

鄂尔多斯盆地上三叠统延长组7段埋藏期热液活动对页岩油储层的影响

王梓毅¹, 付金华^{2,3}, 刘显阳^{2,3}, 李士祥^{3,4}, 张昌虎¹, 梁新平^{1,5}, 董琳¹

(1. 北京大学地球与空间科学学院, 北京 100871; 2. 中国石油长庆油田公司, 陕西西安 710018; 3. 低渗透油气田勘探开发国家工程实验室, 陕西西安 710018; 4. 中国石油长庆油田公司勘探开发研究院, 陕西西安 710018; 5. 北京大学能源研究院, 北京 100871)

摘要:目前针对鄂尔多斯盆地上三叠统延长组7段(长7段)热液作用的研究较多,主要聚焦于长7期的热水沉积作用。长7段在埋藏期也可能受到热液作用的影响,但相关的研究极为有限。为揭示长7段埋藏期热液活动的期次、时代及其对页岩油储层的影响,利用光学/电子显微镜观测、电子探针分析、显微激光拉曼光谱分析及包裹体均一温度测试等手段,对长7段热液黄铁矿以及固相和流体包裹体开展研究。结果表明,长7段发育多种类型的黄铁矿,其中脉状或团块状、透镜状、他形-半自形晶散布状和半自形-自形晶斑状黄铁矿的Co/Ni元素含量比值均大于1,指示其为热液成因。根据显微观测结果及区域构造史和埋藏史-热演化史模拟,推断长7段埋藏期至少存在两期热液活动,其中一期发生于早白垩世。与黄铁矿包裹体伴生的盐水包裹体均一温度表明,注入瑶页1井区长7段的热液温度最高可达270.5℃以上;基于Easy%R_o动力学模型的计算结果表明,热液注入后地层经历了较快的降温过程,这可能是页岩有机质热演化程度较低(R_o=0.70%)的重要原因之一。

关键词:热液活动;热液黄铁矿;有机质热演化;埋藏期;页岩油储层;长7段;鄂尔多斯盆地

中图分类号:TE122.2

文献标识码:A

The influence of hydrothermal activities on shale oil reservoirs during the burial period of the Upper Triassic Chang 7 Member, Ordos Basin

WANG Ziyi¹, FU Jinhua^{2,3}, LIU Xianyang^{2,3}, LI Shixiang^{3,4}, ZHANG Changhu¹, LIANG Xinping^{1,5}, DONG Lin¹

(1. School of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing 100871, China; 2. Changqing Oilfield Company, PetroChina, Xi'an, Shaanxi 710018, China; 3. National Engineering Laboratory for Exploration and Development of Low-Permeability Oil & Gas Fields, Xi'an, Shaanxi 710018, China; 4. Research Institute of Exploration and Development of Changqing Oilfield Company, PetroChina, Xi'an, Shaanxi 710018, China; 5. Institute of Energy, Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract: The hydrothermal activity of the Upper Triassic Chang 7 shale in the Ordos Basin has been extensively studied in previous studies, with a focus on hydrothermal sedimentation during the depositional period of Chang 7 Member. However, there is limited research on the impact of hydrothermal activities during the corresponding burial stage. This study aims to investigate the stages and ages of hydrothermal activities and their impact on shale oil reservoirs during the burial stage of the Chang 7 shale. An integration of multiple techniques, including optical/electronic microscopy, electronic probe, micro-laser Raman spectrum and inclusion homogenization temperature analysis is applied to study the hydrothermal pyrite and solid phases and fluid inclusions in the Chang 7 Member. The results reveal that there contains many types of pyrite with Co/Ni greater than 1 exhibiting a variety of morphologies, including veins, lumps, lenticular shape as well as xenomorphic-hypidiomorphic scattered and hypidiomorphic-euhedral massive forms, indicating hydrothermal origin. Based on the analyses of microscopic observation, regional tectonic history, as well as the simulation of burial-thermal evolution history, it is inferred that there were at least two

收稿日期:2023-06-09;修回日期:2023-06-20。

第一作者简介:王梓毅(1991—),男,博士、助理研究员,石油与天然气地质。E-mail:ziyi-wang@pku.edu.cn。

通信作者简介:董琳(1980—),女,博士、副教授,沉积地球化学与非常规油气。E-mail:lin.dong@pku.edu.cn。

基金项目:国家自然科学基金项目(42090021);中国石化科技攻关项目(P20049-1)。

phases of hydrothermal activities during the burial period of the Chang 7 Member, with one of them occurring in the Early Cretaceous. The maximum temperature of the hydrothermal fluid injected into the Chang 7 shale in well Yy1 may reach up to 270.5 °C based on the homogenization temperatures of aqueous inclusions associated with pyrite inclusions. The calculation based on the Easy% R_o kinetic model indicates that the Chang 7 shale underwent a rapid cooling process after hydrothermal injection, which may be one of the important reasons for the lower-degree thermal evolution of shale organic matter ($R_o = 0.70\%$).

Key words: hydrothermal activity, hydrothermal pyrite, organic thermal evolution, burial stage, shale oil reservoir, Chang 7 Member, Ordos Basin

引用格式:王梓毅,付金华,刘显阳,等.鄂尔多斯盆地上三叠统延长组7段埋藏期热液活动对页岩油储层的影响[J].石油与天然气地质,2023,44(4):899-909. DOI:10.11743/ogg20230408.

WANG Ziyi, FU Jinhua, LIU Xianyang, et al. The influence of hydrothermal activities on shale oil reservoirs during the burial period of the Upper Triassic Chang 7 Member, Ordos Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2023, 44(4): 899-909. DOI: 10.11743/ogg20230408.

热液通常指来自于地壳深部或地幔的高温流体,主要经断裂等通道涌至浅部,其温度显著高于围岩的成岩域背景温度^[1-3]。众多研究表明,热液活动对沉积盆地中的油气资源有不可忽视的影响,例如,热液流体带来的深部物质可以促进沉积有机质的富集^[4-5],热液提供的热能可以促进烃源岩演化和油气运移^[2,6],热液的溶蚀作用和热液矿物的沉淀可以改变储层的储集性能^[3,7]等。

鄂尔多斯盆地上三叠统延长组7段(长7段)是中国最重要的页岩油储层之一,具有重大油气勘探开发潜力,目前已实现页岩油的规模化效益开发^[8]。近年来,长7段页岩的热液作用受到了越来越多的关注,众多学者对延长期火山活动和深部热液注入导致的“肥沃效应”开展了广泛研究^[4-5,9-10]。研究表明,湖底热液的注入是触发生物勃发的关键因素之一,热液流体不仅为沉积水体输送了生物所需的营养物质,还将水体温度提高到更适宜生物生长的水平,进而促进了生物的繁盛和古生产力的提高;此外,热液带来的还原性物质促进了湖底缺氧还原环境的形成,有利于沉积有机质的保存^[4-5,9-10]。目前这些研究主要聚焦于沉积期热液作用,而热液则主要来源于晚三叠世延长期的火山活动^[11]。

事实上,除晚三叠世延长期外,鄂尔多斯盆地在早侏罗世延安期、中侏罗世直罗期和早白垩世东胜期也发生了火山活动^[12],因此,长7段在埋藏期同样可能受到深部热液的影响。埋藏阶段的热液活动对有机质、成岩和孔隙演化均可能发挥关键作用^[2-3,6-7]。然而,目前针对长7段埋藏期热液作用的研究非常有限,对于热液活动的期次、时代及其对页岩油储层的影响等方

面,认识还不够深入。本文聚焦长7段页岩油储层中的热液黄铁矿以及固相和流体包裹体,采用光学和电子显微镜观测、电子探针分析、激光拉曼光谱分析、包裹体均一温度分析、埋藏史-热演化史模拟等手段,针对埋藏期热液活动特征及其对页岩油储层的影响开展了研究,旨在为热液成岩演化史和有机质热演化史的恢复提供依据。

1 地质背景

鄂尔多斯盆地位于中国华北板块西部,是一个历经多旋回沉积-构造演化的叠合盆地,也是中国最重要的含油气盆地之一^[13]。鄂尔多斯盆地发育于太古宙麻粒岩和古元古代绿片岩之上,中-新元古代断裂活动强烈,盆地表现为裂谷盆地特征;古生代演化为稳定克拉通盆地,沉积地层以海相碳酸盐为主;中生代晚三叠世一早白垩世演化为残延的内克拉通盆地,发育碎屑岩沉积地层;晚白垩世-新生代,鄂尔多斯盆地周边断陷发育,盆地进入整体隆升的阶段,最终形成了现今的构造格局^[13-15]。鄂尔多斯盆地可分为伊盟隆起、西缘逆冲带、天环坳陷、伊陕斜坡、晋西挠褶带和渭北隆起共6个次级构造单元(图1a)^[16-17]。

鄂尔多斯盆地发生多次构造热事件,这主要受控于岩石圈深部强烈的热活动,地幔的底侵作用、岩浆的侵入与喷发以及热液活动促进了异常地温场的形成^[15]。鄂尔多斯盆地在中生代的热液活动主要受4期火山活动的影响,分别发生于晚三叠世延长期、早侏罗世延安期、中侏罗世直罗期和早白垩世东胜期^[11-12]。野外和钻井资料表明,中生代4期火山活动均发生于

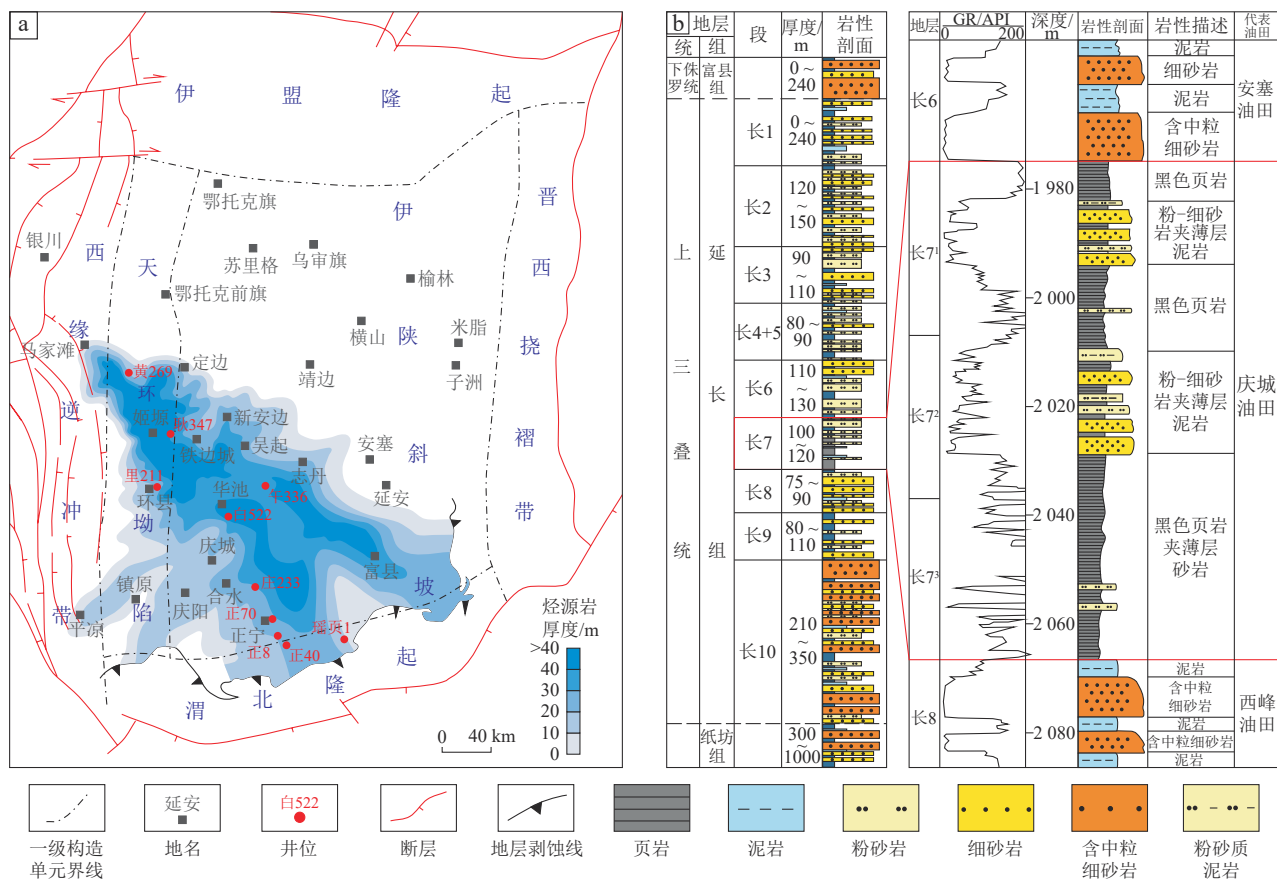


图1 鄂尔多斯盆地长7段烃源岩和取样井分布(a)以及延长组地层特征(b)(修改自文献[16-17])

Fig. 1 The distribution of source rocks and sampling wells for the Chang 7 Member (a) and the stratigraphic column of the Yanchang Formation (b), Ordos Basin (modified after references[16-17])

盆地边缘的造山带附近;相比于盆缘,盆地内部比较稳定,其刚性的基底未发生火山活动^[12]。盆地边缘广泛发育深大断裂,沟通了中-下地壳与沉积盖层,为深部热液的垂向上涌提供了通道^[12,18-19]。尽管盆地内部相对稳定,但其基底和盖层也并非完全刚性的整体,也有断裂分布^[12]。这些断裂与遍布盆地的不整合面为热液流体的横向运移提供了通道^[19]。

鄂尔多斯盆地在晚三叠世演化为大型内陆拗陷湖盆,在来自盆地周围造山高地的物源供给下,盆内形成了一套河湖-三角洲相沉积,即延长组建造^[14,20]。延长组自上而下可分为长1段—长10段共10个地层单元(图1b),其中长7段为本文的主要研究层段。长7段沉积于鄂尔多斯盆地中生代最大湖泛期,该期湖泊热流体作用强烈,藻类和浮游生物繁盛,古生产力高,盆内沉积了一套以黑色页岩和暗色泥岩为主的富有机质生油岩系^[21]。长7段自上而下可进一步分为长7¹、长7²和长7³亚段,其中长7¹亚段和长7²亚段主要为粉-细砂岩与泥页岩互层,长7³亚段以黑色页岩为主,部分层段夹有薄层砂岩^[16]。

2 实验样品与方法

本文中的实验样品为鄂尔多斯盆地长7段岩心,采自图1a所示的10口井中,并由岩心样品制备岩石薄片600余张。薄片的显微观测基于光学和电子显微镜。电子显微镜型号为FEI Quanta 650 FEG,观测时,采用25 kV的加速电压对样品进行二次电子和背散射电子成像,并通过能谱分析关键组分的元素组成,推断岩石组分类型。包裹体均一温度测试基于Linkam THMS600型冷热台,设备测温范围为-196~600℃,测试精度为±1℃;在实验过程中,当流体包裹体接近均一时,升温速率控制在1℃/min以内。碎屑颗粒中的不透明固相包裹体鉴定基于显微激光拉曼光谱分析,设备型号为Renishaw inVia Reflex,激发波长为532 nm,物镜放大倍数为100倍。有机质成熟度的测定基于TIDAS MSP400分光光度计,测试方法遵循中国石油天然气行业标准SY/T 5124—2012。为确定长7段页岩中各类黄铁矿的成因,本次还采用JXA 8100型

电子探针对黄铁矿进行了显微元素分析,加速电压为25 kV,束流为60 nA,分析束斑直径为1 μm 。

3 结果与讨论

3.1 热液黄铁矿形态、分布特征和地球化学证据

前人研究表明,鄂尔多斯盆地长7段页岩油储层中发育多种热液矿物,如萤石、重晶石和闪锌矿等^[22-24],证明了长7段确实曾受到热液作用的影响。值得注意的是,储层中还发育了多种类型的黄铁矿,其中有些黄铁矿也可能是在热液作用下的产物,它们的形态和分布特征可能为热液活动的研究提供重要依据,因此,本次对长7段页岩中的热液黄铁矿进行了系统研究。

光学和电子显微镜观测结果表明,长7段页岩油储层中的黄铁矿主要为草莓状黄铁矿(图2a)和自形微晶黄铁矿(图2b),这两类黄铁矿在富有机质泥页岩中非常发育,前人对此已有较多的研究,认为其形成主要与硫酸盐还原细菌的活动有关^[25-27]。除草莓状和自形微晶黄铁矿外,长7段中还可观察到其他类型的黄铁矿,包括脉状或团块状黄铁矿(图2c)、透镜状黄铁矿(图2d)、他形-半自形散布状黄铁矿(图2e)和半自

形-自形斑块状黄铁矿(图2f)等。为确定其成因,本文对其形态、分布和地球化学特征进行了分析。

脉状或团块状黄铁矿主要充填于溶蚀孔缝,其形态受原始孔隙空间限制,自形程度较低(图2c),这类黄铁矿常见于碳酸盐矿物含量较高的层段,表明热液流体对储层具有强烈的溶蚀作用。透镜状黄铁矿主要存在于页岩的层间缝中,同样具有较低的自形程度(图2d)。他形-半自形散布状黄铁矿多见于泥页岩中,主要充填基质孔隙,偶见其交代长石的现象(图2e)。斑块状黄铁矿多为半自形-自形晶相互嵌合的集合体,主要充填于碎屑岩的孔隙中,对长石等碎屑矿物的交代作用十分强烈(图2f)。黄铁矿中的Co/Ni元素含量比值常用来指示其成因,Co/Ni比值小于1一般指示与沉积作用、大气降水、地层水有关的黄铁矿,而在火山或岩浆热液成因的黄铁矿中,Co/Ni比值通常大于1^[28-29]。电子探针分析表明,上述4类黄铁矿中的Co/Ni比值均大于1(部分结果列于表1),测试结果支持其为热液作用的产物。

根据鄂尔多斯盆地的热液活动背景^[11-12],上述热液黄铁矿可能为不同时期热液活动的产物。基于黄铁矿与围岩之间的关系,可以推测其大致的形成阶段。透镜状黄铁矿核部上覆纹层相对较薄,两翼上覆纹层相对较厚(图2d),这表明其形成于强烈压实作用之前,

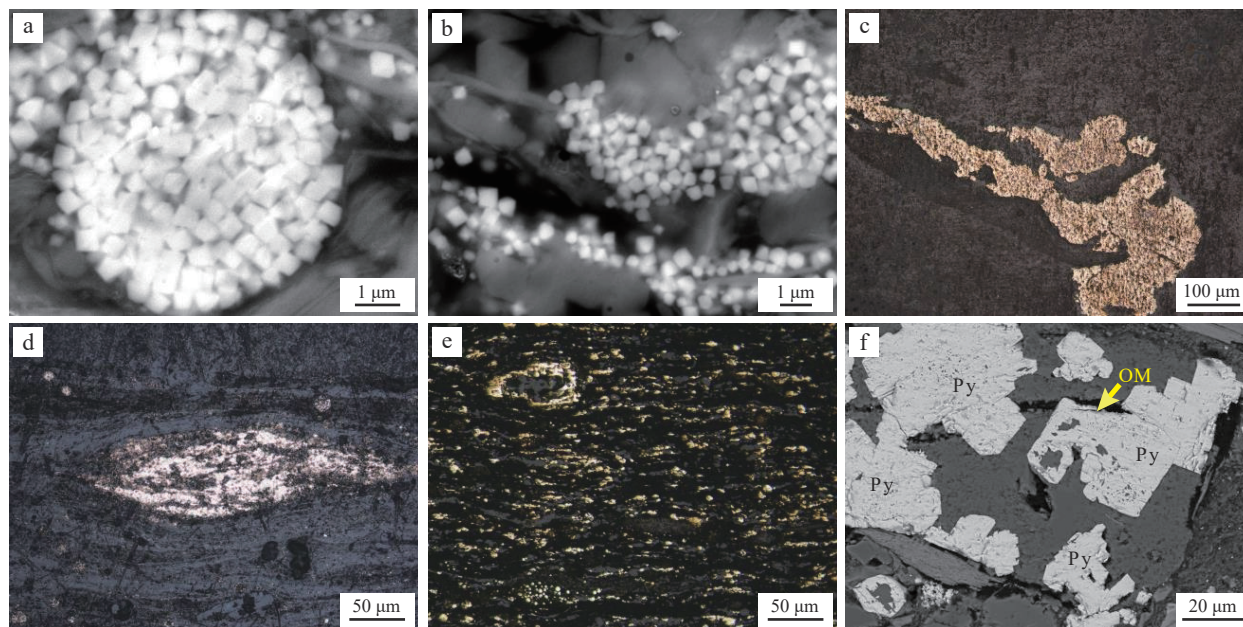


图2 鄂尔多斯盆地长7段页岩中不同显微特征的黄铁矿

Fig. 2 Pyrite with different microscopic characteristics in the Chang 7 shale, Ordos Basin

a. 草莓状黄铁矿,瑶页1井,埋深224.0 m,扫描电镜照片;b. 自形微晶黄铁矿,瑶页1井,埋深224.0 m,扫描电镜照片;c. 脉状和团块状黄铁矿,黄269井,埋深2492.4 m,反射光照片;d. 充填页岩层间缝的透镜状黄铁矿,可观察到其核部上覆纹层较薄,两翼上覆纹层较厚,耿347井,埋深2368.7 m,反射光照片;e. 散布于页岩基质之间的他形-半自形黄铁矿,正40井,埋深1437.6 m,反射光照片;f. 斑块状黄铁矿(Py),多为半自形-自形晶相互嵌合的集合体,可见黄铁矿切割储层沥青(OM)脉的现象,瑶页1井,埋深238.4 m,扫描电镜照片

表 1 鄂尔多斯盆地长 7 段页岩中不同类型热液黄铁矿的 Co 和 Ni 元素含量

Table 1 Co and Ni contents in different types of hydrothermal pyrite in the Chang 7 shale, Ordos Basin

井号	深度/m	黄铁矿形态	Co 含量/%	Ni 含量/%	Co/Ni
黄 269	2 492.4	脉状或团块状	0.064	DL	≥1
黄 269	2 492.4	脉状或团块状	0.074	0.010	7.40
黄 269	2 492.4	脉状或团块状	0.080	0.064	1.25
耿 347	2 368.7	透镜状	0.068	DL	≥1
耿 347	2 368.7	透镜状	0.078	0.027	2.89
耿 347	2 368.7	透镜状	0.069	DL	≥1
正 40	1 437.6	散布状	0.079	DL	≥1
正 40	1 437.6	散布状	0.068	DL	≥1
正 40	1 437.6	散布状	0.069	DL	≥1
瑶页 1	238.4	斑块状	0.071	DL	≥1
瑶页 1	238.4	斑块状	0.078	0.008	9.75
瑶页 1	238.4	斑块状	0.069	DL	≥1

注:测试基于电子探针分析,表中仅列出部分测试数据。

DL 为低于检出限;Co 检出限为 35 μg/g(1σ);Ni 检出限为 23 μg/g(1σ)。

推测此类黄铁矿主要为成岩阶段早期的产物。在下伏于黑色页岩的粉砂岩中,可见大量热液黄铁矿,且越接近顶部的岩性界面,黄铁矿含量越高,然而在顶部页岩中却未见热液矿物(图 3a,c),这表明顶部页岩较为致密,起到了良好的盖层作用,热液未能注入其内部。黑色页岩裂缝的顶、底两侧均发育散布状黄铁矿,随着到裂缝距离的增大,黄铁矿含量逐渐减少(图 3b,d—f),这表明热液通过裂缝注入页岩,并在页岩内部运移了

一定距离。根据黄铁矿呈散布状充填基质孔的特点(图 3d—f),推测热液流体注入发生于成岩阶段早期,页岩未经历强烈压实,原始孔隙度高,孔隙连通性好;而当热液活动发生于相对较晚的成岩阶段,页岩在强烈的压实作用下变得致密(图 3c),热液流体难以注入。前人研究表明,页岩在早成岩阶段初期的孔隙度较高,其致密化主要发生于早成岩阶段末期—中成岩阶段初期(镜质体反射率 $R_o=0.40\% \sim 0.55\%$ ^[30]),因此,图 3d 中的黄铁矿更可能形成于准同生—早成岩阶段初期,而图 3c 中的黄铁矿更可能形成于早成岩阶段末或更晚的时期。

由此可见,鄂尔多斯盆地长 7 段在埋藏期可能至少存在两期热液活动。同时也表明,在开展长 7 段热液沉积作用的研究时,有必要识别和排除埋藏期热液作用对地质和地化指标的潜在干扰,对热液矿物及其与围岩的关系进行显微分析可能是排除数据干扰的有效手段之一。

3.2 黄铁矿包裹体与伴生盐水包裹体特征及其指示意义

矿物在生长的过程中,可以捕获外来的气、液、固相物质,形成包裹体。长 7 段碎屑夹层中可见不透明的固相包裹体(图 4a),显微激光拉曼光谱测试结果表明其主要为黄铁矿包裹体。分析结果显示,黄铁矿包裹体的拉曼光谱同时具有石英(宿主矿物)和黄铁矿的

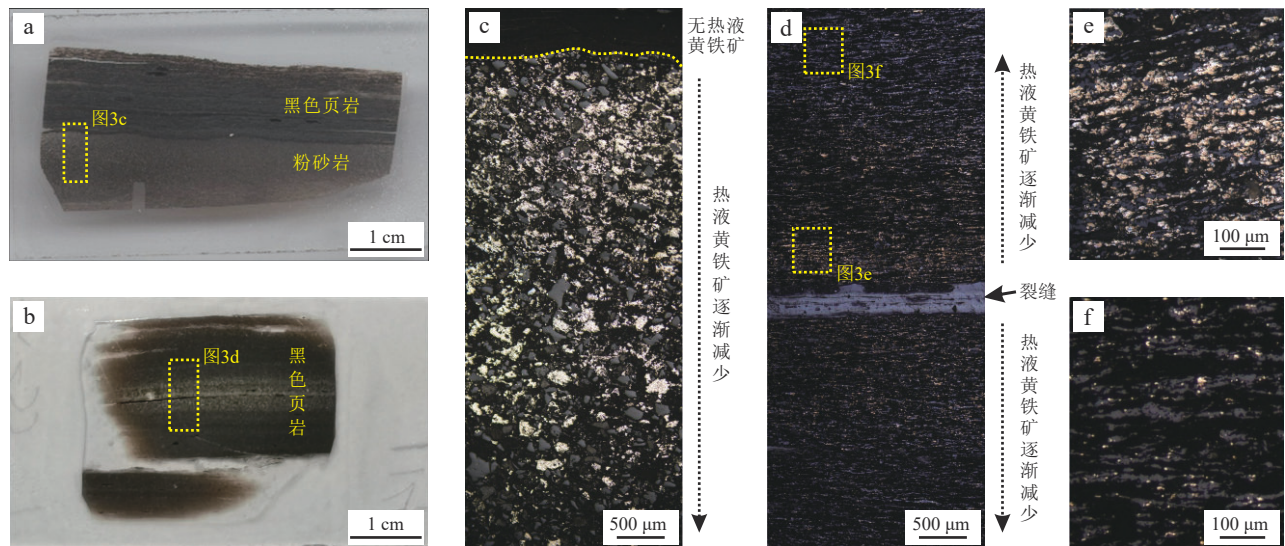


图 3 鄂尔多斯盆地长 7 段热液黄铁矿在黑色页岩和粉砂岩中的分布显微照片

Fig. 3 Distribution of hydrothermal pyrite in black shale and siltstone in the Chang 7 Member, Ordos Basin

a. 薄片扫描,瑶页 1 井,埋深 214.2 m;b. 薄片扫描,庄 233 井,埋深 1 824.1 m;c. 黑色页岩中未见热液黄铁矿,粉砂岩中可见大量斑块状黄铁矿,其含量自岩性界面向下逐渐减少,反射光,拍摄位置见图 a;d. 黑色页岩中可见大量斑点状黄铁矿,其含量从裂缝向顶、底两侧逐渐减少,反射光,拍摄位置见图 b;e. 距裂缝较近处黄铁矿含量高,反射光,拍摄位置见图 d;f. 距裂缝较远处黄铁矿含量低,反射光,拍摄位置见图 d

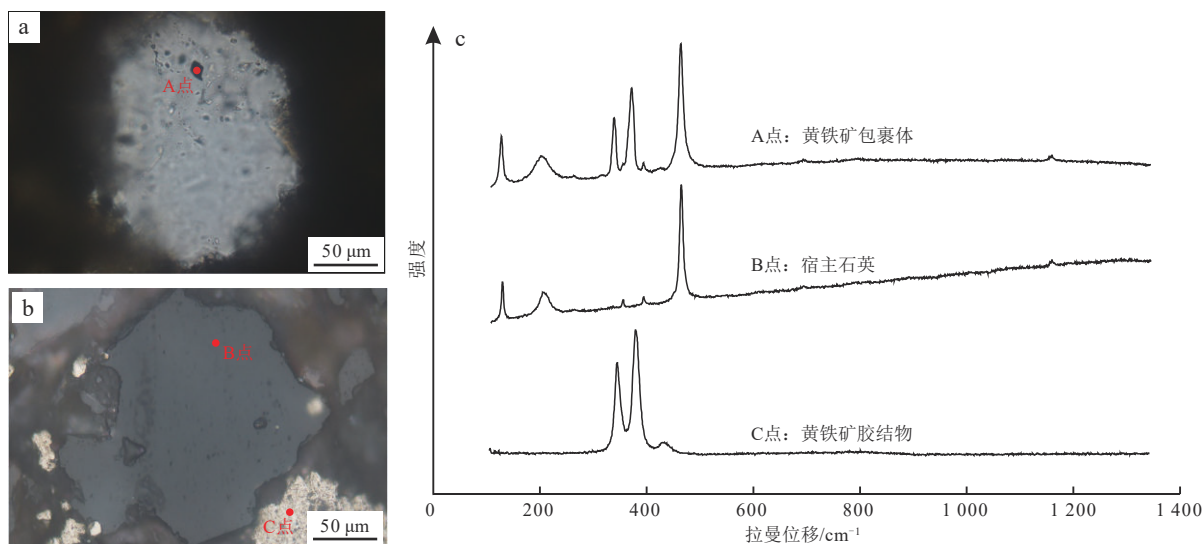


图4 鄂尔多斯盆地长7段黄铁矿包裹体、宿主石英和黄铁矿胶结物的显微拉曼光谱分析位置及结果

Fig. 4 Micro-Raman spectrum analysis position and results of pyrite inclusions, host quartz and pyrite cement in the Chang 7 Member, Ordos Basin

a. 测试位置(A点)为黄铁矿包裹体,透射光显微照片;b. 测试位置(B和C点)为宿主石英和黄铁矿胶结物,反射光显微照片;c. 拉曼光谱分析结果

特征峰(图4a—c)。这些黄铁矿包裹体既有可能是宿主矿物在成岩阶段的生长过程中所捕获的,也有可能先前就存在于陆源输入的碎屑颗粒中。为确定其成因,定量分析了黄铁矿胶结物与黄铁矿包裹体发育程度之间的关系。如图5所示,在不同显微视域中,黄铁矿胶结物面积的百分比与含黄铁矿包裹体的碎屑颗粒占总颗粒数的百分比具有明显的正相关关系,尤其是在缺乏黄铁矿胶结物的视域中,黄铁矿包裹体也十分

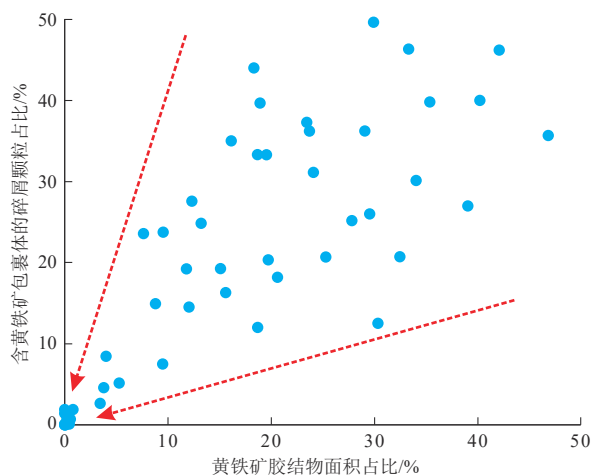


图5 鄂尔多斯盆地长7段黄铁矿胶结物与黄铁矿包裹体发育程度之间的关系

Fig. 5 Relationship between the development of pyrite cements and pyrite inclusions in the Chang 7 Member, Ordos Basin
(在长7段碎屑岩夹层中,含黄铁矿包裹体的碎屑颗粒数占总颗粒数的比值与黄铁矿胶结物的面积占比具有正相关关系,缺乏黄铁矿胶结物的视域同样不发育黄铁矿包裹体,证明黄铁矿包裹体是成岩阶段的产物。)

罕见。由此可以推断,黄铁矿包裹体是成岩阶段的产物,因此其特征可以用来指示成岩过程。

前人研究表明,分布在同一条愈合缝中的烃类和盐水包裹体极有可能为同期伴生包裹体,其中盐水包裹体的均一温度常用来反映烃类包裹体的最小捕获温度^[31-32],这一思想同样可以应用到储层固相包裹体的研究中。长7段中常见分布于同一条愈合缝的串珠状黄铁矿包裹体(图6a),一些愈合缝中可见与黄铁矿包裹体伴生的盐水包裹体(图6b,c),其均一温度可以指示黄铁矿包裹体的最小捕获温度。在瑶页1井中,与黄铁矿伴生的盐水包裹体均一温度为150.7~270.5℃(n=14)。根据前人对鄂尔多斯盆地古地温剥蚀量的研究^[33],瑶页1井在早白垩世末期的埋深达到最大值(约1700m),结合古地温资料^[15,34],瑶页1井长7段达最大埋深时的古地温约为91℃,显著低于盐水包裹体均一温度,进一步印证了黄铁矿为热液成因。包裹体均一温度还表明,侵入长7段的热液温度最高可达270.5℃以上。该结果与区域热液活动背景相符,例如,前人对热液白云石的研究显示,注入鄂尔多斯盆地马家沟组的热液温度可达300℃以上^[35-36]。

3.3 长7段页岩埋藏史-热演化史恢复

在探讨埋藏期热液活动对长7段页岩油储层的影响前,需要首先明确未经热液强烈改造下的埋藏史和热演化史。鄂尔多斯盆地中生代的热液流体主要形成于4期火山活动,均发生于盆地边缘的造山带附近,热

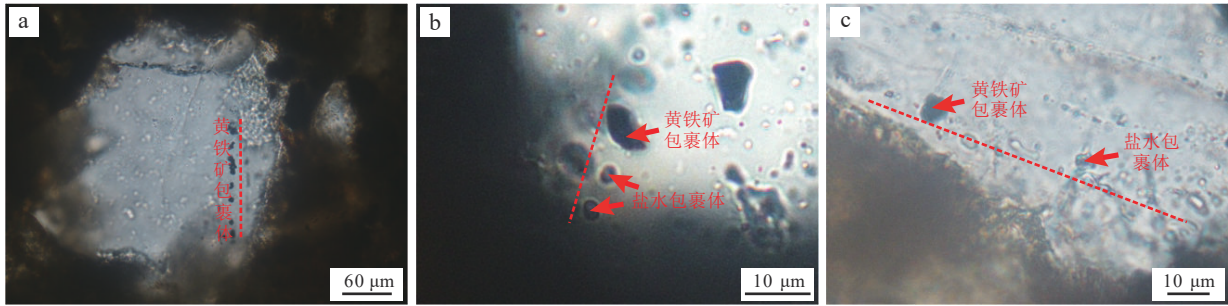


图6 鄂尔多斯盆地长7段黄铁矿包裹体及其伴生盐水包裹体显微照片

Fig. 6 Pyrite inclusions and associated aqueous inclusions in the Chang 7 Member, Ordos Basin shown in micrographs

a. 同一条石英愈合缝中的串珠状黄铁矿包裹体, 瑶页1井, 埋深225.8 m, 透射光; b, c. 同一条石英愈合缝中的黄铁矿包裹体和伴生盐水包裹体, 瑶页1井, 埋深214.2 m, 透射光

液流体主要沿盆缘的深大断裂向上运移并注入沉积盖层^[11-12, 18-19], 因此盆地边缘的地层可能受到了热液作用更强烈的影响。白522井远离盆地边缘, 受热液影响相对较小, 且基本位于页岩分布区的中部(图1a), 在研究区内具有一定的代表性。因此, 本次针对白522井开展埋藏史-热演化史研究。根据鄂尔多斯盆地构造演化史分析, 研究区整体发生了4期剥蚀事件, 分别开始于三叠纪末、中侏罗世末、侏罗纪末和白垩纪末, 白522井区各不整合面的剥蚀厚度为96~910 m^[33]。根据地层的剥蚀量, 结合白522井地层分层、岩性组成及鄂尔多斯盆地南部的古地温资料^[15, 17, 34], 应用Basinmod软件对白522井进行埋藏史-热演化史模拟, 结果如图7a所示, 有机质成熟度的模拟结果与现今实测 R_o 相符, 证明模拟结果可靠。

在埋藏史-热演化史研究的基础上, 长7段碎屑岩中流体包裹体的均一温度进一步揭示了烃源岩对碎屑

岩夹层的油气充注史。图7b为盐水包裹体均一温度的直方图, 全部盐水包裹体以及与烃类包裹体伴生的盐水包裹体均表现为双峰特征, 主峰位置基本一致, 这指示了两期硅质胶结作用可能与油气充注密切相关, 其中的硅质可能来源于有机酸对长石的溶蚀作用^[37]。埋藏史-热演化史表明(图7a), 长7段页岩大约在早白垩世早期进入成熟阶段($R_o > 0.5\%$), 碎屑岩夹层中的两期油气充注主要发生于早白垩世早期和早白垩世中末期。

3.4 热液活动对页岩油储层的影响

热液作用对有机质热演化和油气的勘探开发均具有重要意义。在早成岩阶段, 热液提供的热能可以促进未熟有机质的成熟。在中成岩阶段, 热液作用一方面可以提高烃源岩的生烃强度, 其升温作用和携带的 CO_2 和 H_2S 等挥发组分可以促进原油黏度和油水界面

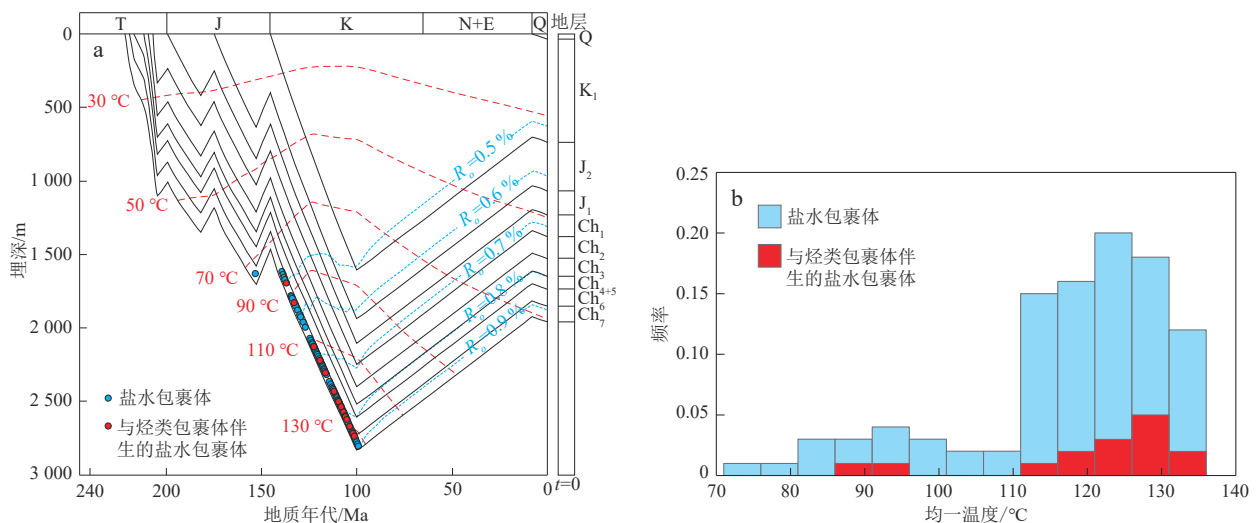


图7 鄂尔多斯盆地白522井埋藏史-热演化史(a)和包裹体均一温度直方图(b)

Fig. 7 Burial-thermal evolution history (a) and homogenization temperature histogram of aqueous inclusions (b) in well B522 in the Ordos Basin

张力的降低^[2],有利于页岩油气的开发;另一方面也可能使原油在高温下发生热蚀变^[38-39],导致油品变差。有机质热演化可以看作一个主要受控于温度和时间动力学过程^[40],不同时期注入的热液可以对有机质热演化产生不同的影响。例如,在较早的成岩阶段,较低的地层温度只能促使有机质热演化中低活化能反应的发生,如果此时有热液的注入,迅速升高的温度可能会促进低活化能的化学反应迅速发生,甚至反应完全;当热液活动结束后,地层温度降低至成岩域背景温度,即使地层温度在随后的埋藏过程中逐渐升高,有机质热演化也可能在相当长的时间内趋于停滞。因此,确定热液活动的时代对恢复有机质热演化史具有重要意义。

对于常规储层,根据油气充注史以及热液矿物与储层沥青的伴生或穿插关系,可以推测热液活动的年代^[11]。然而,该方法并不适用于自生自储的页岩储层。热液衍生石油(hydrothermal petroleum)的研究表明,处于未成熟阶段的有机质可以在热液作用下,快速裂解成油^[41-42]。尽管图2f显示出热液矿物与储层沥青存在穿插关系,但长7段作为生油层段,其中的原油既有可能是成熟阶段干酪根裂解形成的,也有可能是未熟有机质在热液作用下快速诱导形成的,因此,要推测热液活动发生的年代,还需要有其他证据。如前文所述,瑶页1井中的泥页岩对热液流体起到了良好的盖层作用(图3c),这指示热液流体注入时,页岩已在压实作用下完成了致密化,热液黄铁矿可能形成于早成岩阶段末或更晚的时期。结合瑶页1井的埋藏-热演化模拟结果(图8)和研究区热液活动背景^[11-12]推断,上

述黄铁矿可能是早白垩世东胜期的热液作用产物。

瑶页1井的埋藏史模拟基于现今的埋藏深度、前人恢复的古剥蚀厚度和古埋藏深度数据^[33],热演化模拟基于鄂尔多斯盆地南部的古温度数据(图8),由于未考虑注入井区的热液对热演化的影响,模拟得到的现今最高成熟度($R_o' = 0.57\%$)低于实测最高成熟度($R_o = 0.70\%$),表明热液的升温作用确实促进了有机质的热演化。但值得注意的是,注入瑶页1井区的热液流体最高温度可达270.5℃以上,而现今 R_o 仅为0.70%,这表明注入的热液可能经历了较快的降温过程,高温阶段维持的时间十分有限。对此,尝试通过Easy% R_o 动力学模型^[40]计算不同温度下热液流体对有机质热演化的影响。

根据前人对鄂尔多斯盆地早白垩世构造热事件的研究^[15],瑶页1井中的热液黄铁矿可能形成于140~100 Ma(图8)。为获取热液注入地层后降温速率的下限,计算了热液尽可能促进热演化的极端情况,即热液于140 Ma注入地层,地层快速升温到270.5℃以上,随后降温至成岩域背景温度(约65.8℃,图8),这一过程促使 R_o 由0.41%(图8)升高至0.70%。需要注意的是,地层温度的降低过程是一个与时间有关的复杂非线性函数,直接计算地层的降温速率是十分困难的,但仍可以通过一定的假设,计算地温在特定范围内维持时间的上限。Easy% R_o 模型计算结果表明,有机质在恒温270.5℃(地温最高温度下限)的环境中演化至目标成熟度($R_o = 0.70\%$)的时间约为652 h,这证明了热液注入后的地层温度不可能长期处于较高水平,维持在高于270.5℃范围内的时间远小于652 h。另外,有机质在恒温204.7℃(最高地温与成岩域之中值温度的下限)的环境中演化至目标成熟度的时间约为0.002 7 Ma,表明地温降至中值温度的时间远小于0.002 7 Ma。由此可见,注入瑶页1井区的高温热液确实具有相对较快的降温速率,这可能是页岩有机质热演化程度较低的重要原因之一。鄂尔多斯盆地长7段的有机质热演化可能同时受到埋藏作用和热液作用的影响,然而,长7段 R_o 一般在0.6%~1.2%^[24, 43-44],且 R_o 小于1.0%的区域约占页岩总分布区的90%^[24]。有限的成熟度表明,高温热液对长7段有机质热演化的影响可能整体不强,对此,有必要对盆地不同地区的热液作用开展更加深入的研究。

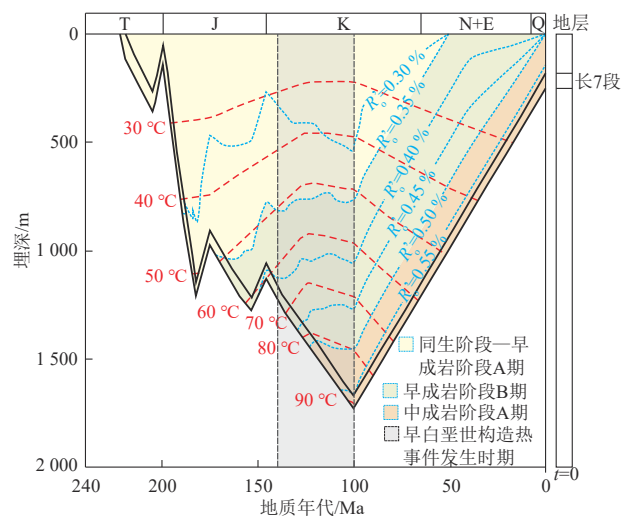


图8 鄂尔多斯盆地瑶页1井埋藏-热演化模拟结果

Fig. 8 Simulation results of burial and thermal evolution of well Yy1 in the Ordos Basin

4 结论

1) 鄂尔多斯盆地长7段中发育多种类型的黄铁

矿,其中,脉状或团块状、透镜状、他形-半自形晶散布状和半自形-自形晶斑块状黄铁矿的Co/Ni元素含量比值大于1,指示其为热液作用下的产物。

2) 长7段在埋藏期至少存在两期热液活动,其中一期可推断为早白垩世东胜期,因此,在开展热液沉积作用的研究时,有必要通过显微观测等手段,识别和排除埋藏期热液作用对地质和地化指标的潜在干扰。

3) 注入瑶页1井区长7段的热液最高温度可达270.5℃以上,热液提供的热能对有机质生、排烃起到了一定的促进作用。但是,相对较低的有机质热演化程度($R_o = 0.70\%$)表明,热液注入后可能经历了较快的降温过程,地层温度维持在高于270.5℃范围内的时间远小于652 h,地层温度降低至最高温与成岩域之间中值温度的时间远小于0.002 7 Ma。

参 考 文 献

- [1] DAVIES G R, SMITH L B, Jr. Structurally controlled hydrothermal dolomite reservoir facies: An overview [J]. AAPG Bulletin, 2006, 90(11): 1641-1690.
- [2] 金之钧,朱东亚,孟庆强,等. 塔里木盆地热液流体活动及其对油气运移的影响[J]. 岩石学报, 2013, 29(3): 1048-1058.
JIN Zhijun, ZHU Dongya, MENG Qingqiang, et al. Hydrothermal activities and influences on migration of oil and gas in Tarim Basin [J]. Acta Petrologica Sinica, 2013, 29(3): 1048-1058.
- [3] 赵文智,沈安江,胡安平,等. 塔里木、四川和鄂尔多斯盆地海相碳酸盐岩规模储层发育地质背景初探[J]. 岩石学报, 2015, 31(11): 3495-3508.
ZHAO Wenzhi, SHEN Anjiang, HU Anping, et al. A discussion on the geological background of marine carbonate reservoirs development in Tarim, Sichuan and Ordos Basin, China [J]. Acta Petrologica Sinica, 2015, 31(11): 3495-3508.
- [4] QIU Xinwei, LIU Chiyang, MAO Guangzhou, et al. Major, trace and platinum-group element geochemistry of the Upper Triassic nonmarine hot shales in the Ordos Basin, Central China [J]. Applied Geochemistry, 2015, 53: 42-52.
- [5] YANG Hua, ZHANG Wenzheng, WU Kai, et al. Uranium enrichment in lacustrine oil source rocks of the Chang 7 member of the Yanchang Formation, Ordos Basin, China [J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2010, 39(4): 285-293.
- [6] ZHU Dongya, JIN Zhijun, HU Wenxuan, et al. Effect of igneous activity on hydrocarbon source rocks in Jiyang sub-basin, eastern China [J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2007, 59(3/4): 309-320.
- [7] OCHOA M, ARRIBAS J, MAS R, et al. Destruction of a fluvial reservoir by hydrothermal activity (Camerons Basin, Spain) [J]. Sedimentary Geology, 2007, 202(1/2): 158-173.
- [8] 付金华,李士祥,侯雨庭,等. 鄂尔多斯盆地延长组7段II类页岩油风险勘探突破及其意义[J]. 中国石油勘探, 2020, 25(1): 78-92.
- FU Jinhua, LI Shixiang, HOU Yuting, et al. Breakthrough of risk exploration of Class II shale oil in Chang 7 member of Yanchang Formation in the Ordos Basin and its significance [J]. China Petroleum Exploration, 2020, 25(1): 78-92.
- [9] 袁伟,柳广弟,徐黎明,等. 鄂尔多斯盆地延长组7段有机质富集主控因素[J]. 石油与天然气地质, 2019, 40(2): 326-334.
YUAN Wei, LIU Guangdi, XU Liming, et al. Main controlling factors for organic matter enrichment in Chang 7 member of the Yanchang Formation, Ordos Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2019, 40(2): 326-334.
- [10] 张文正,杨华,解丽琴,等. 湖底热水活动及其对优质烃源岩发育的影响——以鄂尔多斯盆地长7烃源岩为例[J]. 石油勘探与开发, 2010, 37(4): 424-429.
ZHANG Wenzheng, YANG Hua, XIE Liqin, et al. Lake-bottom hydrothermal activities and their influences on the high-quality source rock development: A case from Chang 7 source rocks in Ordos Basin [J]. Petroleum Exploration and Development, 2010, 37(4): 424-429.
- [11] 雷涵,黄文辉,伊硕,等. 鄂尔多斯盆地南部奥陶系马家沟组五段白云岩埋藏溶蚀作用研究[J]. 古地学报, 2020, 22(6): 1041-1052.
LEI Han, HUANG Wenhui, YI Shuo, et al. Dissolution characteristics of deep-buried dolostone in the Member 5 of Ordovician Majiagou Formation in southern Ordos Basin [J]. Journal of Palaeogeography, 2020, 22(6): 1041-1052.
- [12] 李明,高建荣. 鄂尔多斯盆地基底断裂与火山岩的分布[J]. 中国科学(地球科学), 2010, 40(8): 1005-1013.
LI Ming, GAO Jianrong. Basement faults and volcanic rock distributions in the Ordos Basin [J]. Science China Earth Sciences, 2010, 40(8): 1005-1013.
- [13] 杨鹏,任战利, ZHAO Jianxin, 等. 方解石原位U-Pb测年结合磷灰石裂变径迹方法约束鄂尔多斯盆地西南部构造演化[J]. 石油与天然气地质, 2021, 42(5): 1189-1201.
YANG Peng, REN Zhanli, ZHAO Jianxin, et al. Tectonic evolution analysis constrained jointly by in-situ calcite U-Pb dating and apatite fission track for southwestern Ordos Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2021, 42(5): 1189-1201.
- [14] 贺聪,吉利明,苏奥,等. 鄂尔多斯盆地南部延长组热水沉积作用与烃源岩发育的关系[J]. 地学前缘, 2017, 24(6): 277-285.
HE Cong, JI Liming, SU Ao, et al. Relationship between hydrothermal sedimentation process and source rock development in the Yanchang Formation in southern Ordos Basin [J]. Earth Science Frontiers, 2017, 24(6): 277-285.
- [15] 刘池洋,王建强,邱欣卫,等. 鄂尔多斯盆地延长期富烃坳陷形成的动力学环境与构造属性[J]. 岩石学报, 2020, 36(6): 1913-1930.
LIU Chiyang, WANG Jianqiang, QIU Xinwei, et al. Geodynamic environment and tectonic attributes of the hydrocarbon-rich sag in

- Yanchang Period of Middle-Late Triassic, Ordos Basin [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2020, 36(6): 1913–1930.
- [16] 付金华, 李士祥, 郭芪恒, 等. 鄂尔多斯盆地陆相页岩油富集条件及有利区优选[J]. *石油学报*, 2022, 43(12): 1702–1716.
FU Jinhua, LI Shixiang, GUO Qiheng, et al. Enrichment conditions and favorable area optimization of continental shale oil in Ordos Basin [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2022, 43(12): 1702–1716.
- [17] 郭凯. 鄂尔多斯盆地陇东地区长7段有效烃源岩及生排烃研究[J]. *石油实验地质*, 2017, 39(1): 15–23.
GUO Kai. Active source rocks of Chang 7 member and hydrocarbon generation and expulsion characteristics in Longdong area, Ordos Basin [J]. *Petroleum Geology and Experiment*, 2017, 39(1): 15–23.
- [18] 刘行军, 冯春珍, 柳益群, 等. 陕北长6段高自然伽马砂岩地球化学特征及意义[J]. *成都理工大学学报(自然科学版)*, 2013, 40(4): 445–456.
LIU Hengjun, FENG Chunzhen, LIU Yiqun, et al. Geochemical characteristics and significance of Chang 6 high natural gamma ray sandstones in Yanchang Formation in North of Shaanxi, China [J]. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 2013, 40(4): 445–456.
- [19] 张景廉, 石兰亭, 卫平生, 等. 鄂尔多斯盆地深部地壳构造特征与油气成藏[J]. *新疆石油地质*, 2009, 30(2): 272–278.
ZHANG Jinglian, SHI Lanting, WEI Pingsheng, et al. Deep crustal structure and hydrocarbon accumulation in Ordos Basin [J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 2009, 30(2): 272–278.
- [20] 陈安清, 陈洪德, 侯明才, 等. 鄂尔多斯盆地中一晚三叠世事件沉积对印支运动 I 幕的指示[J]. *地质学报*, 2011, 85(10): 1681–1690.
CHEN Anqing, CHEN Hongde, HOU Mingcai, et al. The Middle-Late Triassic event sediments in Ordos Basin: Indicators for episode I of the Indosinian movement [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2011, 85(10): 1681–1690.
- [21] 刘显阳, 李士祥, 郭芪恒, 等. 鄂尔多斯盆地延长组长7₃亚段泥页岩层系岩石类型特征及勘探意义[J]. *天然气地球科学*, 2021, 32(8): 1177–1189.
LIU Xianyang, LI Shixiang, GUO Qiheng, et al. Characteristics of rock types and exploration significance of the shale strata in the Chang 7₃ sub-member of Yanchang Formation, Ordos Basin [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2021, 32(8): 1177–1189.
- [22] ZHANG Wenzheng, YANG Hua, XIE Liqin, et al. Lake-bottom hydrothermal activities and their influence on high-quality source rock development: A case from Chang 7 source rocks in Ordos Basin [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2010, 37(4): 424–429.
- [23] 李荣西, 段立志, 陈宝赞, 等. 鄂尔多斯盆地三叠系延长组砂岩钠长石化与热液成岩作用研究[J]. *岩石矿物学杂志*, 2012, 31(2): 173–180.
LI Rongxi, DUAN Lizhi, CHEN Baoyun, et al. Albitization and hydrothermal diagenesis of Yanchang oil sandstone reservoir, Ordos Basin [J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 2012, 31(2): 173–180.
- [24] 赵文智, 朱如凯, 胡素云, 等. 陆相富有机质页岩与泥岩的成藏差异及其在页岩油评价中的意义[J]. *石油勘探与开发*, 2020, 47(6): 1079–1089.
ZHAO Wenzhi, ZHU Rukai, HU Suyun, et al. Accumulation contribution differences between lacustrine organic-rich shales and mudstones and their significance in shale oil evaluation [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2020, 47(6): 1079–1089.
- [25] WILKIN R T, BARNES H L. Formation processes of framboidal pyrite [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1997, 61(2): 323–339.
- [26] BERNER R A. Sedimentary pyrite formation: An update [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1984, 48(4): 605–615.
- [27] 李森, 朱如凯, 崔景伟, 等. 鄂尔多斯盆地长7段细粒沉积岩特征与古环境——以铜川地区瑶页1井为例[J]. *沉积学报*, 2020, 38(3): 554–570.
LI Sen, ZHU Rukai, CUI Jingwei, et al. Sedimentary characteristics of fine-grained sedimentary rock and paleo-environment of Chang 7 Member in the Ordos Basin: A case study from Well Yaoye 1 in Tongchuan [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2020, 38(3): 554–570.
- [28] 高华, 谢玉华, 杨亮, 等. 湖南通道地区金矿床中黄铁矿成分标型特征及对矿床成因的启示[J]. *黄金科学技术*, 2020, 28(5): 712–726.
GAO Hua, XIE Yuhua, YANG Liang, et al. Composition typomorphic characteristics of pyrite and its genetic implication for gold deposits in Tongdao county, Hunan Province [J]. *Gold Science and Technology*, 2020, 28(5): 712–726.
- [29] 严育通, 李胜荣, 贾宝剑, 等. 中国不同成因类型金矿床的黄铁矿成分标型特征及统计分析[J]. *地学前缘*, 2012, 19(4): 214–226.
YAN Yutong, LI Shengrong, JIA Baojian, et al. Composition typomorphic characteristics and statistic analysis of pyrite in gold deposits of different genetic types [J]. *Earth Science Frontiers*, 2012, 19(4): 214–226.
- [30] MASTALERZ M, SCHIMMELMANN A, DROBNIK A, et al. Porosity of Devonian and Mississippian New Albany Shale across a maturation gradient: Insights from organic petrology, gas adsorption, and mercury intrusion [J]. *AAPG Bulletin*, 2013, 97(10): 1621–1643.
- [31] VOLK H, GEORGE S C. Using petroleum inclusions to trace petroleum systems—a review [J]. *Organic Geochemistry*, 2019, 129: 99–123.
- [32] 王爱国, 吴小宁, 蒲磊, 等. 对VTfline软件计算流体包裹体最小捕获压力方法中参数的研究[J]. *中国石油大学学报(自然科学版)*, 2015, 39(1): 25–32.
WANG Aiguo, WU Xiaoning, PU Lei, et al. Research on parameters in method of calculating minimum trapping pressure of fluid inclusions with VTfline software [J]. *Journal of China*

- University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2015, 39 (1): 25-32.
- [33] 陈瑞银, 罗晓容, 陈占坤, 等. 鄂尔多斯盆地中生代地层剥蚀量估算及其地质意义[J]. 地质学报, 2006, 80(5): 685-693.
CHEN Ruiyin, LUO Xiaorong, CHEN Zhankun, et al. Estimation of denudation thickness of Mesozoic strata in the Ordos Basin and its geological significance [J]. Acta Geologica Sinica, 2006, 80 (5): 685-693.
- [34] 任战利, 张盛, 高胜利, 等. 鄂尔多斯盆地热演化程度异常分布区及形成时期探讨[J]. 地质学报, 2006, 80(5): 674-684.
REN Zhanli, ZHANG Sheng, GAO Shengli, et al. Research on region of maturation anomaly and formation time in Ordos Basin [J]. Acta Geologica Sinica, 2006, 80(5): 674-684.
- [35] 张永生. 鄂尔多斯地区奥陶系马家沟群中部块状白云岩的深埋藏白云石化机制[J]. 沉积学报, 2000(3): 424-430.
ZHANG Yongsheng. Mechanism of deep burial dolomitization of massive dolostones in the Middle Majiagou Group of the Ordovician, Ordos Basin [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2000(3): 424-430.
- [36] 张景廉, 曹正林, 于均民. 白云岩成因初探[J]. 海相油气地质, 2003, 8(S1): 109-115, 10.
ZHANG Jinglian, CAO Zhenglin, YU Junmin. Discussion on the origin of dolomitization [J]. Marine Origin Petroleum Geology, 2003, 8(S1): 109-115, 10.
- [37] 黄思静, 黄可可, 冯文立, 等. 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[J]. 地球化学, 2009, 38(5): 498-506.
HUANG Sijing, HUANG Keke, FENG Wenli, et al. 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 Xujiahe Formation, western Sichuan Depression [J]. Geochimica, 2009, 38 (5): 498-506.
- [38] XU Huiyuan, LIU Quanyou, ZHU Dongya, et al. Hydrothermal catalytic conversion and metastable equilibrium of organic compounds in the Jinding Zn/Pb ore deposit [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2021, 307: 133-150.
- [39] 许汇源, 刘全有, 朱东亚, 等. 深部铅锌热液流体作用下的原油地球化学特征[J]. 石油与天然气地质, 2023, 44(1): 178-185.
XU Huiyuan, LIU Quanyou, ZHU Dongya, et al. Geochemical characteristics of crude oils under alteration of deep Pb-Zn-bearing hydrothermal fluids [J]. Oil & Gas Geology, 2023, 44 (1): 178-185.
- [40] SWEENEY J J, BURNHAM A K. Evaluation of a simple model of vitrinite reflectance based on chemical kinetics [J]. AAPG Bulletin, 1990, 74(10): 1559-1570.
- [41] SIMONEIT B R T, LONSDALE P F. Hydrothermal petroleum in mineralized mounds at the seabed of Guaymas Basin [J]. Nature, 1982, 295(5846): 198-202.
- [42] 尤继元, 柳益群, 李义军, 等. 热液衍生石油及其有机质研究[J]. 地质科技通报, 2021, 40(2): 76-87.
YOU Jiyuan, LIU Yiqun, LI Yijun, et al. Research on hydrothermal petroleum and its organic matter [J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2021, 40(2): 76-87.
- [43] 范柏江, 晋月, 师良, 等. 鄂尔多斯盆地中部三叠系延长组7段湖相页岩油勘探潜力[J]. 石油与天然气地质, 2021, 42(5): 1078-1088.
FAN Bojiang, JIN Yue, SHI Liang, et al. Shale oil exploration potential in central Ordos Basin: A case study of Chang 7 lacustrine shale [J]. Oil & Gas Geology, 2021, 42(5): 1078-1088.
- [44] 张亚雄. 鄂尔多斯盆地中部地区三叠系延长组7段暗色泥岩烃源岩特征[J]. 石油与天然气地质, 2021, 42(5): 1089-1097.
ZHANG Yaxiong. Source rock characterization: The dark mudstone in Chang 7 Member of Triassic, central Ordos Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2021, 42(5): 1089-1097.

(编辑 张玉银)