文章编号:0253 - 9985(2023)03 - 0789 - 12 doi:10.11743/ogg20230320

准噶尔盆地博格达地区中二叠统芦草沟组热液硅质结核特征及页岩油意义

周家全[1,2],王 越[3],宋子怡[4],柳季廷[5],成赛男[3]

(1. 北京大学 地球与空间科学学院 造山带与地壳演化教育部重点实验室,北京 100871;2. 北京大学 石油与天然气研究中心,北京 100871;3. 中国石化 胜利油田分公司 勘探开发研究院,山东 东营 257015;4. 中海油研究总院有限责任公司,北京 100027;5. 中国石油 川庆钻探工程有限公司 井下作业公司,四川 成都 610066)

摘要:硅质岩已被广泛应用于重建古环境、示踪热液循环和硅化过程等方面,并且对陆相页岩油勘探开发具有重要意义。以准噶尔盆地博格达地区芦草沟组为研究对象,综合运用X射线衍射、元素面扫、主微量元素、镜质体反射率、岩石热解和总有机碳分析等方法对芦草沟组硅质岩成因机制及油气意义进行了研究。结果表明:芦草沟组硅质结核中软沉积物变形构造非常发育,主要由隐-微晶石英组成,指示结核为同沉积期形成。结核内部发育重晶石、锰菱铁矿、镍铁矿和蓝铜矿等热液矿物,并且稀土元素具有总量低、重稀土元素相对富集和正Eu异常等特征,指示其为热液成因,说明二叠纪研究区存在间歇性热液活动。热液带来的营养元素和金属阳离子提高了古生产力和古盐度,促使底水还原性增强,有利于有机质富集。硅质岩中孔隙和裂缝发育,其中显著富集的石英提高了储层脆性,有利于压裂改造。硅质岩伴生的热液活动参与了有机质生烃演化,使页岩油黏度降低,可动性增强,有利于页岩油开发。

关键词:硅质结核;热液;有机质;古沉积环境;页岩油;芦草沟组;准噶尔盆地

中图分类号:TE121.3 **文献标识码**:A

Characterizing hydrothermal siliceous nodules to guide shale oil exploration in the Middle Permian Lucaogou Formation, Bogda area, Junggar Basin

ZHOU Jiaquan[1,2], WANG Yue[3], SONG Ziyi[4], LIU Jiting[5], CHENG Sainan[3]

(1. *Key Laboratory of Orogenic Belts and Crustal Evolution, Ministry of Education, School of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing* 100871, *China*; 2. *Institute of Oil & Gas, Peking University, Beijing* 100871, *China*; 3. *Exploration and Development Research Institute, Shengli Oilfield Company, SINOPEC, Dongying, Shandong* 257015, *China*; 4. *CNOOC Research Institute Co., Ltd., Beijing* 100027, *China*; 5. *CCDC Downhole Service Company, PetroChina, Chengdu, Sichuan* 610066, *China*)

Abstract: Siliceous rocks are frequently included in reconstructing paleoenvironment, tracing hydrothermal circulation and understanding silicification process, aiming at using the results to guide the exploration and development of continental shale oil. Siliceous rock samples from the Lucaogou Formation in Bogda area, Junggar Basin, were observed through X-ray diffraction and scanning electron microscope and analyzed with major and trace elements, vitrinite reflectance, Rock-Eval and total organic carbon data to identify their genetic mechanisms and hydrocarbon significance. The results show that the siliceous nodules in the samples host highly-deformed soft-sediments mainly composed of crypto-microcrystalline silica, indicating a synsedimentary product. Hydrothermal minerals such as barite, mangano-siderite, trevorite and azurite are developed inside the nodules with low total content of rare earth elements and relative high content of heavy rare earth elements as well as positive Eu anomalies, all indicating a hydrothermal origin and intermittent hydrothermal activities in the Bogda area during the Permian. The nutrients and metal cations, brought by the hydrothermal fluid, improved the paleo-productivity and paleo-salinity, and enhanced the reducibility of the bottom water, which was conducive to the enrichment of organic matter. Well-developed pores and fractures with enriched quartz greatly improved the

收稿日期:2022-12-05;**修订日期**:2023-03-10。
第一作者简介:周家全(1993—),男,博士研究生,沉积地球化学。**E-mail**: jqzhou@pku.edu.cn。
基金项目:国家科技重大专项(2017ZX05008-001)。

brittleness of the rocks, making the reservoirs in the formation more responsive to fracturing. The hydrothermal activities associated with siliceous rocks participated in the evolution of hydrocarbon generation of organic matters, resulting in reduced crude viscosity and enhanced crude mobility which are conducive to shale oil development.

Key words: siliceous nodule, hydrothermal fluid, organic matter, ancient sedimentary setting, shale oil, Lucaogou Formation, Junggar Basin

引用格式:周家全,王越,宋子怡,等. 准噶尔盆地博格达地区中二叠统芦草沟组热液硅质结核特征及页岩油意义[J]. 石油与天然气地质,2023,44(3):789-800. DOI:10. 11743/ogg20230320.

ZHOU Jiaquan, WANG Yue, SONG Ziyi, et al. Characterizing hydrothermal siliceous nodules to guide shale oil exploration in the Middle Permian Lucaogou Formation, Bogda area, Junggar Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2023, 44(3): 789-800. DOI: 10. 11743/ogg20230320.

准噶尔盆地油气资源丰富[1],其中芦草沟组是盆地内重要的烃源岩层系[2],同时也是陆相页岩油勘探开发的重点层系[3]。芦草沟组具有混合沉积的特征[4],岩性复杂,陆源碎屑、火山-热液沉积物和碳酸盐矿物均有发育[5]。其中,硅质岩作为一类特殊的化学沉积岩在准噶尔盆地和邻区三塘湖盆地芦草沟组中广泛分布[6-7]。然而,硅质岩具有成因复杂且硅质来源多样等特征,在沉积期蒸发沉淀或生物诱导[8]、成岩期交代作用下均可形成,硅质来源主要包括陆源碎屑、生物硅和深源流体等[9]。目前,对于准噶尔盆地和三塘湖盆地二叠系硅质岩成因主要有以下几种认识:热液成因[10-11]、火山灰成因[12]、蒸发和生物诱导混合成因[8]、热液和碱湖蒸发混合成因[13]等。硅质来源和硅质岩沉积过程的复杂性增加了储层非均质性[14],进一步加大了页岩油勘探开发难度[15]。

硅质岩由于性质稳定、结构致密以及抗风化能力强等特点[9],已经被广泛应用于重建古沉积环境[16]、示踪古海洋热液循环及硅化过程[17]。二叠纪,全球很多国家或地区如北美、菲律宾、意大利和中国均发生了硅质沉积的显著富集,被称为二叠纪硅质沉积事件。因此,二叠系硅质岩研究具有全球对比意义。并且,硅质岩的发育常与优质烃源岩伴生,如四川盆地五峰组-龙马溪组[12],华南地区茅口组[18-19],准噶尔盆地风城组[8,11,13]和芦草沟组[10],以及三塘湖盆地芦草沟组[20]等。事实上,硅质岩发育对有机质富集[21]、页岩油气储集[22]和开发[14-15]等方面都具有重要意义,贯穿了页岩油“生烃—成藏—开发”的全部过程。

准噶尔盆地芦草沟组沉积于咸水湖相环境中[23-24],其中硅质岩发育,为陆相页岩中硅质岩成因机制及油气意义研究提供了基础。因此,在对博格达山北麓芦草沟组硅质岩矿物组成、沉积特征、成因机制等方面研究的基础上,进一步分析了硅质岩发育对陆相页岩有机质富集、储集空间形成和页岩油开发等方面的影响。

1 地质背景

准噶尔盆地位于新疆北部(图1a),是中国重要的大型含油气盆地,面积约为13×10^4 km^2[25]。盆地西北以哈拉阿拉特山和扎伊尔山为界,东北以阿尔泰山和克拉美丽山为界,南以伊林黑比尔根山和博格达山为界。其中,芦草沟组主要分布于准噶尔盆地东南部的博格达山周缘地区(图1b)。博格达地区主要经历了3个构造和沉积演化阶段:石炭纪—中二叠世为裂谷盆地的主要伸展期,沉积环境由滨浅海逐渐过渡为湖相[26];晚二叠世—早三叠世博格达地区仍然为伸展盆地,局部地区开始隆升,沉积环境主要为冲积扇和三角洲[27];三叠纪—白垩纪由于印支运动导致博格达山大规模隆升,从而分隔了准噶尔盆地和吐哈盆地[28]。

中二叠统芦草沟组为裂谷盆地中的一套湖相细粒沉积岩,沉积期伴有间歇性的火山-热液活动[29],使芦草沟组中火山碎屑和热水沉积物广泛发育,如凝灰岩、热液白云岩、热液黄铁矿和硅质岩等[6,10,30]。芦草沟组沉积厚度为200~1 000 m[4],古气候为温暖湿润气候[24],水体环境以还原性较强[31]的咸水-微咸水[23]为主,在沉积期具有较高的古生产力[29],富含藻类、古鳕鱼和介形虫化石[32]。特殊的沉积环境造成了芦草沟组混合沉积的特征,岩性主要为富有机质页岩和暗色泥岩,夹有粉砂岩和碳酸盐岩薄层,并且在纵向上广泛分布着结核状硅质岩(图2)[10]。

2 样品与方法

对博格达山XLK1井芦草沟组岩心中硅质岩发育层段进行了系统取样,所有样品均用金刚石线锯切为镜像对称的两块,其中一块用于制作薄片,另一块进行抛光用于元素面扫和粉末、小块样品取样。用牙钻对硅质岩样品和围岩样品进行微区取样,取样后的粉末

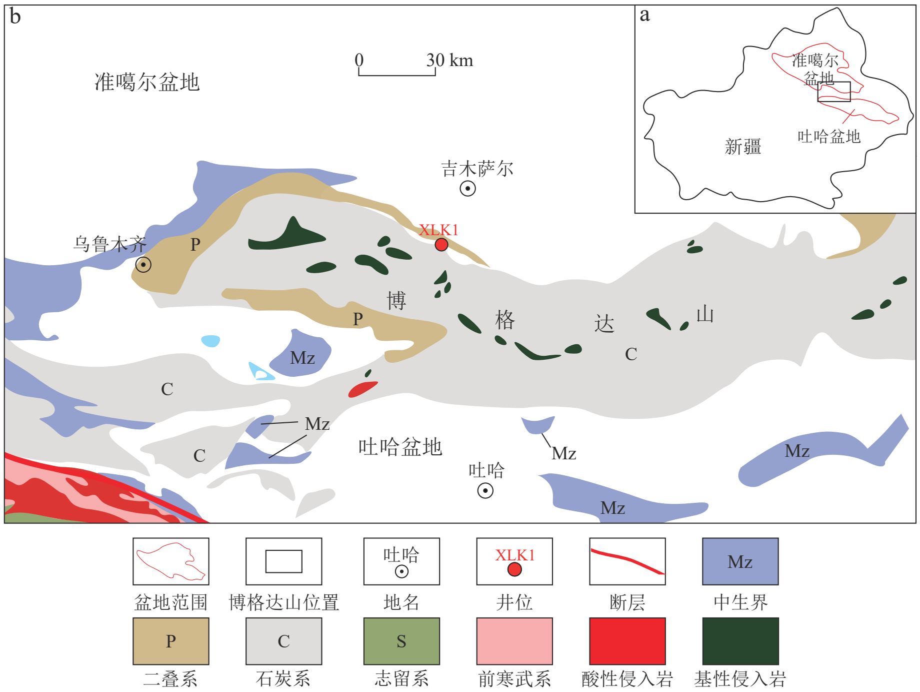

图 1　准噶尔盆地博格达山周缘地区地质简图及 XLK1 井位置

Fig. 1　Geological sketch showing the surrounding area of Bogda Mountain in the Juggar Basin with the location of Well XLK1

a. 盆地位置示意图;b. 博格达山周缘地质图

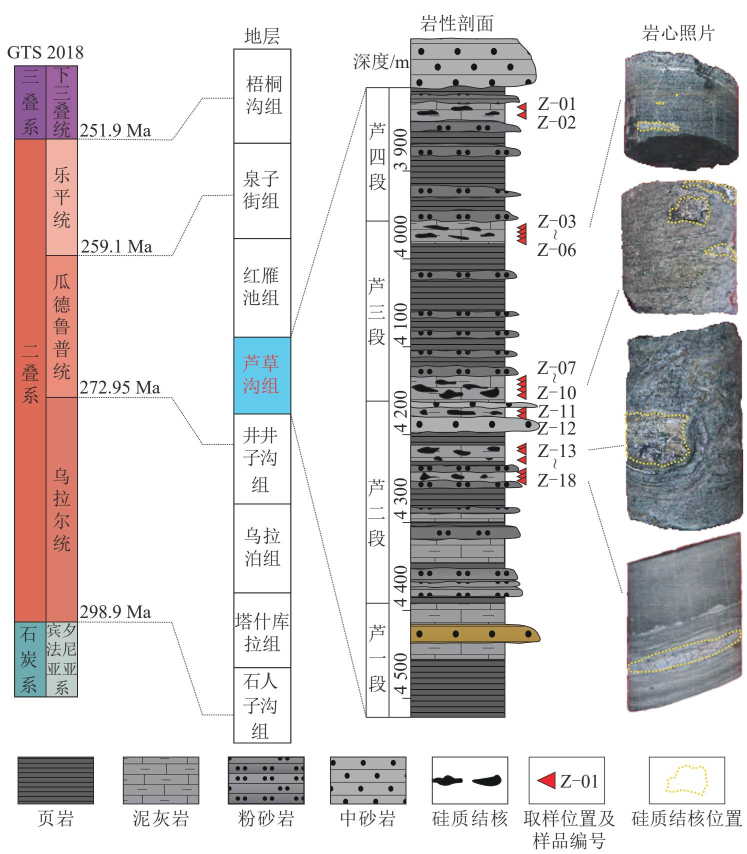

图 2　准噶尔盆地东南缘地层年龄格架[25]及 XLK1 井芦草沟组综合柱状图[10]

Fig. 2　Ages of the Permian strata in the southeastern Junggar Basin[25] and lithology column of the Lucaogou Formation in Well XLK1[10]

进一步用研钵研磨至小于200目，用于X射线衍射（XRD）分析、主微量元素测试、岩石热解和总有机碳含量（*TOC*）分析。

用布鲁克公司的微区X射线荧光分析仪（型号为Tornado M4）对抛光后的岩石样品进行了元素平面扫描。元素平面扫描的点间距为30 μm，每个点的测量时间为7 ms，测试方法参照刘可禹和刘畅（2019）[33]。对18个硅质岩粉末样品进行了XRD分析，测试条件为Cu靶，测试电压为40 kV，测试功率为12 kW。用ICP-OES和ICP-MS分别对主量元素和微量元素进行了测试。对共计24个泥页岩样品进行了岩石热解分析。对9个泥页岩样品进行了镜质体反射率（R_o）测试，R_o测试和前处理参照行业标准《SY/T5124—2012沉积岩中镜质体反射率测定方法》[34]。*TOC*测试在中科院地质与地球物理研究所进行，测试仪器为高频红外碳硫分析仪。

3　结果与讨论

3.1　硅质岩发育特征及成因

芦草沟组硅质岩在纵向上分布较为广泛，以结核状为主，主要附存于泥灰岩中，在多层中叠置出现（图2）。横向上硅质结核顺层发育，长轴与层面平行（图3a）。结核中软沉积物变形构造非常发育，并且表现为与围岩一致的变形特征（图3a，b），说明硅质结核形成于围岩尚未固结时。XRD分析表明，硅质结核主要由石英组成，含量为82.10 %～98.90 %，平均为92.38 %，含有少量方解石，含量为0～17.9 %，平均为7.22 %，并且在部分样品中还检测到了少量黏土矿物，平均含量为0.41 %（图4）。

硅质结核中石英在单偏光下呈透明状且表面干

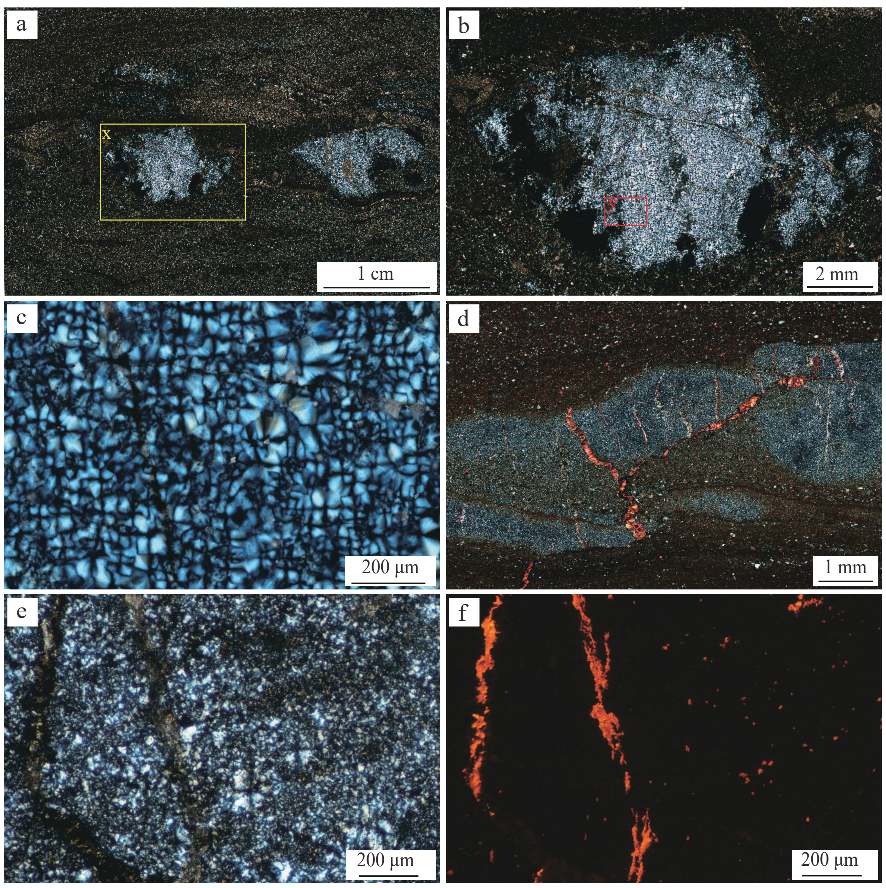

图3　准噶尔盆地XLK1井芦草沟组硅质结核岩石学特征显微照片

Fig. 3　Petrological characteristics of siliceous nodules in the Lucaogou Formation in Well XLK1, Junggar Basin

a. 硅质岩呈结核状顺层分布，软沉积物变形构造发育，埋深4 224.91 m，正交光；b. 硅质岩中裂缝发育，正交光，对应图a中x区域（黄框）；c. 硅质岩主要由隐-微晶石英组成，正交光，对应图b中y区域（红框）；d. 硅质岩中裂缝发育，被方解石完全充填，茜素红染色，埋深4 202.25 m，正交光；e. 硅质结核内部裂缝发育，被方解石完全充填，埋深4 226.72 m，正交光；f. 图e对应的阴极发光照片，隐-微晶石英不发光，方解石脉发橙色光

净,在正交偏光下呈亚矩形格子状,结晶程度较差,主要为隐-微晶结构(图 3b—e),说明石英以自生为主,受成岩作用影响较小。阴极发光进一步验证了石英的自生成因,通常发蓝紫色光的石英源自于深成岩或火山岩,发红棕色光的石英源自于区域变质岩,无阴极发光的石英多为自生成因[14]。芦草沟组硅质岩中石英均无阴极发光(图 3f),结合硅质岩中软沉积物变形构造广泛发育等特征,说明硅质岩为同沉积期形成。硅质结核中方解石主要为裂缝充填物,茜素红染色后呈红色(图 3d),为成岩期胶结作用的产物。

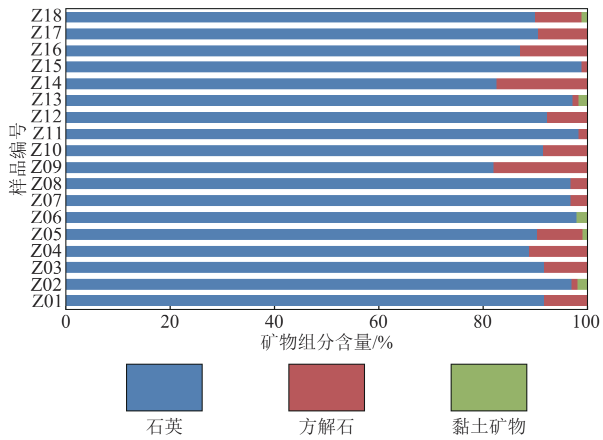

图 4　准噶尔盆地芦草沟组硅质岩矿物组成

Fig. 4　Mineral composition of siliceous rocks in the Lucaogou Formation, Junggar Basin

扫描电镜观察表明,硅质结核中发育重晶石、锰菱铁矿、镍铁矿、蓝铜矿和黄铁矿等自生含金属矿物,在背散射下呈灰白色,自形程度较高,为半自形-自形结构(图 5)。重晶石(图 5a)和镍铁矿(图 5b)主要呈粒状附存于隐-微晶石英中,平均粒径分别为 5 μm 和 33 μm。锰菱铁矿(图 5c)和蓝铜矿(图 5d)主要为片状集合体状分布于硅质结核内部,平均粒径分别为 3 μm 和 17 μm。黄铁矿呈微晶集合体状或分散状,平均粒径为 5 μm(图 5e,f)。硅质岩结构致密,石英晶间孔径大多小于 3 μm,小于自生含金属矿物平均粒径,且在

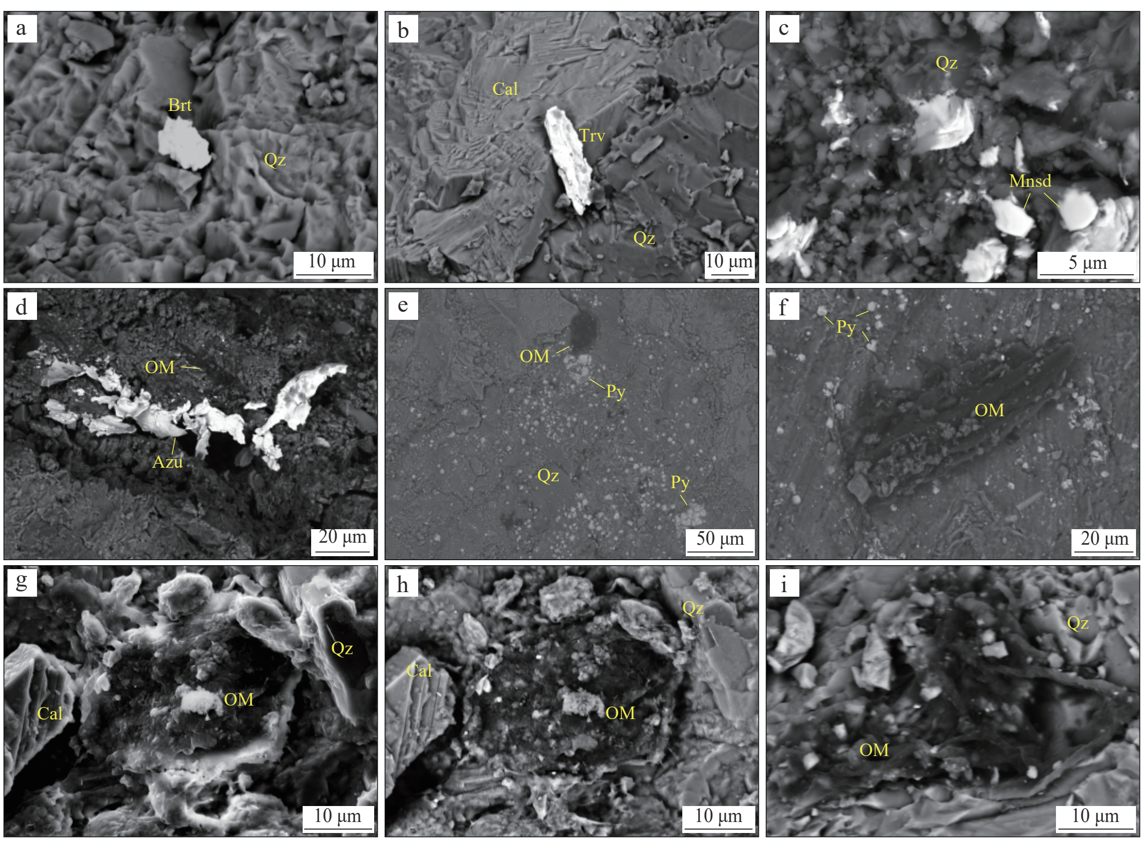

图 5　准噶尔盆地 XLK1 井芦草沟组硅质岩及围岩扫描电镜特征照片

Fig. 5　Scanning electron microscope characteristics of siliceous rocks and surrounding rocks in the Lucaogou Formation in Well XLK1, Junggar Basin

a. 硅质岩中自生重晶石发育,埋深 4 226.72 m,背散射;b. 硅质岩中的方解石及微晶镍铁矿,埋深 4 226.73 m,背散射;c. 硅质岩中锰菱铁矿发育,呈微晶分散状,埋深 4 226.90 m,背散射[10];d. 硅质岩中发育蓝铜矿及少量有机质,埋深 4 226.90 m,背散射;e. 硅质岩顶部黄铁矿及有机质发育,埋深 4 226.91 m,背散射;f. 硅质岩顶部的有机质及黄铁矿,埋深 4 226.91 m,背散射;g. 硅质岩上覆围岩中的有机质,二次电子;h. 图 g 对应的背散射图像;i. 硅质岩上覆围岩中的有机质,埋深 4 226.72 m,背散射

Brt. 重晶石;Qz. 石英;Cal. 方解石;Trv. 镍铁矿;Mnsd. 锰菱铁矿;Azu. 蓝铜矿;OM. 有机质;Py. 黄铁矿

硅质岩内部裂缝中没有重晶石、锰菱铁矿、镍铁矿和蓝铜矿的发育，说明这些含金属矿物与硅质结核应为同期形成。此外，在硅质结核顶部还发现了分散状有机质，直径为4～43 μm，在背散射下呈深灰色（图5e，f）。

硅质岩按照硅质来源可分为陆源硅[35]、生物硅[36]和深源硅[37]3类，其中陆源硅主要源自于源区铝硅酸岩风化[38]，由河流携带至汇水区中[17]；生物硅指硅藻、放射虫和海绵等生物在生物硅化作用下形成的硅，典型特征为硅质岩中富含硅质生物化石[39]；深源硅指由火山或热液等深部流体活动带来的硅[37]，其中热液成因硅常伴生重晶石、含锰矿物、含镍矿物以及含铜矿物[40-41]。芦草沟组硅质结核中大量分散状的自生含金属自生矿物表明硅源可能为热液流体。

硅质岩元素特征验证了硅质岩的热液成因（图6，图7）。热液流体通常具有较高的Fe元素和Mn元素含量[9,37]，而Al元素含量通常与陆源输入强度有关[42]。与围岩相比，硅质结核具有高Si元素而贫其他元素的特征，在硅质结核发育层的围岩中Al元素含量相对较低（图6c），而Fe元素（图6e）和Mn元素含量相对较高（图6f）。稀土元素和Y元素含量是硅质岩硅源判识的常用参数[19]，芦草沟组硅质岩稀土元素具有总含量低（平均为2.85 μg/g）、重稀土元素相对富集（Nd_N/Yb_N比平均为0.13）、低Y/Ho比（平均为28.15）和显著正Eu异常（δEu值平均为2.78）等与热液流体[43]和热液硅质岩[10]一致的特征（图7），说明XLK1井芦草沟组硅质岩为热液成因，并且每一层硅质结核都记录了一次热液流体活动脉冲，揭示了博格达裂谷在中二叠世存在间歇性热液活动。

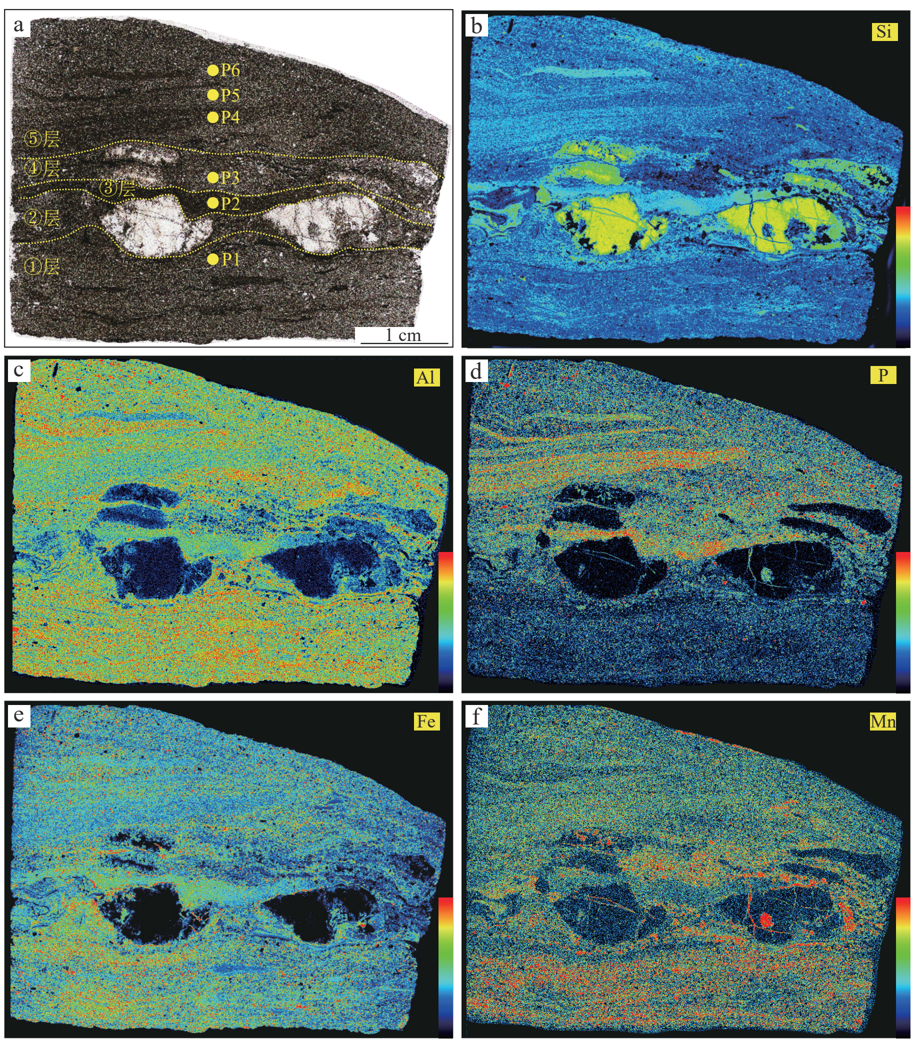

图6 准噶尔盆地XLK1井芦草沟组硅质岩（埋深4 224.91 m）元素面扫结果

Fig. 6 The Micro-XRF mapping results of siliceous rock in the Lucaogou Formation in Well XLK1, Junggar Basin

a. 硅质结核样品显微照片，单偏光；b. Si-Kα；c. Al-Kα；d. P-Kα；e. Fe-Kα；f. Mn-Kα

（①层—⑤层代表泥灰岩分层；P1—P6代表取样位置；色标由蓝色到红色表示元素强度逐渐增大。）

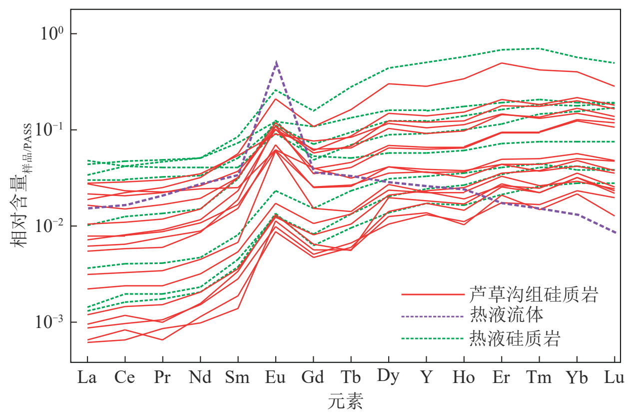

图7　澳大利亚后太古宙平均页岩(PAAS)标准化的准噶尔盆地芦草沟组硅质结核、热液流体[43]和热液硅质岩[10]稀土元素和钇(Y)元素配分曲线

Fig. 7　PAAS-normalized rare earth element and yttrium values of siliceous nodules, hydrothermal fluid[43] and hydrothermal siliceous rocks in the Lucaogou Formation[10]

3.2　硅质岩对有机质富集的影响

在海相环境中,硅质岩的发育常与古生产力勃发相伴生,这是由于硅是放射虫和海绵骨针等硅质生物生长所必须的营养元素,因此硅元素含量可作为海洋古生产力大小的有效替代指标[21,44]。不同于海相环境,芦草沟组硅质岩形成于咸水湖相环境中,虽然缺少硅质生物发育,但是硅质结核伴生的热液活动同样对有机质富集产生了重要影响[29]。通常热液活动对有机质富集主要有两类影响:①热液活动带来的营养物质使藻类勃发,进而提高古生产力[45];②热液流体带来的大量金属离子会使湖水盐度增加,使水体更易发生盐度分层,为沉积有机质的保存创造良好条件[46]。

通过元素面扫对硅质结核发育样品的矿物组成和地球化学特征进行了分析,元素面扫结果中从蓝色到红色表示元素强度逐渐增大,与元素含量呈正相关关系[33]。基于元素面扫结果,将发育硅质结核的泥灰岩划分为正常沉积围岩、热液活动层和热液活动后围岩,并进一步对古生产力和古水体环境进行了示踪。如图所示,①层为正常沉积围岩,形成于热液活动前;②层和④层为热液活动层,③层和⑤层为热液活动后围岩(图6)。正常沉积围岩中*TOC*仅为0.3%,而热液活动后围岩的*TOC*增加到1.5%,并且在硅质结核的顶部及热液活动后围岩中均发现了大量分散有机质(图5g—i),说明热液活动对有机质富集起到了建设性作用。

通常可用Al元素含量指示陆源碎屑输入,随陆源输入增加,Al元素含量逐渐增加[9,37],而Fe元素和Mn元素的含量可指示热液活动[47]。为了消除陆源输入的影响,用Fe/Al和Mn/Al来评价热液活动的影响。P元素、K元素和Ba元素是生物发育所必需的重要营养元素[48-49],可用P/Al、K/Al和Ba/Al反映古生产力强度[50]。正常沉积围岩表现为高Al元素含量(平均为11.247%),低P/Al(平均为0.003),K/Al(平均为0.356),Ba/Al(平均为0.019),Fe/Al(平均为0.866)和Mn/Al比值(平均为0.034)的特征(图8),说明正常沉积层主要受陆源输入影响,古生产力相对较低。热液活动层具有低Al元素含量(平均为6.842%),中等P/Al(平均为0.022)和K/Al比值(平均为0.176),高Ba/Al(平均为0.049),Fe/Al(平均为1.349)和Mn/Al比值(平均为0.101)的特征,说明热液活动层受陆源输入影响相对较小,而受热液活动影响较大(图8)。热液活动后围岩具有Al元素含量相对较高(平均为7.259%),高P/Al(平均为0.126)和K/Al比值(平均为0.414),低Ba/Al(平均为0.011),Fe/Al(平均为1.262)和Mn/Al比值(平均为0.043)的特征(图8)。P/Al和K/Al较正常沉积围岩的显著升高说明在热液活动后,古生产力显著提高。然而,Ba/Al却表现出与P/Al和K/Al相反的特征,这是由于海洋/湖泊中钡的来源主要有3种,分别为陆源钡、生物钡和热液钡,其中仅生物钡能指示古生产力[51]。Ba/Al比值与Fe/Al和Mn/Al比值的变化趋势较为一致,说明在芦草沟组含硅质结核样品中Ba元素含量受到了

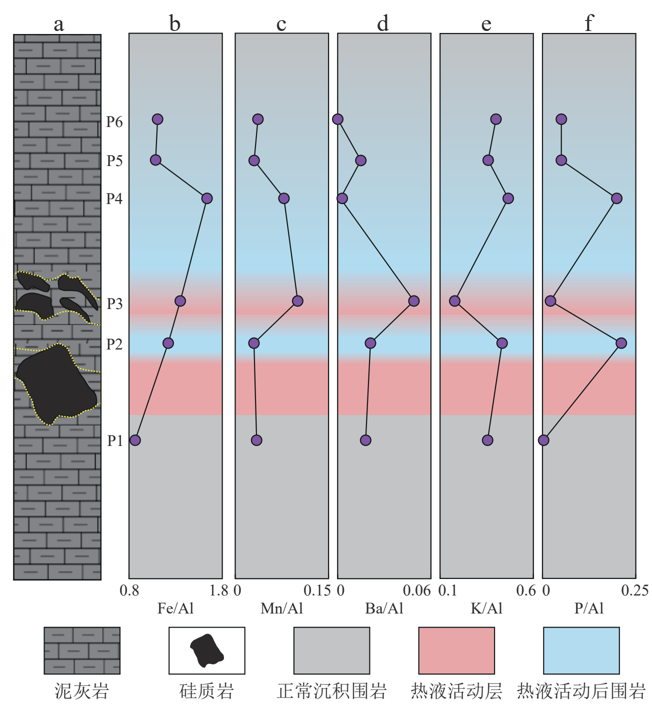

图8　准噶尔盆地芦草沟组含硅质岩样品元素含量比值垂向变化

Fig. 8　Vertical variations in element ratios of siliceous rock samples in the Lucaogou Formation, Junggar Basin

a. 取样位置(P1—P6位置见图6a);b—f. 元素含量比垂向变化

热液流体影响，因此不适用作为古生产力替代指标。

由于元素面扫测量的元素有限，进一步通过ICP-MS和ICP-OES测量的主、微量元素含量来分析和对比热液活动前、后的水体环境变化。Sr元素含量、Sr/Ba比和B/Ga比能有效反映古盐度，随古盐度增加逐渐增加[52]。正常沉积围岩的Sr元素含量(为888 μg/g)、Sr/Ba(为0.86)和B/Ga比值(为3.57)均分别低于热液活动后围岩的Sr元素含量(为1 182 μg/g)、Sr/Ba(为0.94)和B/Ga比值(为5.85)，说明热液活动使湖泊古盐度增加。U/Th，V/Cr和Ni/Co比是指示水体氧化-还原环境的有效参数[53]，与水体还原性呈正相关关系。和正常沉积围岩(U/Th=0.40，V/Cr=1.54和Ni/Co=23.10)相比，热液活动后围岩的U/Th(为1.17)，V/Cr(为2.19)和Ni/Co比值(为42.67)均明显增大，说明热液活动后，水体还原性增强。

热液活动前后古生产力和古水体环境指标的变化综合说明芦草沟组中硅质结核伴生的热液活动带来了Fe，Mn，Cu和Ni等营养元素，促使古生产力勃发，并且热液流体携带的大量金属阳离子使湖水盐度增加，促使湖水盐度分层，进一步导致底水还原性增强。热液活动后，古生产力逐渐降低，说明热液活动对古生产力的影响具有一定持续性，热液活动停止后，随着湖泊水体养分的逐渐消耗，古生产力逐渐降低。

3.3 硅质岩对储集空间的影响

硅质岩的发育有利于储集空间的发育和保持[44]。芦草沟组页岩油储层具有孔径小、渗透率差异大、储层非均质性强等特点，寻找页岩中的"甜点"是页岩油勘探的重点方向[54]。与海相硅质岩中孔隙以生物体腔

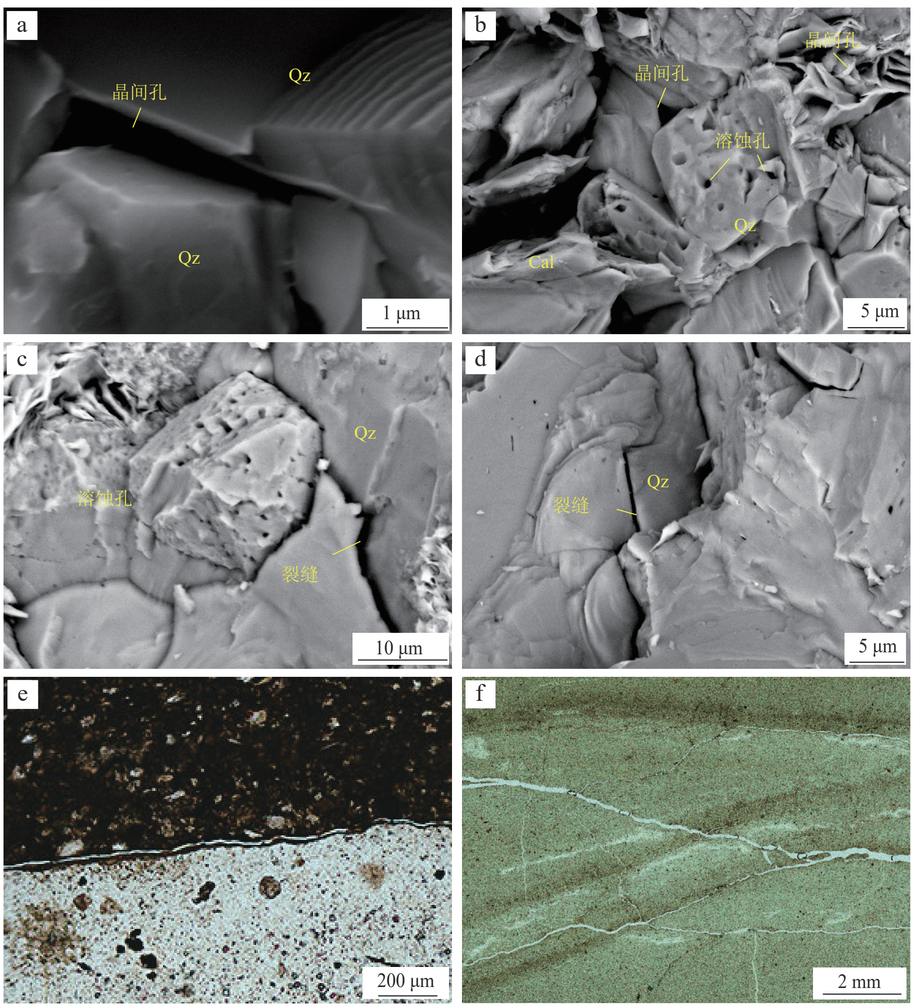

图9 准噶尔盆地XLK1井芦草沟组硅质岩储集空间类型显微照片

Fig. 9 Microscopic images showing types of reservoir space of siliceous rocks in the Lucaogou Formation in Well XLK1, Junggar Basin

a. 硅质岩石英晶间孔发育，埋深4 224.92 m，二次电子SEM；b. 石英晶间孔及内部溶蚀孔，黏土矿物晶间孔，裂缝被方解石完全充填，埋深4 224.91 m，背散射SEM；c. 硅质岩中石英溶蚀孔发育，石英被溶蚀成海绵状，张裂缝发育，埋深4 226.72 m，背散射SEM；d. 硅质岩中张裂缝发育，石英断口呈贝壳状，埋深4 226.90 m，背散射SEM；e. 硅质岩结核边缘发育张裂缝，埋深4 202.25 m，单偏光；f. 硅质岩内部张裂缝发育，埋深4 221.75 m，单偏光

Qz. 石英；Cal. 方解石

孔为主不同[21]，陆相硅质岩的储集空间类型更加复杂。芦草沟组硅质岩中孔隙和裂缝非常发育，储集空间类型多样，晶间孔、溶蚀孔和裂缝均有发育（图 9）。

晶间孔主要发育在微晶石英晶体间（图 9a，b），孔径为 0.66～3.51 μm，平均为 2.05 μm。溶孔主要发育在石英晶体表面（图 9b，c），孔径为 0.20～1.26 μm，平均为 0.55 μm。部分石英晶体经历较强溶蚀作用，被溶蚀为"海绵"状（图 9c）。裂缝主要分布于硅质岩内部和硅质结核边缘（图 9d—f），按裂缝开度可分为大缝（>100 μm）、中缝（10～100 μm）、小缝（1～10 μm）和微缝（<1 μm）。扫描电镜下，可见硅质岩内部微缝十分发育，开度为 0.13～0.84 μm，平均为 0.52 μm。显微镜下可见小缝、中缝和大缝的发育，大缝的开度为 122.63～175.19 μm，平均为 160.85 μm，中缝的开度为 22.30～65.30 μm，平均为 44.59 μm，小缝的开度为 7.82～9.72 μm，平均为 8.49 μm。硅质岩内部裂缝常被方解石完全充填，部分裂缝未充填，未充填缝可能形成于方解石胶结作用之后。虽然硅质岩中孔隙的孔径较小，以微孔为主，孔隙连通性较差，但是硅质岩中广泛发育的裂缝有效沟通了孔隙，为页岩油储集提供了空间。此外，由于芦草沟组硅质岩形成于大规模压实作用前，有助于提高岩石抗压实作用能力，从而对储层起到较好的保护作用。

3.4　硅质岩对页岩油开发的影响

硅质岩的发育有利于储层压裂改造和页岩油开发[21]。中国陆相页岩油具有油质重、黏度高、流动能力差、黏土矿物含量高和脆性较低等特点，储层非均质性强、有机质成熟度低和脆性矿物含量低是制约页岩油开发的重要因素[55-56]。脆性矿物含量越

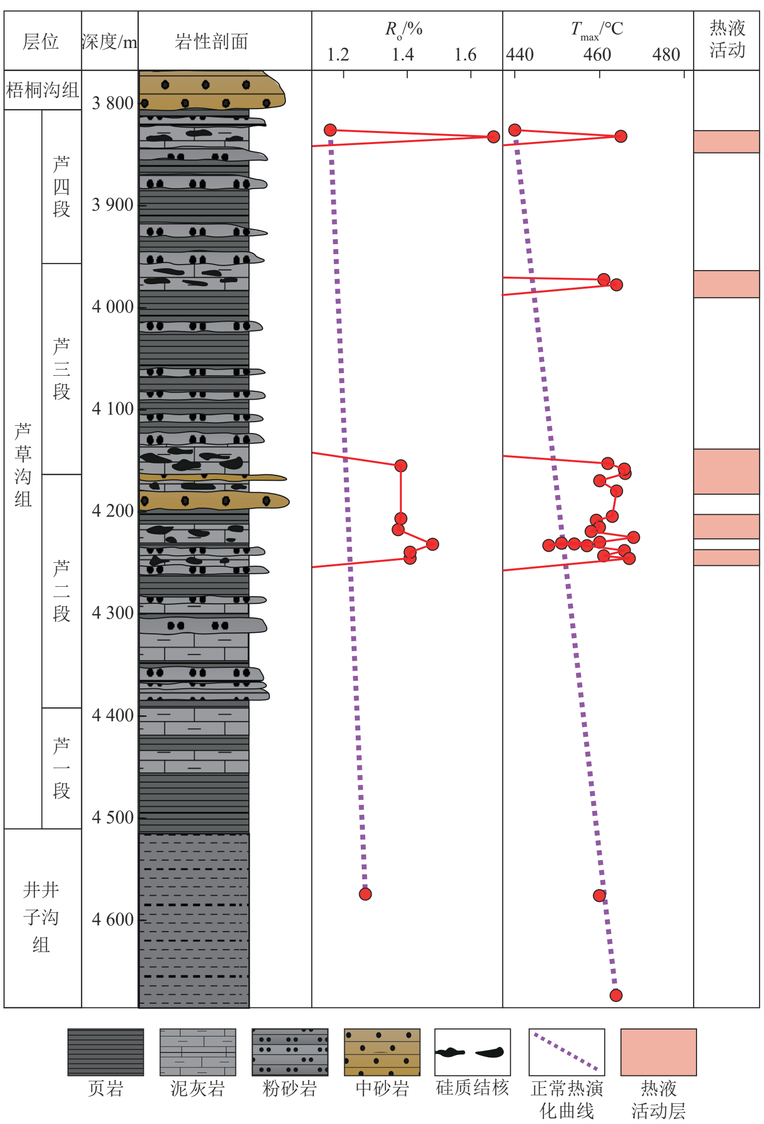

图 10　准噶尔盆地 XLK1 井芦草沟组成熟度参数纵向变化

Fig. 10　Vertical variation of maturity of the Lucaogou Formation in Well XLK1, Junggar Basin

高、储层可压裂性就越强[44]，石英属于脆性矿物，硅质岩的发育有助于提高芦草沟组储层脆性矿物含量。芦草沟组硅质岩中，石英含量平均为92.38 %，且芦草沟组硅质岩通常顺层发育，改善了储层可压裂性。此外，深源物质参与有助于有机质生烃演化[30]，XLK1井芦草沟组R_o和最高热解峰温(T_{max})正异常层段与硅质岩发育层段具有较好的对应关系(图10)，说明硅质岩伴生的热液流体活动参与了有机质生烃演化，从而使页岩油黏度降低，可动性增强。

4 结论

1) 芦草沟组硅质岩主要呈结核状顺层发育，软沉积物变形广泛发育，结核主要由隐-微晶石英组成，内部可见重晶石、锰菱铁矿、镍铁矿和蓝铜矿等自生含金属矿物，稀土元素具有总量低，重稀土元素相对富集和正Eu异常等特征，为典型同沉积热液成因硅质岩，说明芦草沟组沉积期博格达裂谷盆地存在间歇性热液活动。

2) 硅质岩伴生的热液流体携带了大量Fe，Mn，Cu和Ni等营养元素，有助于藻类勃发，提高古生产力，并且热液中的金属阳离子使湖水盐度增加，促使湖水分层，进一步导致底水还原性增强，为有机质保存提供了良好条件。

3) 硅质岩中晶间孔、溶蚀孔和裂缝的发育有利于页岩油储层的发育和沟通。并且，硅质岩的发育提高了储层中石英等脆性矿物含量，使储层可压裂性增强，硅质岩伴生的热液活动参与了有机质热演化，提高了页岩油可动性，有助于页岩油开发。

参 考 文 献

[1] 唐勇，宋永，何文军，等. 准噶尔叠合盆地复式油气成藏规律[J]. 石油与天然气地质，2022，43(1)：132-148.
TANG Yong，SONG Yong，HE Wenjun，et al. Characteristics of composite hydrocarbon accumulation in a superimposed basin，Junggar Basin[J]. Oil & Gas Geology，2022，43(1)：132-148.

[2] 陈建平，王绪龙，邓春萍，等. 准噶尔盆地烃源岩与原油地球化学特征[J]. 地质学报，2016，90(1)：37-67.
CHEN Jianping，WANG Xulong，DENG Chunping，et al. Geochemical features of source rocks and crude oil in the Junggar Basin，northwest China[J]. Acta Geologica Sinica，2016，90(1)：37-67.

[3] 支东明，唐勇，杨智峰，等. 准噶尔盆地吉木萨尔凹陷陆相页岩油地质特征与聚集机理[J]. 石油与天然气地质，2019，40(3)：524-534.
ZHI Dongming，TANG Yong，YANG Zhifeng，et al. Geological characteristics and accumulation mechanism of continental shale oil in Jimusaer Sag，Junggar Basin[J]. Oil & Gas Geology，2019，40(3)：524-534.

[4] 王越，陈世悦，张关龙，等. 咸化湖盆混积岩分类与混积相带沉积相特征——以准噶尔盆地南缘芦草沟组与吐哈盆地西北缘塔尔朗组为例[J]. 石油学报，2017，38(9)：1021-1035，1065.
WANG Yue，CHEN Shiyue，ZHANG Guanlong，et al. Classifications of mixosedimentite and sedimentary facies characteristics of mixed sedimentary facies belt in saline lacustrine basin：Taking examples as the Lucaogou Formation in the south of Junggar Basin and the Taerlang Formation in the northwest of Tuha Basin[J]. Acta Petrolei Sinica，2017，38(9)：1021-1035，1065.

[5] 王然，常秋生，钱永新，等. 准噶尔盆地吉木萨尔凹陷芦草沟组页岩油"甜点体"储集特征及成因机理[J]. 石油实验地质，2020，42(4)：604-611.
WANG Ran，CHANG Qiusheng，QIAN Yongxin，et al. Reservoir characteristics and genesis of shale oil "sweet spots" in Lucaogou Formation，Jimsar Sag，Junggar Basin[J]. Petroleum Geology & Experiment，2020，42(4)：604-611.

[6] 杨焱钧. 准噶尔盆地吉木萨尔凹陷二叠系芦草沟组热液喷流沉积初探[D]. 西安：西北大学，2014.
YANG Yanjun. A preliminary study on exhalative hydrothermal deposits in the Lucaogou Formation in Jimusar Sag，Permian，Zhunggar Basin[D]. Xi'an：Northwest University，2014.

[7] 张桥. 新疆三塘湖盆地二叠系芦草沟组硅质岩成因探讨[D]. 西安：西北大学，2018.
ZHANG Qiao. The petrogenesis of siliceous rocks in Permian Lucaogou Formation，Santanghu Basin，Xinjiang[D]. Xi'an：Northwest University，2018.

[8] 魏研，郭佩，靳军，等. 火山-碱湖沉积岩中的燧石成因：以准噶尔盆地下二叠统风城组为例[J]. 矿物岩石，2021，41(2)：83-98.
WEI Yan，GUO Pei，JIN Jun，et al. Silexite genesis in volcanic-alkali lacustrine sedimentary rocks：A case study of the Lower Permian Fengcheng Formation，Junggar Basin[J]. Mineralogy and Petrology，2021，41(2)：83-98.

[9] SHEN Bing，MA Haoran，YE Heqing，et al. Hydrothermal origin of syndepositional chert bands and nodules in the Mesoproterozoic Wumishan Formation：Implications for the evolution of Mesoproterozoic cratonic basin，North China[J]. Precambrian Research，2018，310：213-228.

[10] MURRAY R W. Chemical criteria to identify the depositional environment of chert：General principles and applications[J]. Sedimentary Geology，1994，90(3/4)：213-232.

[11] ZHOU Jiaquan，YANG Hailin，LIU Hanlin，et al. The depositional mechanism of hydrothermal chert nodules in a lacustrine environment：A case study in the Middle Permian Lucaogou Formation，Junggar Basin，Northwest China[J]. Minerals，2022，12(10)：1333.

[12] YU Kuanhong，ZHANG Zhijie，CAO Yingchang，et al. Origin of biogenic-induced cherts from Permian alkaline saline lake deposits in the NW Junggar Basin，NW China：Implications for hydrocarbon exploration[J]. Journal of Asian Earth Sciences，2021，211：104712.

[13] LIU Guoheng，ZHAI Gangyi，ZOU Caineng，et al. A comparative discussion of the evidence for biogenic silica in Wufeng-Longmaxi siliceous shale reservoir in the Sichuan Basin，China[J]. Marine and Petroleum Geology，2019，109：70-87.

[14] 高媛，王国芝，李娜. 准噶尔盆地西北缘二叠系风城组硅质岩地球化学特征及成因[J]. 古地理学报，2019，21(4)：647-660.
GAO Yuan，WANG Guozhi，LI Na. Geochemical features and origin of siliceous rocks of the Permian Fengcheng Formation in the northwestern margin of Junggar Basin [J]. Journal of Palaeogeography，2019，21(4)：647-660.

[15] 刘国恒，黄志龙，郭小波，等. 新疆三塘湖盆地马朗凹陷中二叠统芦草沟组泥页岩层系 SiO_2 赋存状态与成因[J]. 地质学报，2016，90(6)：1220-1235.
LIU Guoheng，HUANG Zhilong，GUO Xiaobo，et al. The SiO_2 occurrence and origin in the shale system of Middle Permian series Lucaogou Formation in Malang Sag，Santanghu Basin，Xinjiang [J]. Acta Geologica Sinica，2016，90(6)：1220-1235.

[16] 白斌，戴朝成，侯秀林，等. 陆相湖盆页岩自生硅质特征及其油气意义[J]. 石油勘探与开发，2022，49(5)：896-907.
BAI Bin，DAI Chaocheng，HOU Xiulin，et al. Authigenic silica in continental lacustrine shale and its hydrocarbon significance[J]. Petroleum Exploration and Development，2022，49(5)：896-907.

[17] MURCHEY B L，JONES D L. A mid-Permian chert event：Widespread deposition of biogenic siliceous sediments in coastal，island arc and oceanic basins[J]. Palaeogeography，Palaeoclimatology，Palaeoecology，1992，96(1/2)：161-174.

[18] DONG Yixin，XU Shenglin，WEN Long，et al. Tectonic control of Guadalupian-Lopingian cherts in northwestern Sichuan Basin，South China[J]. Palaeogeography，Palaeoclimatology，Palaeoecology，2020，557：109915.

[19] GAO Ping，HE Zhiliang，LASH G G，et al. Mixed seawater and hydrothermal sources of nodular chert in Middle Permian limestone on the eastern Paleo-Tethys margin (South China)[J]. Palaeogeography，Palaeoclimatology，Palaeoecology，2020，551：109740.

[20] JIAO Xin，LIU Yiqun，YANG Wan，et al. Mixed biogenic and hydrothermal quartz in Permian lacustrine shale of Santanghu Basin，NW China：Implications for penecontemporaneous transformation of silica minerals [J]. International Journal of Earth Sciences，2018，107(6)：1989-2009.

[21] 蔡全升，陈孝红，张保民，等. 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[J]. 地质学报，2020，94(3)：931-946.
CAI Quansheng，CHEN Xiaohong，ZHANG Baomin，et al. 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[J]. Acta Geologica Sinica，2020，94(3)：931-946.

[22] 管全中，董大忠，张华玲，等. 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[J]. 石油勘探与开发，2021，48(4)：700-709.
GUAN Quanzhong，DONG Dazhong，ZHANG Hualing，et al. 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[J]. Petroleum Exploration and Development，2021，48(4)：700-709.

[23] SUN Funing，HU Wenxuan，WANG Xiaolin，et al. Methanogen microfossils and methanogenesis in Permian lake deposits [J]. Geology，2021，49(1)：13-18.

[24] SUN Funing，HU Wenxuan，CAO Jian，et al. Sustained and intensified lacustrine methane cycling during Early Permian climate warming[J]. Nature Communications，2022，13(1)：4856.

[25] GAO Yuan，HUANG He，TAO Huifei，et al. Paleoenvironmental setting，mechanism and consequence of massive organic carbon burial in the Permian Junggar Basin，NW China[J]. Journal of Asian Earth Sciences，2020，194：104222.

[26] LIU Jun，YI Jian，CHEN Jianye. Constraining assembly time of some blocks on eastern margin of Pangea using Permo-Triassic non-marine tetrapod records[J]. Earth-Science Reviews，2020，207：103215.

[27] ALLEN M B，ŞENGÖR A M C，NATAL'IN B A. Junggar，Turfan and Alakol basins as Late Permian to? Early Triassic extensional structures in a sinistral shear zone in the Altaid orogenic collage，Central Asia[J]. Journal of the Geological Society，1995，152(2)：327-338.

[28] ZHAO Rui，ZHANG Jinyu，ZHOU Chuanmin，et al. Tectonic evolution of Tianshan-Bogda-Kelameili mountains，clastic wedge basin infill and chronostratigraphic divisions in the source-to-sink systems of Permian-Jurassic，southern Junggar Basin[J]. Marine and Petroleum Geology，2020，114：104200.

[29] TAO Huifei，QIU Zhen，QU Yongqiang，et al. Geochemistry of Middle Permian lacustrine shales in the Jimusar Sag，Junggar Basin，NW China：Implications for hydrothermal activity and organic matter enrichment[J]. Journal of Asian Earth Sciences，2022，232：105267.

[30] 柳益群，周鼎武，焦鑫，等. 深源物质参与湖相烃源岩生烃作用的初步研究——以准噶尔盆地吉木萨尔凹陷二叠系黑色岩系为例[J]. 古地理学报，2019，21(6)：983-998.
LIU Yiqun，ZHOU Dingwu，JIAO Xin，et al. A preliminary study on the relationship between deep-sourced materials and hydrocarbon generation in lacustrine source rocks：An example from the Permian black rock series in Jimusar Sag，Junggar Basin [J]. Journal of Palaeogeography，2019，21(6)：983-998.

[31] LIU Dadong，FAN Qingqing，ZHANG Chen，et al. Paleoenvironment evolution of the Permian Lucaogou Formation in the southern Junggar Basin，NW China [J]. Palaeogeography，Palaeoclimatology，Palaeoecology，2022，603：111198.

[32] 唐勇，侯章帅，王霞田，等. 准噶尔盆地石炭纪—二叠纪地层对比框架新进展[J]. 地质论评，2022，68(2)：385-407.
TANG Yong，HOU Zhangshuai，WANG Xiatian，et al. Progress of the carboniferous and Permian stratigraphic framework and correlation of the Junggar Basin，Xinjiang，northwest China[J]. Geological Review，2022，68(2)：385-407.

[33] 刘可禹，刘畅. "化学-沉积相"分析：一种研究细粒沉积岩的有效方法[J]. 石油与天然气地质，2019，40(3)：491-503.
LIU Keyu，LIU Chang. "Chemo-sedimentary facies" analysis：An effective method to study fine-grained sedimentary rocks[J]. Oil & Gas Geology，2019，40(3)：491-503.

[34] 国家能源局. 沉积岩中镜质体反射率测定方法：SY/T 5124-2012[S]. 北京：石油工业出版社，2012.

National Energy Administration. Method of determining microscopically the reflectance of vitrinite in sedimentary: SY/T 5124-2012[S]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2012.
[35] YAMAMOTO K. Geochemical characteristics and depositional environments of cherts and associated rocks in the Franciscan and Shimanto Terranes[J]. Sedimentary Geology, 1987, 52(1/2): 65-108.
[36] BEAUCHAMP B, BAUD A. Growth and demise of Permian biogenic chert along northwest Pangea: Evidence for end-Permian collapse of thermohaline circulation [J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2002, 184(1/2): 37-63.
[37] ADACHI M, YAMAMOTO K, SUGISAKI R. Hydrothermal chert and associated siliceous rocks from the northern Pacific their geological significance as indication of ocean ridge activity[J]. Sedimentary Geology, 1986, 47(1/2): 125-148.
[38] TRÉGUER P, NELSON D M, VAN BENNEKOM A J, et al. The silica balance in the world ocean: A reestimate[J]. Science, 1995, 268(5209): 375-379.
[39] TRÉGUER P J, DE LA ROCHA C L. The world ocean silica cycle [J]. Annual Review of Marine Science, 2013, 5: 477-501.
[40] HEDENQUIST J W, LOWENSTERN J B. The role of magmas in the formation of hydrothermal ore deposits[J]. Nature, 1994, 370 (6490): 519-527.
[41] 时志强, 王毅, 金鑫, 等. 塔里木盆地志留系热液碎屑岩储层: 证据、矿物组合及油气地质意义[J]. 石油与天然气地质, 2014, 35(6): 903-913.
SHI Zhiqiang, WANG Yi, JIN Xin, et al. The Silurian hydrothermal clastic reservoirs in Tarim Basin: Evidences, mineral assemblages and its petroleum geological implications[J]. Oil & Gas Geology, 2014, 35(6): 903-913.
[42] ZABEL M, SCHNEIDER R R, WAGNER T, et al. Late quaternary climate changes in central Africa as inferred from terrigenous input to the Niger fan[J]. Quaternary Research, 2001, 56(2): 207-217.
[43] MILLS R A, ELDERFIELD H. Rare earth element geochemistry of hydrothermal deposits from the active TAG Mound, 26°N Mid-Atlantic Ridge [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1995, 59(17): 3511-3524.
[44] 卢龙飞, 秦建中, 申宝剑, 等. 川东南涪陵地区五峰—龙马溪组硅质页岩的生物成因及其油气地质意义[J]. 石油实验地质, 2016, 38(4): 460-465, 472.
LU Longfei, QIN Jianzhong, SHEN Baojian, et al. Biogenic origin and hydrocarbon significance of siliceous shale from the Wufeng-Longmaxi formations in Fuling area, southeastern Sichuan Basin[J]. Petroleum Geology and Experiment, 2016, 38(4): 460-465, 472.
[45] 李长志, 郭佩, 柯先启, 等. 火山活动影响下的碱湖优质烃源岩成因及其对页岩油气勘探和开发的启示[J]. 石油与天然气地质, 2021, 42(6): 1423-1434.
LI Changzhi, GUO Pei, KE Xianqi, et al. Genesis of high-quality source rocks in volcano-related alkaline lakes and implications for the exploration and development of shale oil and gas[J]. Oil & Gas Geology, 2021, 42(6): 1423-1434.
[46] 朱如凯, 李梦莹, 杨静儒, 等. 细粒沉积学研究进展与发展方向[J]. 石油与天然气地质, 2022, 43(2): 251-264.
ZHU Rukai, LI Mengying, YANG Jingru, et al. Advances and trends of fine-grained sedimentology[J]. Oil & Gas Geology, 2022, 43(2): 251-264.
[47] ZABEL M, BICKERT T, DITTERT L, et al. Significance of the sedimentary Al: Ti ratio as an indicator for variations in the circulation patterns of the equatorial North Atlantic [J]. Paleoceanography and Paleoclimatology, 1999, 14(6): 789-799.
[48] SCHMITZ B. Barium, equatorial high productivity, and the northward wandering of the Indian continent[J]. Paleoceanography and Paleoclimatology, 1987, 2(1): 63-77.
[49] TYRRELL T. The relative influences of nitrogen and phosphorus on oceanic primary production[J]. Nature, 1999, 400(6744): 525-531.
[50] CHEN Lin, JIANG Shu, CHEN Ping, et al. Relative sea-level changes and organic matter enrichment in the Upper Ordovician-Lower Silurian Wufeng-Longmaxi Formations in the Central Yangtze area, China[J]. Marine and Petroleum Geology, 2021, 124: 104809.
[51] PAYTAN A, MEARON S, COBB K, et al. Origin of marine barite deposits: Sr and S isotope characterization[J]. Geology, 2002, 30(8): 747-750.
[52] 刘惠民, 杨怀宇, 张鹏飞, 等. 古湖泊水介质条件对混积岩相组合沉积的控制作用——以渤海湾盆地东营凹陷古近系沙河街组三段为例[J]. 石油与天然气地质, 2022, 43(2): 297-306.
LIU Huimin, YANG Huaiyu, ZHANG Pengfei, et al. Control effect of paleolacustrine water conditions on mixed lithofacies assemblages: A case study of the Palaeogene Es^3, Dongying Sag, Bohai Bay Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2022, 43(2): 297-306.
[53] 刘萍, 谭先锋, 陈青, 等. 早始新世极热气候时期湖盆水体性质及生烃环境——以东营凹陷古近系孔店组为例[J]. 石油与天然气地质, 2017, 38(1): 39-48, 143.
LIU Ping, TAN Xianfeng, CHEN Qing, et al. Water redox conditions and environment for source rock deposition in lacustrine during the Initial Eocene Thermal Maximum (IETM): A case study on the Paleogene Kongdian Formation in the Dongying Sag [J]. Oil & Gas Geology, 2017, 38(1): 39-48, 143.
[54] 马克, 侯加根, 董虎, 等. 页岩油储层混合细粒沉积孔喉特征及其对物性的控制作用——以准噶尔盆地吉木萨尔凹陷二叠系芦草沟组为例[J]. 石油与天然气地质, 2022, 43(5): 1194-1205.
MA Ke, HOU Jiagen, DONG Hu, et al. Pore throat characteristics of fine-grained mixed deposits in shale oil reservoirs and their control on reservoir physical properties: A case study of the Permian Lucaogou Formation, Jimsar Sag, Junggar Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2022, 43(5): 1194-1205.
[55] JIN Zhijun, ZHU Rukai, LIANG Xinping, et al. Several issues worthy of attention in current lacustrine shale oil exploration and development[J]. Petroleum Exploration and Development, 2021, 48(6): 1471-1484.
[56] 孙彪, 刘小平, 舒红林, 等. 湖相泥页岩储层脆性评价及影响因素分析——以苏北盆地海安凹陷曲塘次凹泥页岩为例[J]. 石油实验地质, 2021, 43(6): 1006-1014.
SUN Biao, LIU Xiaoping, SHU Honglin, et al. Evaluation and influencing factors for brittleness of lacustrine shale reservoir: a case study of Qutang Sub-Sag, Subei Basin[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2021, 43(6): 1006-1014.

(编辑 张亚雄)