机理[J]. 地质科学, 2007, 42(2): 403-414.
ZHONG Dakang, ZHU Xiaomin, ZHOU Xinyuan, et al. An approach to categories and mechanisms of SiO₂ dissolution in sandstone reservoirs in the Tarim Basin [J]. Geoscience, 2007, 42(2): 403-414.
- [10] 万友利, 丁晓琪, 白晓亮, 等. 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[J]. 沉积学报, 2014, 32(1): 138-147.
WAN Youli, DING Xiaoqi, BAI Xiaoliang, et al. Quartz dissolution causes and influencing factors in the Silurian marine clastic reservoir rocks in central Tarim Basin [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2014, 32(1): 138-147.
- [11] 张思亭, 刘耘. 石英溶解机理的研究进展[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2009, 28(3): 294-300.
ZHANG Siting, LIU Yun. Progress review of quartz dissolution models [J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2009, 28(3): 294-300.
- [12] 邱隆伟, 徐宁宁, 周涌沂, 等. 鄂尔多斯盆地大牛地地区致密砂岩石英溶解作用及其对优质储集层的影响[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2015, 34(1): 38-44.
QIU Longwei, XU Ningning, ZHOU Yongyi, et al. Dissolution of quartz in tight sandstones of the Daniudi area, Ordos Basin, and its influence to high quality reservoirs [J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2015, 34(1): 38-44.
- [13] 邱隆伟, 潘耀. 柯克亚凝析气田石英的溶解现象及其成因[J]. 矿物学报, 2005, 25(2): 183-190.
QIU Longwei, PAN Yao. A study on direct dissolution of quartz and its genesis in the kekeya gas condensate [J]. Acta Mineralogica Sinica, 2005, 25(2): 183-190.
- [14] 邱隆伟, 姜在兴, 操应长, 等. 泌阳凹陷碱性成岩作用及其对储层的影响[J]. 中国科学: 地球科学, 2001, 31(9): 752-759.
QIU Longwei, JIANG Zaixing, CAO Yingchang, et al. Alkaline diagenesis of the Yuyang Depression and its effect on reservoirs [J]. Science China Earth Sciences, 2001, 31(9): 752-759.
- [15] 张胜斌, 王琪, 李小燕, 等. 川中南河包场须家河组砂岩沉积-成岩作用[J]. 石油学报, 2009, 30(2): 225-231.
ZHANG Shengbin, WANG Qi, LI Xiaoyan, et al. Depositional-diagenetic coupling complex of Xujiache sandstone in Hebaochang Block in the south part of the Central Sichuan Basin [J]. Acta Petrolei Sinica, 2009, 30(2): 225-231.
- [16] 肖晓光. 西湖凹陷深层有效储层形成机理及深度下限研究[J]. 高校地质学报, 2023, 29(4): 630-643.
XIAO Xiaoguang. Study on genetic mechanism and lower limit of

- deep effective reservoirs in the Xihu sag[J]. *Geological Journal of China Universities*, 2023, 29(4): 630–643.
- [17] 徐波, 胡碧瑶, 顾智鹏, 等. 西湖凹陷平湖斜坡带平湖组微量元素和稀土元素地球化学特征及其地质意义[J]. *西安石油大学学报(自然科学版)*, 2021, 36(2): 28–37, 49.
- XU Bo, HU Biyao, GU Zhipeng, et al. Geochemical characteristics of trace elements and rare earth elements of Pinghu Formation in Pinghu slope belt of Xihu Sag and their geological significance[J]. *Journal of Xi'an Shiyou University (Natural Science Edition)*, 2021, 36(2): 28–37, 49.
- [18] 蔡华, 秦兰芝, 刘英辉. 西湖凹陷平北斜坡带海陆过渡相源-汇系统差异性及其耦合模式[J]. *地球科学*, 2019, 44(3): 880–897.
- CAI Hua, QIN Lanzhi, LIU Yinghui. Differentiation and coupling model of source-to-sink systems with transitional facies in Pingbei slope of Xihu Sag[J]. *Earth Science*, 2019, 44(3): 880–897.
- [19] 余浪, 余一欣, 蒋一鸣, 等. 东海陆架盆地西湖凹陷天台斜坡构造变换带发育特征及形成机理[J]. *石油与天然气地质*, 2023, 44(3): 753–763.
- YU Lang, YU Yixin, JIANG Yiming, et al. Characteristics and forming mechanisms of transform zone in the Tiantai slope, Xihu Sag, East China Sea Shelf Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2023, 44(3): 753–763.
- [20] 许婷. 东海盆地西湖凹陷油气成藏系统分析[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2014.
- XU Ting. Hydrocarbon accumulation system analysis in Xihu depression, East China Sea Basin[D]. Beijing: China University of Geosciences(Beijing), 2014.
- [21] 徐东浩, 秦兰芝, 李帅, 等. 西湖凹陷平北斜坡平湖组潮坪环境砂体沉积模式及控制因素[J]. *中国海上油气*, 2024, 36(5): 57–67.
- XU Donghao, QIN Lanzhi, LI Shuai, et al. Sedimentary models and controlling factors of sand bodies in tidal flat environment of Pinghu Formation on Pingbei Slope of Xihu Sag [J]. *China Offshore Oil and Gas*, 2024, 36(5): 57–67.
- [22] 赵洪, 蒋一鸣, 常吟善, 等. 西湖凹陷平湖组基于沉积相标志的沉积特征研究[J]. *上海国土资源*, 2018, 39(1): 88–92.
- ZHAO Hong, JIANG Yiming, CHANG Yinshan, et al. Study on sedimentary characteristics of the Pinghu Formation based on sedimentary facies markers in Xihu Sag, East China Sea Basin [J]. *Shanghai Land & Resources*, 2018, 39(1): 88–92.
- [23] 赵谦. 东海陆架盆地西湖凹陷西部斜坡带平湖组潮河联控沉积体系研究[D]. 武汉: 中国地质大学(武汉), 2022.
- ZHAO Qian. Tidal and river joint-dominated sedimentary system analysis of the Pinghu Formation in the west slope belt of Xihu Depression, East China Sea Shelf Basin [D]. Wuhan: China University of Geosciences (Wuhan), 2022.
- [24] 田夏荷, 屈红军, 刘新社, 等. 鄂尔多斯盆地东部上古生界致密气储层石英溶蚀及其机理探讨[J]. *天然气地球科学*, 2016, 27(11): 2005–2012, 2069.
- TIAN Xiahe, QU Hongjun, LIU Xinshe, et al. Discussion on quartz dissolution and its mechanisms of the Upper Paleozoic tight gas reservoirs in the eastern Ordos Basin [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2016, 27(11): 2005–2012, 2069.
- [25] 田建锋, 喻建, 张志国. 砂岩中碱性溶蚀研究进展[J]. *地质科技通报*, 2022, 41(5): 83–93, 100.
- TIAN Jianfeng, YU Jian, ZHANG Zhiguo. Advance in alkaline dissolution of sandstone [J]. *Bulletin of Geological Science and Technology*, 2022, 41(5): 83–93, 100.
- [26] 曹天宇, 钟大康, 牛胜利, 等. 惠州凹陷东部珠海组储层碱性成岩作用及孔隙演化[J]. *沉积学报*, 2020, 38(6): 1327–1337.
- CAO Tianyu, ZHONG Dakang, NIU Shengli, et al. Alkaline diagenesis and porosity evolution of Zhuhai formation reservoirs in eastern Huizhou Sag[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2020, 38(6): 1327–1337.
- [27] 曲希玉, 陈修, 邱隆伟, 等. 石英溶解型次生孔隙的成因及其对储层的影响——以大牛地气田上古生界致密砂岩储层为例[J]. *石油与天然气地质*, 2015, 36(5): 804–813.
- QU Xiyu, CHEN Xiu, QIU Longwei, et al. Genesis of secondary pore of quartz dissolution type and its influences on reservoir: Taking the tight sandstone reservoir in the Upper Paleozoic of Daniudi Gas Field as an example[J]. *Oil & Gas Geology*, 2015, 36(5): 804–813.
- [28] 陈修. 大牛地气田上古生界致密砂岩储层石英溶解作用及对储层质量的影响[D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2016.
- CHEN Xiu. Quartz dissolution and its influence on reservoir quality in the Upper Paleozoic tight sandstone reservoir of Daniudi Gas Field [D]. Qingdao: China University of Petroleum (East China), 2016.
- [29] 刘金库, 彭军, 石岩, 等. 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[J]. *石油学报*, 2015, 36(9): 1090–1097.
- LIU Jinku, PENG Jun, SHI Yan, et al. 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 [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2015, 36(9): 1090–1097.
- [30] 韩登林, 李忠, 李维锋. 库车坳陷白垩系砂岩储层石英溶蚀非均质性特征及其主控因素[J]. *地质学报*, 2011, 85(2): 256–261.
- HAN Denglin, LI Zhong, LI Weifeng. Heterogeneous features of quartz grain dissolution of Cretaceous sandstone reservoir in the Kuqa Depression and its major controlling factors [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2011, 85(2): 256–261.
- [31] 张英男, 白青林, 束青林, 等. 鄂尔多斯盆地西南缘浅埋藏储层致密化成因[J]. *中国石油大学学报(自然科学版)*, 2024, 48(2): 24–36.
- ZHANG Yingnan, BAI Qinglin, SHU Qinglin, et al. Mechanism of tight sandstone reservoirs with shallow burial in southwest of Ordos Basin [J]. *Journal of China University of Petroleum*

- (Edition of Natural Science), 2024, 48(2): 24–36.
- [32] 高彦杰, 甘军, 胡潜伟, 等. 琼东南盆地深水西区梅山组储层成岩-孔隙协同演化机制[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2024, 54(6): 2014–2028.
- GAO Yanjie, GAN Jun, HU Qianwei, et al. Reservoir diagenesis-pore co-evolution mechanism of Meishan Formation in deepwater west zone of Qiongdongnan Basin[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2024, 54(6): 2014–2028.
- [33] 远光辉, 彭光荣, 张丽丽, 等. 珠江口盆地白云凹陷古近系深层高变温背景下储层成岩作用与低渗致密化机制[J]. 石油与天然气地质, 2024, 45(1): 44–64.
- YUAN Guanghui, PENG Guangrong, ZHANG Lili, et al. Diagenesis and low-permeability tightening mechanisms of the deep Paleogene reservoirs under high temperature and highly variable geothermal gradients in the Baiyun Sag, Pearl River Mouth Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2024, 45(1): 44–64.
- [34] MARLEY N A, BENNETT P, JANECKY D R, et al. Spectroscopic evidence for organic diacid complexation with dissolved silica in aqueous systems—I. Oxalic acid[J]. Organic Geochemistry, 1989, 14(5): 525–528.
- [35] BLAKE R E, WALTER L M. Kinetics of feldspar and quartz dissolution at 70–80 °C and near-neutral pH: Effects of organic acids and NaCl[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1999, 63(13/14): 2043–2059.
- [36] DOVE P M. The dissolution kinetics of quartz in aqueous mixed cation solutions[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1999, 63(22): 3715–3727.
- [37] 张生, 李统锦. 石英溶解动力学研究进展[J]. 世界地质, 1996, 15(4): 8–13.
- ZHANG Sheng, LI Tongjin. Research advance in dissolution kinetics of quartz[J]. World Geology, 1996, 15(4): 8–13.
- [38] 王威, 刘珠江, 魏富彬, 等. 川东北地区二叠系大隆组页岩储层特征及其主控因素[J]. 石油与天然气地质, 2024, 45(5): 1355–1367.
- WANG Wei, LIU Zhujiang, WEI Fubin, et al. Characteristics and determinants of shale reservoir development in the Permian Dalong Formation, northeastern Sichuan Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2024, 45(5): 1355–1367.
- [39] 朱筱敏, 王晓琳, 张美洲, 等. 中国典型陆相盆地细粒沉积环境和岩相特征[J]. 石油与天然气地质, 2024, 45(4): 873–892.
- ZHU Xiaomin, WANG Xiaolin, ZHANG Meizhou, et al. Sedimentary environments and lithofacies characteristics of fine-grained sediments in typical continental basins in China[J]. Oil & Gas Geology, 2024, 45(4): 873–892.
- [40] 秦德超, 汤济广, 胡美玲, 等. 渤海湾盆地南堡凹陷沙河街组一段泥页岩微观孔隙特征及其主控因素[J]. 大庆石油地质与开发, 2023, 42(5): 47–56.
- QIN Dechao, TANG Jiguang, HU Meiling, et al. Micro-pore characteristics and its main controlling factors of shale in Sha 1 Member of Shahejie Formation in Nanpu Sag of Bohai Bay Basin [J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2023, 42(5): 47–56.
- [41] 韦敏, 于世娜, 佟欢, 等. 济阳拗陷桩海地区碎屑岩优质储层特征及成因机制[J]. 特种油气藏, 2024, 31(3): 27–36.
- WEI Min, YU Shina, TONG Huan, et al. Characteristics and genesis mechanism of high-quality clastic reservoirs in Zhuanghai area of Jiyang Depression [J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2024, 31(3): 27–36.
- [42] 陈鑫, 钟建华, 袁静, 等. 渤南洼陷深层碎屑岩储集层中的黏土矿物特征及油气意义[J]. 石油学报, 2009, 30(2): 201–207.
- CHEN Xin, ZHONG Jianhua, YUAN Jing, et al. Characteristics of clay mineral and its hydrocarbon significance in Paleogene clastic reservoir of Bonan Sag[J]. Acta Petrolei Sinica, 2009, 30(2): 201–207.
- [43] 窦立荣, 侯读杰, 程顶胜, 等. 高酸值原油的成因与分布[J]. 石油学报, 2007, 28(1): 8–13.
- DOU Lirong, HOU Dujie, CHENG Dingsheng, et al. Origin and distribution of high-acidity oils[J]. Acta Petrolei Sinica, 2007, 28(1): 8–13.
- [44] 郇晓勇, 王春梅, 王庆东, 等. 西湖凹陷古近系砂岩储层有机酸溶解作用机制探讨[J]. 内蒙古石油化工, 2007(11): 252–255.
- GAO Xiaoyong, WANG Chunmei, WANG Qingdong, et al. The discuss about organic acid dissolution of sandstone reservoirs of Paleogene strata in Xihu Sag [J]. Inner Mongolia Petrochemical Industry, 2007(11): 252–255.
- [45] 阮壮, 徐睿, 王杰, 等. 柴达木盆地马海东地区古近系砂岩储层微观孔隙结构特征及微观致密区成因[J]. 石油与天然气地质, 2024, 45(4): 1032–1045.
- RUAN Zhuang, XU Rui, WANG Jie, et al. Micro-pore structure characteristics of the Paleogene sandstone reservoirs and genesis of microscopic tight zones in the Mahaidong area, Qaidam Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2024, 45(4): 1032–1045.
- [46] 张晓丽, 王小娟, 张航, 等. 川东北五宝场地区侏罗系沙溪庙组储层特征及主控因素[J]. 岩性油气藏, 2024, 36(5): 87–98.
- ZHANG Xiaoli, WANG Xiaojuan, ZHANG Hang, et al. Reservoir characteristics and main controlling factors of Jurassic Shaximiao Formation in Wubaochang area, northeastern Sichuan Basin[J]. Lithologic Reservoirs, 2024, 36(5): 87–98.
- [47] 张迎朝, 邹玮, 陈忠云, 等. 东海陆架盆地西湖凹陷中央反转构造带古近系花港组气藏“先汇后聚”机制及地质意义[J]. 石油与天然气地质, 2023, 44(5): 1256–1269.
- ZHANG Yingzhao, ZOU Wei, CHEN Zhongyun, et al. The mechanism of “convergence ahead of accumulation” and its geological significance for gas reservoirs in Paleogene Huagang Formation across the central inverted structural zone of Xihu Depression, East China Sea Shelf Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2023, 44(5): 1256–1269.
- [48] 曹剑, 张义杰, 胡文瑄, 等. 油气储层自生高岭石发育特点及

- 其对物性的影响[J]. 矿物学报, 2005, 25(4): 367-373.
- CAO Jian, ZHANG Yijie, HU Wenxuan, et al. Developing characteristics of kaolinite in Central Junggar Basin and their effect on the reservoir quality [J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 2005, 25(4): 367-373.
- [49] 刘春锋, 蒋一鸣, 李宁, 等. 西湖凹陷西次凹古近系花港组—平湖组深层油气成藏过程[J]. 地质学报, 2024, 98(1): 231-246.
- LIU Chunfeng, JIANG Yiming, LI Ning, et al. Hydrocarbon accumulation process in the deep of Paleogene Huagang Formation and Pinghu Formation in the western subsag of Xihu Sag[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2024, 98(1): 231-246.
- [50] 张建培, 葛和平, 漆滨汶. 西湖凹陷砂岩自生高岭石发育特征及其对储层物性的影响[J]. 海洋石油, 2009, 29(1): 1-8.
- ZHANG Jianpei, GE Heping, QI Binwen. Characteristics of authigenic kaolinite in sandstones of Xihu Sag and its impact on reservoir physical properties [J]. *Offshore Oil*, 2009, 29(1): 1-8.
- [51] 刘金库, 彭军, 刘建军, 等. 绿泥石环边胶结物对致密砂岩孔隙的保存机制——以川中—川南过渡带包界地区须家河组储层为例[J]. 石油与天然气地质, 2009, 30(1): 53-58.
- LIU Jinku, PENG Jun, LIU Jianjun, et al. Pore-preserving mechanism of chlorite rims in tight sandstone—an example from the T_{3x} Formation of Baojie area in the transitional zone from the central to southern Sichuan Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2009, 30(1): 53-58.
- [52] 孟万斌, 吕正祥, 冯明石, 等. 致密砂岩自生伊利石的成因及其对相对优质储层发育的影响——以川西地区须四段储层为例[J]. 石油学报, 2011, 32(5): 783-790.
- MENG Wanbin, LYU Zhengxiang, FENG Mingshi, et al. The origin of authigenic illite in tight sandstones and its effect on the formation of relatively high-quality reservoirs: A case study on sandstones in the 4th member of Xujiache Formation, western Sichuan Basin [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2011, 32(5): 783-790.
- [53] 倪智勇, 张紫东, 李思澎, 等. 西湖凹陷平湖斜坡构造带油藏成藏期次厘定[J]. 石油科学通报, 2022, 7(3): 281-293.
- NI Zhiyong, ZHANG Zidong, LI Sipeng, et al. The oil accumulation period in the Pinghu slope tectonic belt of the Xihu Sag[J]. *Petroleum Science Bulletin*, 2022, 7(3): 281-293.
- [54] STEWART J H. Origin of sedimentary rocks. Harvey Blatt, Gerard Middleton, Raymond Murray[J]. *The Journal of Geology*, 1974, 82(6): 816-817.
- [55] 陈修, 曲希玉, 邱隆伟, 等. 石英溶解特征及机理的水热实验研究[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2015, 34(5): 1027-1033.
- CHEN Xiu, QU Xiyu, QIU Longwei, et al. Hydrothermal experiment research on characteristics and mechanisms of quartz dissolution [J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 2015, 34(5): 1027-1033.
- [56] DOVE P M, CRERAR D A. Kinetics of quartz dissolution in electrolyte solutions using a hydrothermal mixed flow reactor[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1990, 54(4): 955-969.
- [57] DAS B K, HAAKE B G. Geochemistry of Rewalsar Lake sediment, Lesser Himalaya, India: Implications for source-area weathering, provenance and tectonic setting [J]. *Geosciences Journal*, 2003, 7(4): 299-312.
- [58] BHATIA M R, CROOK K A W. Trace element characteristics of graywackes and tectonic setting discrimination of sedimentary basins[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1986, 92(2): 181-193.
- [59] 李宁, 汤睿, 赵洪, 等. 西湖凹陷平湖构造带物源特征分析[J]. 海洋石油, 2017, 37(2): 21-26.
- LI Ning, TANG Rui, ZHAO Hong, et al. Provenance characteristics of Pinghu tectonic zone in Xihu Sag [J]. *Offshore Oil*, 2017, 37(2): 21-26.
- [60] 吴栢锬, 李琦, 张迎朝, 等. 东海陆架盆地丽水凹陷古新统物源分析及地质意义[J]. 石油实验地质, 2023, 45(1): 122-134.
- WU Zhekun, LI Qi, ZHANG Yingzhao, et al. Provenance analysis and geological significance of Paleocene in Lishui Sag, East China Sea Shelf Basin [J]. *Petroleum Geology and Experiment*, 2023, 45(1): 122-134.
- [61] 何玉春, 何志斌, 李帅, 等. 基于成像测井的西湖凹陷古近系花港组及平湖组物源分析[J]. 地球物理学进展, 2024, 39(2): 839-850.
- HE Yuchun, HE Zhibin, LI Shuai, et al. Provenance analysis of Huagang Formation of central belt and Pinghu Formation of Pingbei area in Xihu Sag based on image logging[J]. *Progress in Geophysics*, 2024, 39(2): 839-850.
- [62] 苗清, 苗苗. 西湖凹陷平北地区平湖组岩浆岩物源条件分析[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2023, 43(11): 148-151.
- MIAO Qing, MIAO Miao. Analysis of source conditions of magmatic rocks of Pinghu Formation in Pingbei District, Xihu Depression [J]. *China Petroleum and Chemical Standard and Quality*, 2023, 43(11): 148-151.
- [63] 张生. 石英表面配合物与溶解动力学模型[J]. 地质地球化学, 1997, 25(4): 33-39.
- ZHANG Sheng. Quartz-surface complexes and kinetic models of dissolution[J]. *Geology-Geochemistry*, 1997, 25(4): 33-39.
- [64] 周东悦. 高岭石吸附Th(IV)的机理研究[D]. 抚州: 东华理工大学, 2021.
- ZHOU Dongyue. Study on mechanism of kaolinite adsorbing of Th(IV)[D]. Fuzhou: East China University of Technology, 2021.
- [65] 包书景, 何生. 泌阳凹陷地质流体对砂岩储集层中黏土矿物形成和分布的控制作用[J]. 地质科技情报, 2005, 24(2): 51-56.
- BAO Shujing, HE Sheng. Geofluids control of the formation and distribution of clay minerals within the sandstone reservoir in Biyang Depression [J]. *Bulletin of Geological Science and Technology*, 2005, 24(2): 51-56.
- [66] BERGER G, CADORE E, SCHOTT J, et al. Dissolution rate of

- quartz in lead and sodium electrolyte solutions between 25 and 300 °C: Effect of the nature of surface complexes and reaction affinity [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1994, 58(2): 541–551.
- [67] GAUTIER J M, OELKERS E H, SCHOTT J. Are quartz dissolution rates proportional to B.E.T. surface areas? [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2001, 65(7): 1059–1070.
- [68] 于海鹏. 长石和石英复合矿物溶蚀作用的数值模拟及动力学探究[D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2021.
- YU Haipeng. Numerical simulation and kinetic study on dissolution of feldspar and quartz complex minerals[D]. Qingdao: China University of Petroleum(East China), 2021.
- [69] WADOOD B, KHAN S, WAGREICH M, et al. Diagenetic history and porosity evolution of the Middle Permian clastic-carbonate mixed system, Indus Basin, Pakistan: Implications for reservoir development[J]. *Energy Geoscience*, 2024, 5(4): 100317.
- [70] 肖佃师, 郭雪赓, 王猛, 等. 砂岩夹层储层分级评价及展布特征——以松辽盆地长岭凹陷大情字井地区青山口组一段为例[J]. *油气藏评价与开发*, 2024, 14(5): 714–726, 740.
- XIAO Dianshi, GUO Xueyi, WANG Meng, et al. Classification evaluation and distribution characteristics of sandstone interlayer reservoirs: A case study of the first member of Qingshankou Formation in Daqingzijing area, Changling Sag, Songliao Basin [J]. *Petroleum Reservoir Evaluation and Development*, 2024, 14(5): 714–726, 740.
- [71] 张关龙, 王继远, 王斌, 等. 准噶尔盆地腹部深层—超深层碎屑岩储层发育特征与孔隙演化定量表征[J]. *石油实验地质*, 2023, 45(4): 620–631.
- ZHANG Guanlong, WANG Jiyuan, WANG Bin, et al. Development characteristics and quantitative characterization of pore evolution of deep and ultra-deep clastic reservoirs in the hinterland of the Junggar Basin [J]. *Petroleum Geology and Experiment*, 2023, 45(4): 620–631.
- [72] 郭刚, 苏圣民, 徐建永, 等. 东海盆地西湖凹陷平湖斜坡油气差异富集特征及主控因素[J/OL]. *石油实验地质*: 1–14[2024–12–01]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1151.TE.20241028.1725.002.html>.
- GUO Gang, SU Shengmin, XU Jianyong, et al. Differential characteristics and main controlling factors of hydrocarbon enrichment in Pinghu slope, Xihu Sag, East China Sea Basin[J/OL]. *Petroleum Geology & Experiment*: 1–14[2024–12–01]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1151.TE.20241028.1725.002.html>.
- [73] 庄建建. 东海西湖凹陷砂岩硅质胶结物成因机制探讨[J]. *海洋石油*, 2018, 38(1): 9–16.
- ZHUANG Jianjian. Discussion on the formation mechanism of siliceous cement in the sandstone of Xihu Sag East China Sea[J]. *Offshore Oil*, 2018, 38(1): 9–16.
- [74] 刘佳庚, 王艳忠, 操应长, 等. 渤海湾盆地东营凹陷民丰洼陷陡坡带深层—超深层碎屑岩优质储层控制因素[J]. *石油与天然气地质*, 2023, 44(5): 1203–1217.
- LIU Jiageng, WANG Yanzhong, CAO Yingchang, et al. Factors controlling the development of deep and ultra-deep coarse-grained siliciclastic reservoirs with high quality in the steep slope zone of the Minfeng sub-sag, Dongying Sag, Bohai Bay Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2023, 44(5): 1203–1217.
- [75] 章顺利, 杨映涛, 张玲, 等. 川西坳陷须二段次生石英形成机理及其对储集层物性的影响[J]. *新疆石油地质*, 2023, 44(1): 25–32.
- ZHANG Shunli, YANG Yingtao, ZHANG Ling, et al. Formation mechanism of secondary quartz and its influence on physical properties of Xu 2 member reservoir in western Sichuan Depression [J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 2023, 44(1): 25–32.
- [76] 田建锋, 高永利, 张蓬勃, 等. 鄂尔多斯盆地合水地区长7致密油储层伊利石成因[J]. *石油与天然气地质*, 2013, 34(5): 700–707.
- TIAN Jianfeng, GAO Yongli, ZHANG Pengbo, et al. Genesis of illite in Chang 7 tight oil reservoir in Heshui area, Ordos Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2013, 34(5): 700–707.

(编辑 王 迪)