

柴达木盆地中侏罗世气候干旱化与油页岩成矿耦合机制

谢文泉¹, 谭静强², 贾建亮³, 曹涛涛¹, 王勇⁴

(1. 湖南科技大学, 湖南湘潭 411201; 2. 中南大学, 湖南长沙, 410083; 3. 中国地质科学院地质研究所, 北京 100037;

4. 湖南省地质调查所, 湖南长沙 410014)

摘要: 气候对湖泊生物发育以及沉积环境具有重要影响, 是影响油页岩成矿的重要因素。在中侏罗世晚期, 柴达木盆地气候经历了一次由湿润向干旱的重大转变。在此气候转折期, 盆地沉积了一套连续稳定的湖相油页岩。以该套油页岩为研究对象, 利用孢粉学和地球化学等手段, 探究了气候干旱化与油页岩成矿的协同演化关系。研究表明: ①石门沟组页岩段油页岩沉积于不同的干湿气候背景, 下部黑色块状油页岩沉积于相对湿润气候背景下的淡水湖泊, 而上部纹层状油页岩形成于干旱气候背景下的咸化湖泊。②湿润气候时期繁盛的陆地植被与高的陆源通量向湖泊输入了丰富的陆源有机质和陆源碎屑, 导致了其混合的有机质来源和贫氧的有机质保存环境, 形成了生烃潜力好的中等品质油页岩。③干旱气候时期萎缩的陆地植被以及藻类勃发造就了藻类为主的有机质来源, 而缺氧和高盐的底水环境极大地提高了有机质的保存效率, 形成了具有良好生烃潜力的中等偏高品质油页岩。④此次气候干旱化引发的湖盆咸化是驱动这两种油页岩成矿模式转变的关键。该研究不仅有助于揭示气候干旱化与油页岩成矿富集的耦合机制, 也可作为柴达木盆地优质油页岩矿产预测提供重要依据。

关键词: 有机质富集; 湖泊咸化; 干旱化事件; 成矿; 油页岩; 石门沟组; 中侏罗世; 柴达木盆地

中图分类号: TE121.3

文献标识码: A

Coupling mechanism between climate aridification and shale oil shale mineralization during the the Middle Jurassic in the Qaidam Basin

XIE Wenquan¹, TAN Jingqiang², JIA Jianliang³, CAO Taotao¹, WANG Yong⁴

(1. Hunan University of Science and Technology, Xiangtan, Hunan 411201, China; 2. Central South University, Changsha, Hunan 410083, China; 3. Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China; 4. Geological Survey Institute of Hunan Province, Changsha, Hunan 410014, China)

Abstract: Climate constitutes a crucial factor in the oil shale mineralization, given its pronounced influence on the growth of lacustrine organisms and the depositional environment. During the late Middle Jurassic, the Qaidam Basin experienced a major climate shift from humid to arid conditions. Amid this transition, a continuously distributed sequence of lacustrine oil shales was deposited in the basin. Focusing on these oil shales, we explore the coevolutionary relationships between aridification and oil shale mineralization using methods such as palynology and geochemistry. The results indicate that the oil shales of the shale interval of the Shimengou Formation were deposited under varying humidity conditions. Specifically, the black, massive oil shales in the lower part are formed in freshwater lakes under a relatively humid climate, while the laminated oil shales in the upper part in saline lakes under arid conditions. During the humid phase, lush terrestrial vegetation and a high flux of terrigenous sediments supplied abundant terrigenous organic matter and clastics to the lakes. This created mixed organic matter sources and a dysoxic environment for organic matter preservation. As a result, medium-quality oil shales with high hydrocarbon-generating potential are created.

收稿日期: 2024-11-12; 修回日期: 2025-02-05。

第一作者简介: 谢文泉(1990—), 男, 讲师, 油页岩资源评价与成矿机理。E-mail: 1224894986@qq.com。

通信作者简介: 谭静强(1983—), 男, 教授, 非常规油气地质与地球化学。E-mail: tanjingqiang@csu.edu.cn。

基金项目: 国家自然科学基金项目(U23B20155, 42472208); 国家重点研发计划项目(2023YFC2906701); 湖南省自然资源厅科技计划项目(HBZ20240128)。

During the arid phase, reduced terrestrial vegetation and the proliferation of algae led to the formation of algae-dominated organic matter sources. Concurrently, the anoxic, high-salinity sediment-water environment significantly enhances the preservation efficiency of organic matter. Hence, medium- to slightly high-quality oil shales with excellent hydrocarbon-generating potential occur. The salinization of lacustrine basins, induced by the aridification, is identified as the key factor in driving the transition between the two oil shale metallogenic models. This study provides insights into the coupling mechanism between aridification and oil shale mineralization and enrichment while also offering an important basis for predicting high-quality oil shales within the Qaidam Basin.

Key words: organic matter enrichment, salinization of lakes, aridification event, Mineralization, Oil shale, Shimengou Formation, Middle Jurassic, Qaidam Basin

引用格式:谢文泉,谭静强,贾建亮,等. 柴达木盆地中侏罗世气候干旱化与油页岩成矿耦合机制[J]. 石油与天然气地质, 2025, 46(2): 510–529. DOI: 10. 11743/ogg20250212.

XIE Wenquan, TAN Jingqiang, JIA Jianliang, et al. Coupling mechanism between climate aridification and shale oil shale mineralization during the the Middle Jurassic in the Qaidam Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2025, 46(2): 510–529. DOI: 10. 11743/ogg20250212.

油页岩是一种固体可燃有机矿产,可通过低温干馏方式提取油页岩油。依据含油率的高低,油页岩可划分为3个品级^[1],低含油率(3.5%~5.0%)、中含油率(5.0%~10.0%)和高含油率(>10.0%)。中国油页岩资源潜力巨大,资源量位居全球第二,高达 $7\,199 \times 10^8$ t,折合成油页岩油资源量为 476×10^8 t,是重要的非常规油气资源^[2]。中国油页岩主要发育于陆相湖盆,松辽盆地、抚顺盆地、鄂尔多斯盆地、准噶尔盆地和柴达木盆地等油页岩资源均极为丰富^[1]。随着油页岩勘探工作的进行,油页岩成矿理论成为了非常规油气研究的热点^[3–4]。

早期对陆相油页岩成矿机制的研究多基于宏观的盆地充填视角,认为大型油页岩矿床普遍形成于补偿环境中,该阶段盆地供给速率和充填速率达到平衡,湖盆中心长期处于深水环境,有利于形成展布稳定的优质油页岩矿层^[5–6]。随着细粒沉积有机质富集理论的发展,学者们更加关注油页岩沉积时期的湖泊有机质生产和保存对油页岩成矿的影响^[3, 7–8]。因为油页岩作为一种富有机质的细粒沉积岩,其成矿过程本质上是油页岩中有机质富集的结果^[9–10]。其中,生物生产力是控制油页岩品质的关键因素,低含氧区范围和持续时间决定了油页岩矿床的规模^[4]。更为关键的是,越来越多研究发现油页岩沉积时期往往伴随着地质事件的发生,例如火山、热液、海侵以及气候突变事件等^[3]。这些地质事件往往被认为在油页岩成矿过程中扮演了关键推动者的角色。例如,火山–热液活动过程中释放营养元素、可溶性离子化合物以及还原性气体,营养元素可诱发表层水体藻类勃发,而还原性气体会导致底水缺氧,有利于油页岩的形成^[11]。海侵作用可以造成湖泊咸化,导致水体分层,从而促进优质油页岩的沉积^[12]。气候条件由于对湖泊生物的发育以及沉积环

境演变均有重要影响,被认为是影响油页岩成矿的关键性因素^[3, 13]。通常,温暖的古气候条件普遍被认为有利于湖泊藻类的繁盛,同时增强的化学风化作用有利于营养元素的输入,进而促进湖泊初级生产力的提高^[13]。例如,湿润气候背景控制下的藻类高度繁盛被认为是影响松辽盆地嫩江组油页岩形成的主导因素^[9]。另外,温暖湿润的古气候有利于湖平面上升和水体加深,可能引发水体形成热力学分层,有利于有机质的保存^[13–14]。然而,油页岩的成矿有利环境并非仅局限于湿润气候条件。事实上,许多大型油页岩矿床往往形成于相对干旱气候的咸化环境。例如,全球最大的绿河油页岩矿床形成于相对干旱的咸化湖泊环境^[15];三塘湖盆地和准噶尔盆地芦草沟组油页岩富矿层亦形成于半干旱的咸化环境^[8, 16]。咸化水体由于水动力较差,容易形成稳定的水体盐度分层,缺氧的底水环境是有机质保存的理想场所^[17–18]。因此,不同气候背景下油页岩成矿模式迥异,气候的变化可能引发油页岩成矿模式的转变。

沉积记录表明,在中、晚侏罗世之交,包括柴达木盆地在内的中国西北多个陆相盆地经历了由湿润到干旱的气候演变^[19],具体表现为:早、中侏罗世的含煤和含菱铁矿岩系演变为中、晚侏罗世的含石膏碎屑红层,并形成了干湖–河流–风成环境的沉积组合(图1,图2)^[20]。在此气候关键转折期,柴达木盆地中侏罗统石门沟组页岩段(亦称大煤沟组七段)沉积了厚层的深湖–半深湖相油页岩(图2)^[21–22]。该套油页岩厚度大,分布广,资源潜力巨大,以中等品质油页岩为主^[23]。针对该层位的岩相学分析显示该段下部与上部油页岩岩相具有显著差异,下部以黑色块状油页岩为主,而上部为棕色纹层状油页岩且富含碳酸盐矿物,这种岩相的剧变暗

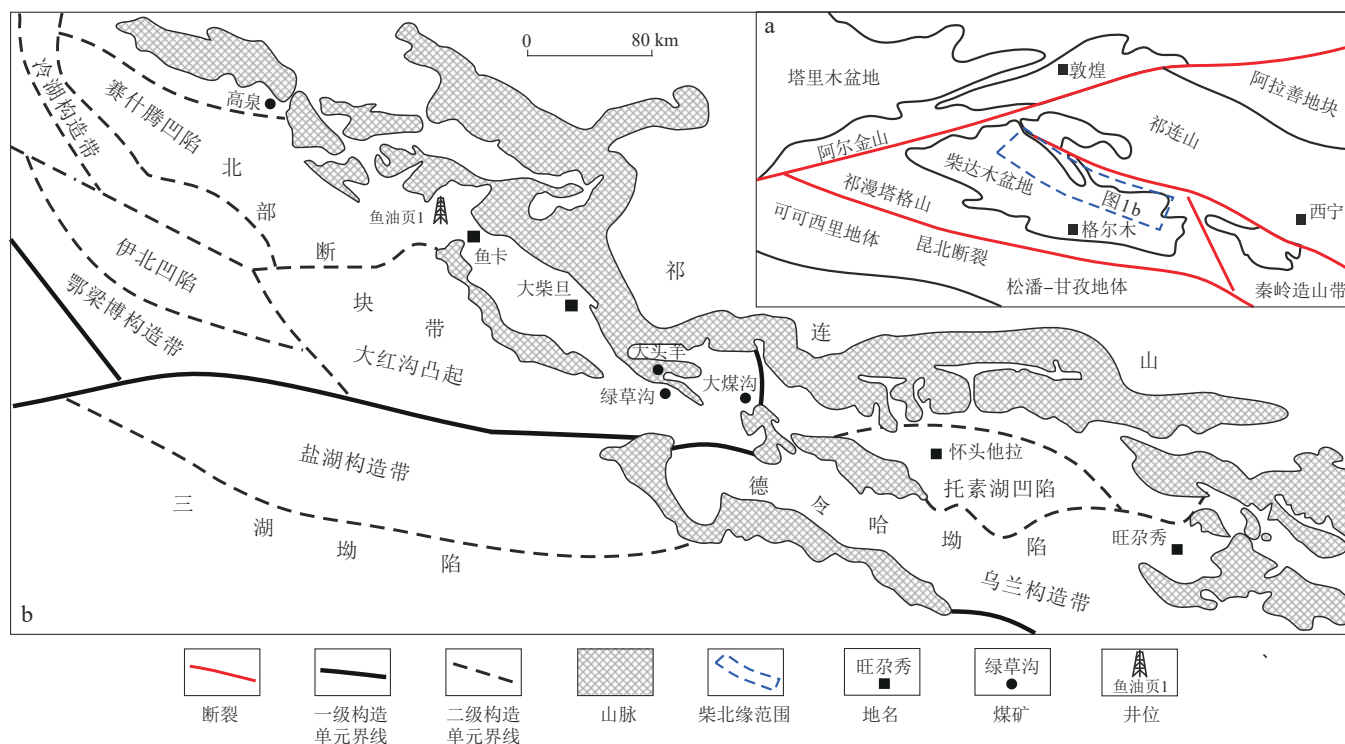


图1 柴达木盆地及邻区构造简图(a)和柴北缘构造分区图及钻井取样位置(b)(修改自文献[20])

Fig. 1 Structural sketch map of the Qaidam Basin and its adjacent areas (a) and map showing the structural division and well location of the northern margin of the basin (b) (modified after reference [20])

示了气候干旱化与油页岩成矿之间具有某种耦合关系(图2)。尽管如此,此次气候干旱化事件对油页岩成矿作用的具体影响研究尚缺乏精细的解剖,气候干旱化如何影响油页岩形成尚不明确。本次研究以该套油页岩层系为研究对象,开展古气候学和地球化学与油页岩成矿的学科交叉融合研究,建立气候干旱化进程中油页岩成矿模式,揭示油页岩成矿与气候干旱化的协同演化关系。

1 地质背景

1.1 区域地质概况

柴达木盆地地处中国西北,是中国大型的含煤与含油气盆地之一^[24]。盆地构造格局以及古地理位置在不同时期具有很大差别,在侏罗纪时期,柴达木盆地为位于北纬约30°N的裂谷盆地^[25-26]。现今盆地的南界为东昆仑断裂带,东北界为祁连逆冲断裂带,西北界为阿尔金走滑断裂(图1a)。根据现今构造特征,可将盆地划分为北部断块带、茫崖凹陷、三湖坳陷和德令哈凹陷4个一级构造单元(图1b)。盆地内沉积了厚层的中、新生代沉积物,不整合覆盖于前寒武系结晶基底之

上。其中,侏罗系地层主要分布于北部断块带(简称柴北缘),中侏罗统自下而上可依次划分为,大煤沟组、石门沟组与采石岭组(图2a)。大煤沟组沉积时期,盆地以辫状河-辫状河三角洲沉积为主,发育厚煤层,是盆地的主要成煤期^[27],而中侏罗世晚期盆地则大范围发育红层沉积^[28]。这种沉积记录的剧变显示出中侏罗世晚期盆地古气候发生了由湿润向干旱的巨大转变(图2a)^[29],石门沟组则沉积于这两种截然不同气候的转折期(图2a)。石门沟组沉积时期,盆地整体处于快速沉降阶段,这导致其下部与上部岩性差异较大,下部以滨浅湖及辫状河三角洲等相对浅水的沉积体系为主,发育数层煤层,称之为含煤段^[30]。上部沉积时期,盆地沉降加快,研究区开始以深湖-半深湖沉积为主,发育厚层油页岩,称之为页岩段,而油田系统通常称之为大煤沟组七段^[21, 31],是本次研究的目的层位。

1.2 油页岩矿地质特征

侏罗纪时期,柴达木盆地进入陆相湖盆演化阶段,沉积了厚层的陆相沉积^[32]。在中侏罗世中、晚期,即石门沟组页岩段沉积时期,盆地沉降加速,经历了水体不断加深,在盆地沉积中心发育厚层、稳定的油页岩矿层^[33-34]。盆地油页岩主要发育于石门沟组页岩段中、

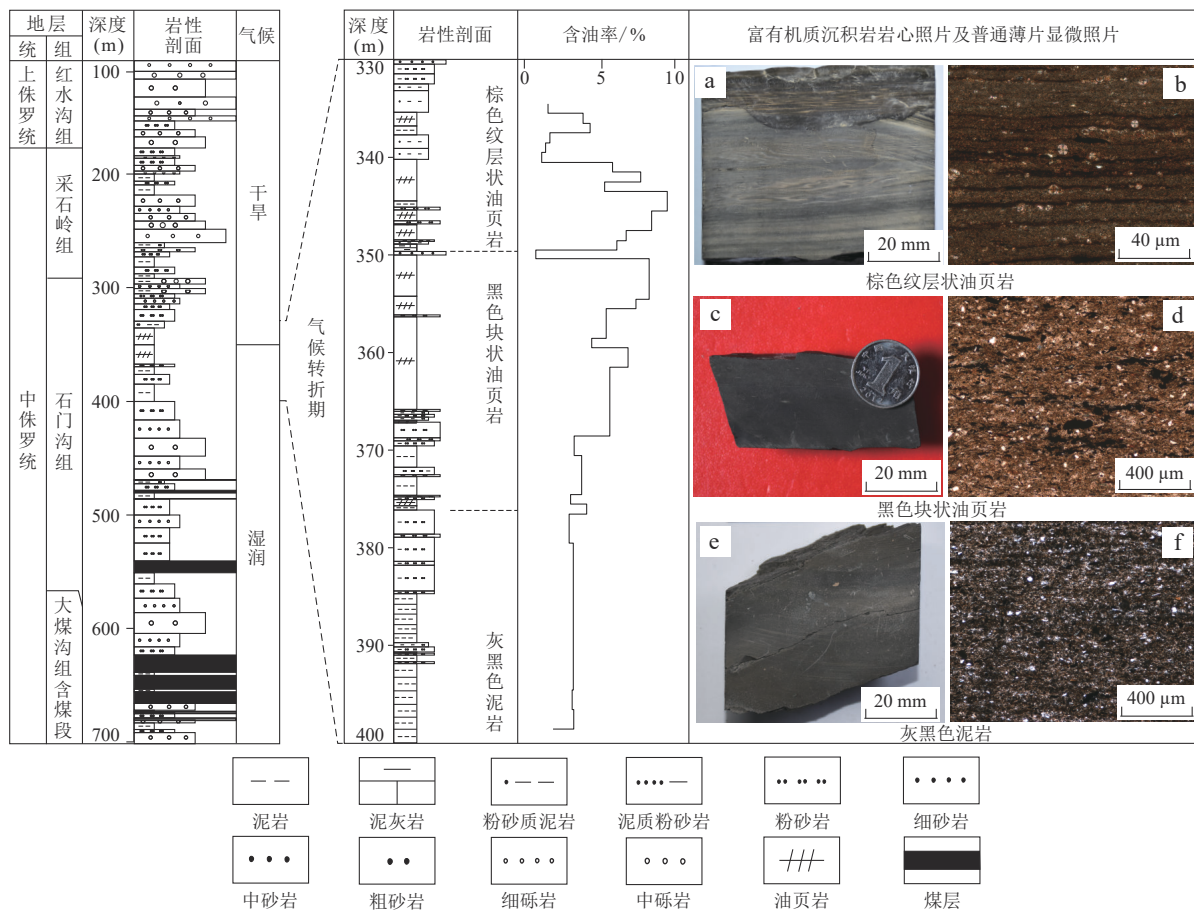


图2 柴达木盆地北缘鱼油页岩1井岩心综合柱状图和页岩段典型岩相

Fig. 2 Composite stratigraphic column of cores and images of typical lithofacies of shale intervals in well YYY-1, northern margin of the Qaidam Basin

a. 棕色纹层状油页岩,埋深342.2 m,岩心;b. 有机质、黏土纹层与碳酸盐纹层,埋深342.2 m,普通薄片,正交偏光;c. 黑色块状油页岩,埋深351.5 m,岩心;d. 分散状有机质,埋深351.5 m,普通薄片,单偏光;e. 黑色泥岩,埋深370.5 m,岩心;f. 分散状有机质与石英,埋深370.5 m,普通薄片,单偏光

上部,埋深较浅(<1000 m)(图2a),主要集中分布于鱼卡、大煤沟、全吉、团鱼山以及旺尕秀等地区^[35],其中鱼卡地区油页岩矿层厚度可达 25.0 m^[22],团鱼山地区累计厚度为 8.3 m^[31],其他地区油页岩矿层相对较薄,厚度整体介于 $1.0\sim4.0$ m^[35]。油页岩多为中、低品质油页岩,高品质油页岩占比相对较少。鱼卡地区油页岩含油率最高可达 9.2% ,为中等偏高品质油页岩(图2b)^[22];团鱼山地区油页岩以中等品质油页岩为主,含油率最高为 6.3% ;其他油页岩矿层含油率普遍低于 5.0% ,以低品质油页岩为主。整体而言,鱼卡地区油页岩矿层厚度最大,品质最佳,资源量估算高达 11.64×10^8 t。

2 样品采集与测试方法

本次研究的样品采自鱼油页岩1井,该钻井位于柴达木盆地北缘鱼卡凹陷,为部署于该区的油页岩勘探钻井,完整地揭示了石门沟组油页岩矿层(图2)^[22]。

岩相学分析显示该矿层下部与上部油页岩的岩相特征具有显著差异,上部为棕色纹层状油页岩,水平层理发育,主要由碳酸盐矿物纹层与有机质+黏土纹层交替组成,含油率介于 $3.8\%\sim9.2\%$,多为中等偏高品质油页岩(图2a,b)^[22]。下部以黑色块状油页岩为主,矿物组成主要以石英和黏土矿物为主,有机质呈分散状分布,含油率介于 $3.7\%\sim6.8\%$,多为中-低品质油页岩(图2c—f)。本次研究对该层位进行了系统取样,共采集样品62块,其中油页岩样品47块。

2.1 孢粉学分析

孢粉学分析采用标准的HCl-HF酸处理方法,称取 30 g左右的油页岩与泥岩样品,机械破碎为 $2\sim5$ mm的颗粒,然后加入HCl(质量分数 37%)去除样品中的碳酸盐矿物,并使其反应约 10 h,然后用蒸馏水洗涤。稍后加入HF(质量分数 40%)浸没样品,反应 24 h,再次用蒸馏水洗涤,然后通过孔径 $10\mu\text{m}$ 筛网筛分。最后,

加入HCl(质量分数10%),反应24 h以消除氟硅酸盐,最后用蒸馏水洗涤。由于本次分析的重点包括有机物,研究样品未进行氧化法。每个样品制作两块薄片,分别用于孢粉鉴定统计以及孢粉相分析。利用透射光显微镜观察孢粉形态,鉴定属种并拍照,每个样品统计不少于200粒。孢粉相分析至少统计500个颗粒有机质,分为无定型有机质、孢型以及植物碎屑3大类^[36]。孢粉组合分析通过Tilia软件,利用地层约束聚类分析(CONISS)方法完成,基于孢粉样品数据经统计计算分析,将每个孢粉化石属种类型相对丰度以图谱的形式,依据地层深度顺序排列显示。

2.2 有机岩石学分析

首先选取油页岩块状样品,垂直其层理方向切割成为块体,随后对其观察面进行抛光与打磨处理,以此制作成全岩光片。运用配备油浸镜头的荧光显微镜,通过交替使用白光和荧光来对显微组分展开鉴定与统计。显微组分的分类以及命名方案基于国际有机岩石学标准。每个样品的有效点的统计数量不少于300个,而显微组分含量按照无矿物质基质的体积百分含量(%)计算。

2.3 总有机碳含量(TOC)和岩石热解分析

总有机碳含量通过LECO-CS744碳硫分析仪完成,首先称取200 mg左右粉末样品置于渗水坩埚中,加入稀盐酸以去除碳酸盐矿物,清洗至中性后烘干,将烘干后的样品加入铁屑和钨锡助溶剂,置于碳硫分析仪中测试分析。热解主要通过Rock-Eval 6型岩石热解仪完成,称取50 mg粉末样品,在氮气流中利用程序升温模式加热,依次获得游离烃(S_1)和裂解烃(S_2),产烃量最大值对应的温度则为最高热解峰温(T_{max})。

2.4 主、微量元素分析

全岩主量元素含量采用X射线荧光光谱法(XRF)进行测定,仪器型号为Axios^{max}。整个测试流程包含两部分:(1)使用重量法测定烧失量;(2)使用熔融法制备玻璃片,然后上机测试。采用理论 α 系数校正元素间的吸收增强效应。本次测试过程中,国家标准物质(GSR-4, GSR-5和GSR-6)和重复样用于评估数据质量,测试相对标准偏差小于2%。

全岩微量元素含量采用电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS)进行测定,仪器型号为NexION 300D,整个测试流程包含样品化学前处理和上机测试两部分。首先,称取50 mg粉末样品置于高密闭性的Teflon溶样弹

中。为保证有机物的充分消解,加入2 mL高纯HNO₃和1 mL HF,密封置于190 °C烘箱中48 h。溶解后的样品置于120 °C电热板上蒸干,对于有机质未完全溶解的样品,参照前述步骤进行二次消解。蒸干后的样品,加入1 mL HNO₃用于完全去除HF,然后依次加入1 mL HNO₃, 1 mL去离子水和1 mL内标,密封溶样弹,置于190 °C烘箱中12 h。之后,用2% HNO₃溶液稀释定容至100 mL制备待测溶液,用于ICP-MS的上机测试。测试过程中,空白样、重复样、国际和国家标准物质(AGC-2, BCR-2, GSR-2和GSD-12)用于评估数据质量,对于大部分微量元素,分析精度优于5%。

2.5 饱和烃生物标志化合物分析

可溶有机质的抽提采用索氏抽提法,利用二氯甲烷与甲醇混合液(体积比93:7)在60 °C下抽提72 h,然后将抽提液转移至旋转蒸发仪中进行浓缩,然后通过氮气吹扫至恒重。族组分分离采用硅胶-氧化铝柱层析法,称取20~50 mg抽提物至于烧杯中,加入正己烷,沉淀12 h后获取沥青质组分,然后分别使用正己烷、二氯甲烷-正己烷溶液(体积比2:1)淋洗层析柱获取饱和烃、芳香烃以及非烃组分,最后依次加入10 ml无水乙醇溶液和10 ml二氯甲烷获取非烃组分。饱和烃生物标志化合物通过岛津GCMS-QP2020 NX仪器完成。进样方式采用分流进样法,进样口温度为280 °C,柱箱初始温度为80 °C,恒温3 min,然后以3 °C/min的加热速率升至230 °C,然后以2 °C/min的加热速率升至310 °C并恒温10 min。离子源为EI离子源,质量扫描范围为m/z 50~m/z 550。

3 结果

3.1 孢粉组合与孢粉相类型

本次研究共鉴定出侏罗纪孢粉化石26属35种,以裸子植物花粉为主,共计22属26种,而蕨类植物孢子含量极低,共4属9种。基于CONISS结果,自下而上可将页岩段孢粉组合划分为孢粉带A和B(图3)。

1) 孢粉带A: *Pinuspollenites*-*Alisporites*-*Pseudowalchia* (页岩段下部,埋深353.0~400.0 m)

该孢粉带中,裸子植物花粉占据绝对优势,含量介于88.3%~100.0%,平均值高达97.0%,主要种类为双束粉属(*Pinuspollenites*)、阿里粉属(*Alisporites*)、假云杉粉属(*Pseudopicea*)、皱球粉属(*Psophosphaera*)、南方南美杉粉属(*Araucariacites*)、拟云杉(*Piceites*)、四字粉

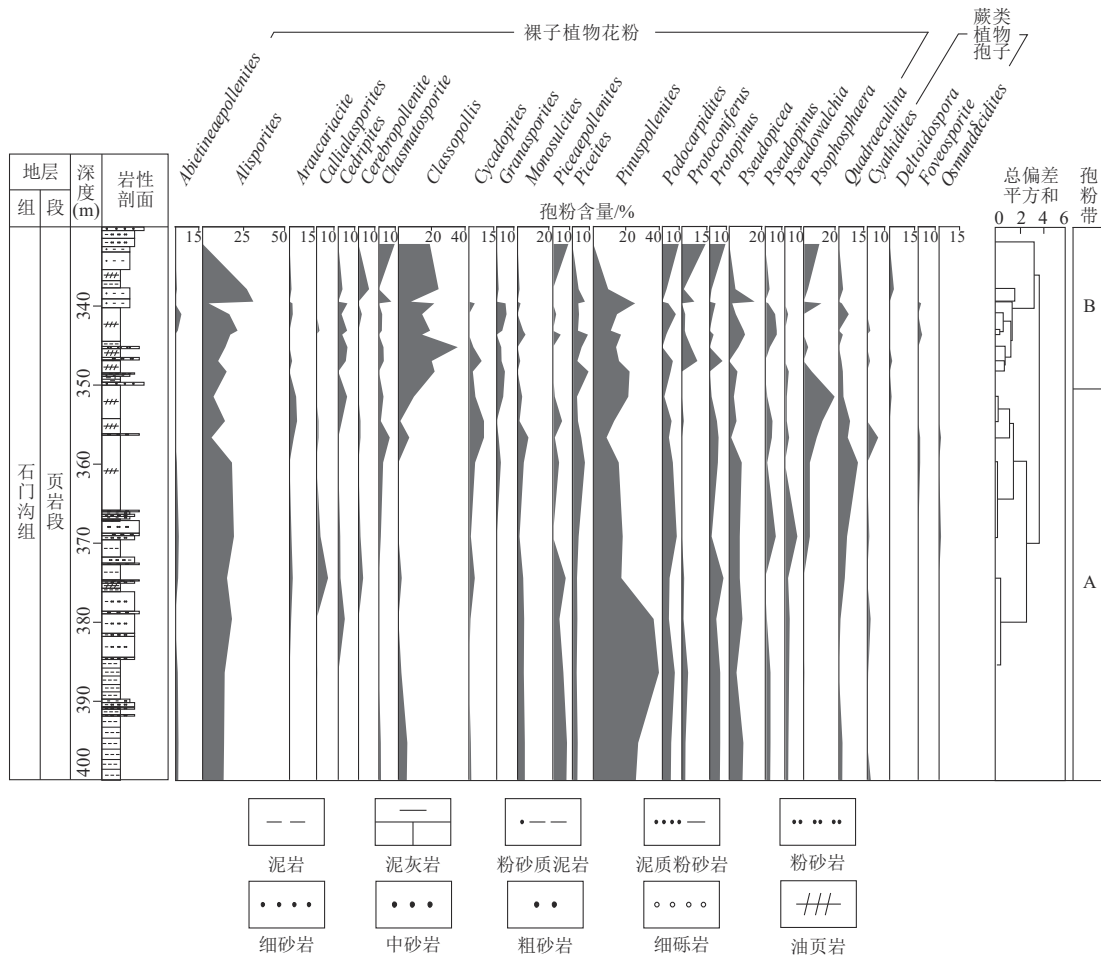


图3 柴达木盆地北缘鱼油页1井石门沟组页岩段主要孢粉含量以及孢粉组合

Fig. 3 Percentages of primary sporomorphs and palynological assemblages in the shale interval of the Shimengou Formation in well YYY-1, northern margin of the Qaidam Basin

属(*Quadraeculina*)、罗汉松粉属(*Podocarpidites*)、克拉梭粉(*Classopollis*)、苏铁粉属(*Cycadopites*)以及具粒单远极沟粉属(*Monosulcites*)等。蕨类孢子含量极低,平均含量仅为3.0%,仅见零星的桫欏孢属(*Cyathidites*)和卵形孢属(*Ovoidites*)。

2) 孢粉带B: *Classopollis*–*Alisporites*–*Pinuspollenites* (页岩段上部,埋深335.0~353.0 m)

该孢粉带以裸子植物花粉占据主导地位为主要特征,平均含量达到98.1%;而蕨类植物孢子的含量相对较低,平均含量仅为1.9%。孢粉类型包括阿里粉属(*Alisporites*)、双束粉属(*Pinuspollenites*)、克拉梭粉(*Classopollis*)、假瓦契杉粉属(*Pseudowalchia*)、原始松粉属(*Protopinus*)、皱球粉属(*Psophosphaera*)以及拟云杉属(*Piceites*)。

整体而言,孢粉带B与孢粉带A属种及相对含量较为相似。然而,孢粉带B的克拉梭粉属(*Classopollis*)的丰度较孢粉带A显著提升,从平均含量2.9%急剧

增至19.9%,最高可达36.1%。另外,孢粉带A和孢粉带B的孢粉相差异更为显著(图4)。孢粉有机质类型及丰度显示,孢粉有机质在纵向上存在显著的差异,可识别出两个孢粉相类型,分别对应孢粉带A和B(图3,图4)。页岩段下部(孢粉带A)孢粉有机质由无定型有机质、孢型和植物碎屑组成,三者交替占据优势。其中底部泥岩样品富含植物碎屑与孢型,向上黑色块状油页岩中无定型有机质开始增加(图4a, b)。页岩段上部纹层状油页岩(孢粉带B)主要由无定型有机质组成,植物碎屑含量较低,而孢型几乎不发育(图4c, d)。

3.2 显微组分

本次研究依据显微组分的物质起源,将显微组分归为陆源有机质与藻类有机质两大类。页岩段底部泥岩中有机质多以陆源有机质为主导,平均含量高达65.3%。藻类有机质含量较低,平均含量为34.7%,多

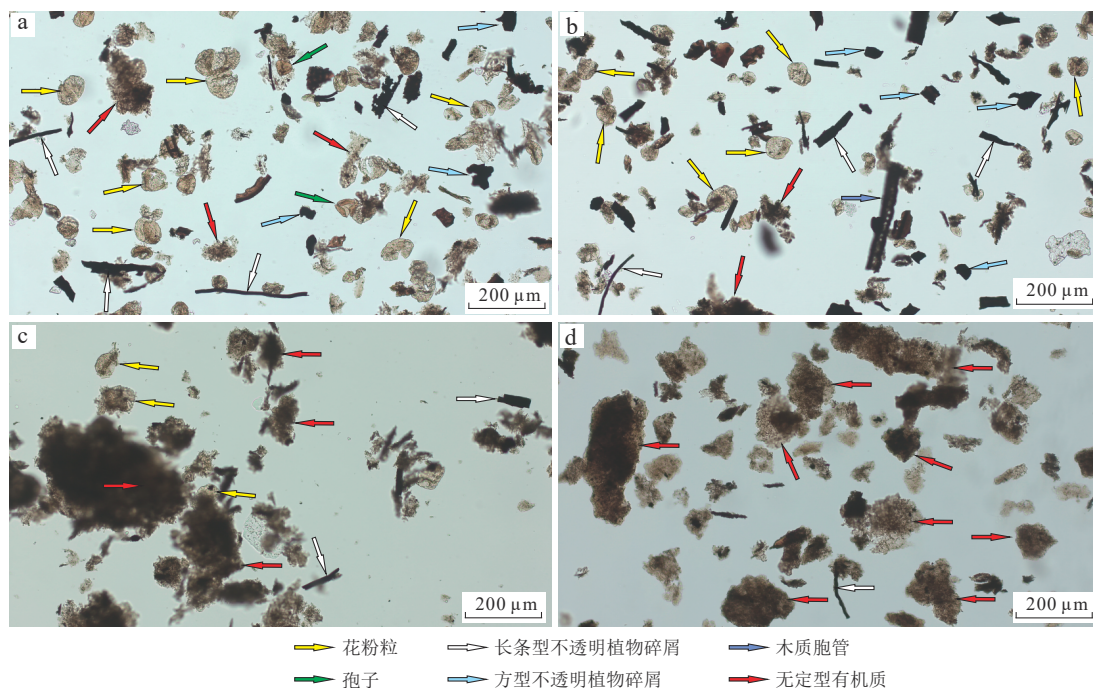


图4 柴达木盆地北缘鱼油页岩1井石门沟组页岩段不同孢粉相透射光镜下特征

Fig. 4 Transmitted light micrographs of various palynofacies in the shale interval of the Shimengou Formation in well YYY-1, northern margin of the Qaidam Basin

a. 泥岩, 见丰富的孢型和植物碎屑, 埋深387.0 m; b. 黑色块状油页岩, 见丰富的孢型、植物碎屑以及无定型有机质, 埋深356.5 m; c. 纹层状油页岩, 以无定型有机质为主, 见少量孢型, 埋深350.5 m; d. 纹层状油页岩, 以无定型有机质为主, 见少量植物碎屑, 埋深342.0 m

为葡萄球藻(*Botryococcus*), 在显微组分中通常称之为结构藻, 呈蜂窝状, 在油浸荧光激发下呈强烈的黄绿色荧光(图5a)。页岩下部黑色块状油页岩藻类有机质和陆源有机质含量大致相当, 平均含量分别为47.8%和

52.2%。藻类有机质主要以结构藻和层状藻为主, 层状藻呈细长的条状, 具有橘黄色荧光(图5b)。陆源有机质多以胶质结构体为主, 在反射白光下呈灰色, 同时含少量的惰质碎屑体, 块体较小, 在反射白光下呈灰白

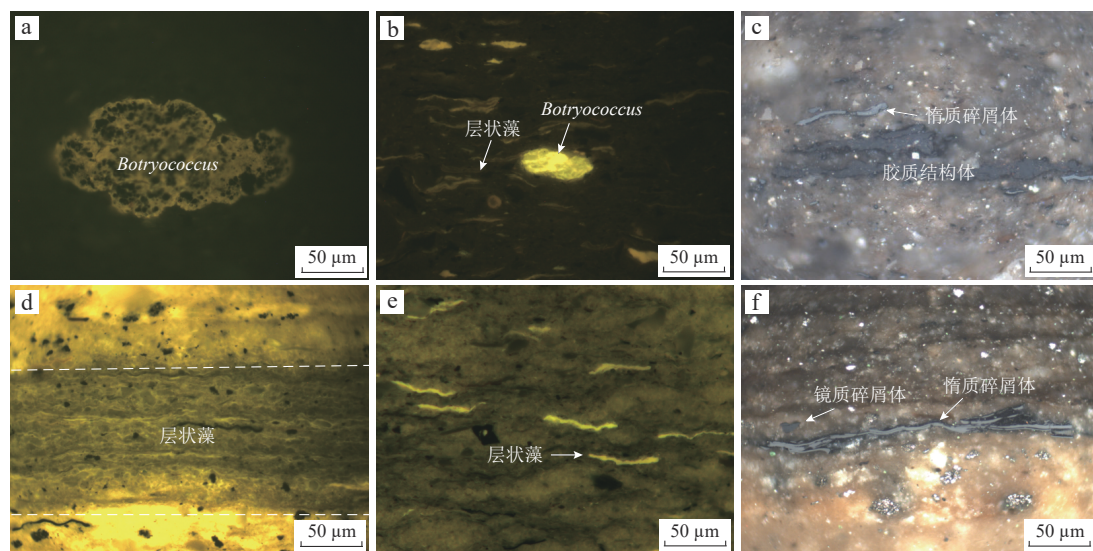


图5 柴达木盆地北缘鱼油页岩1井石门沟组页岩段泥岩与油页岩显微组分典型照片

Fig. 5 Typical micrographs of macerals in mudstones and oil shales within the shale interval of the Shimengou Formation in well YYY-1, northern margin of the Qaidam Basin

a. 泥岩, 埋深395.5 m, 全岩光片, 反射荧光; b. 块状油页岩, 埋深358.5 m, 全岩光片, 反射荧光; c. 块状油页岩, 埋深360.5 m, 全岩光片, 反射白光; d. 纹层状油页岩, 埋深342.5 m, 全岩光片, 反射荧光; e. 纹层状油页岩, 埋深342.0 m, 全岩光片, 反射荧光; f. 纹层状油页岩, 埋深342.5 m, 全岩光片, 反射白光

色(图5c)。页岩段上部纹层状油页岩中藻类有机质相对比例急剧增高,平均含量为69.3%,部分样品含量高达95%,主要为层状藻,而在埋深大于345.0 m的样品中,葡萄球藻几乎消失(图5d,e)。而陆源有机质占比较低,平均含量为30.7%,多以镜质碎屑体和惰质碎屑体为主(图5f)。

3.3 TOC和岩石热解参数

页岩段不同岩相有机地球化学参数具有较为显著的差异,页岩段下部泥岩TOC、生烃潜量(S_1+S_2)以及氢指数(HI)整体较低,分别为2.44%~5.39%,6.0~18.3 mg/g和211~423 mg/g(图6c—e)。页岩段上部黑色块状油页岩TOC、 S_1+S_2 以及HI显著增高,分别为4.91%~7.65%,26.9~49.8 mg/g和506~785 mg/g。页岩段上部棕色纹层状油页岩整体TOC、 S_1+S_2 以及HI为页岩段高值,分别为4.01%~16.30%,30.8~137.2 mg/g和529~901 mg/g。泥灰岩的TOC和 S_1+S_2

较低,分别为3.10%~3.97%和12.4~30.1 mg/g,HI较高,平均值可达656 mg/g。页岩段整体 T_{max} 较低,介于421~442 °C,平均值为435 °C(图6f)。

3.4 元素地球化学

页岩段下部与上部元素地球化学参数具有显著的变化,下部化学蚀变指数(CIA)整体较高,介于78~88,平均值为83;而上部纹层状油页岩段CIA急剧降低,为67~82,平均值为75(图7a)。化学风化指数(CIW)变化趋势与CIA一致,下部CIW为89~97,平均值为93;上部CIW显著降低,为74~93,平均值为84(图7b)。成分变异指数(ICV)均大于1,下段值(6~14)显著低于上段(8~73)(图7c)。页岩段下部与上部的总含硫量(TS)/TOC、Sr/Ba和P/Ti元素含量比值,钼元素富集因子 Mo_{EF} 以及铀元素富集因子 U_{EF} 均呈现出相似的规律,下部整体处于稳定的低值,而上部各值均大幅增高(图7d—h)。

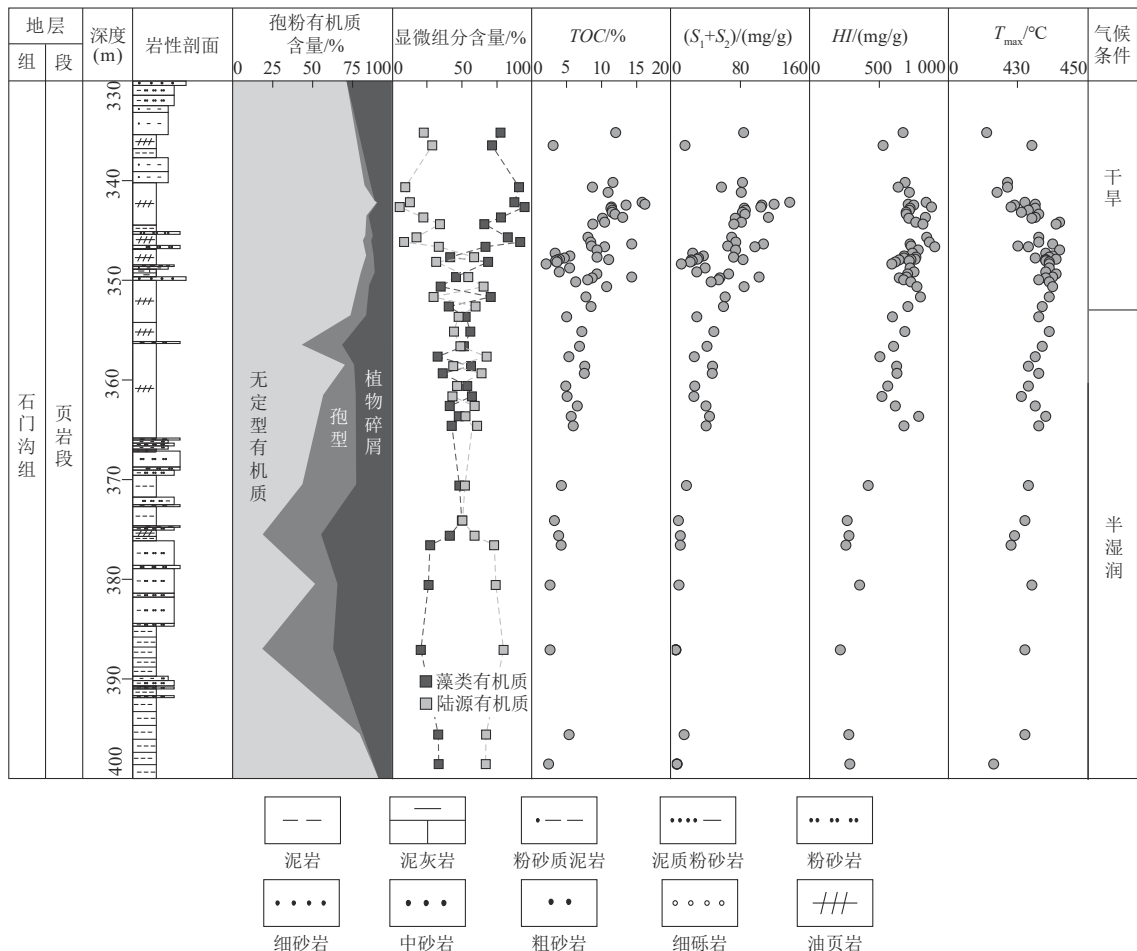


图6 柴达木盆地北缘鱼油页岩1井石门沟组页岩段孢粉有机质相对含量与有机地球化学参数

Fig. 6 Relative content of palynological organic matter and organic geochemical parameters of the shale interval of the Shimengou Formation in well YYY-1, northern margin of the Qaidam Basin

(TOC为总有机碳含量; S_1+S_2 为生烃潜量;HI为氢指数; T_{max} 为最高热解峰温。)

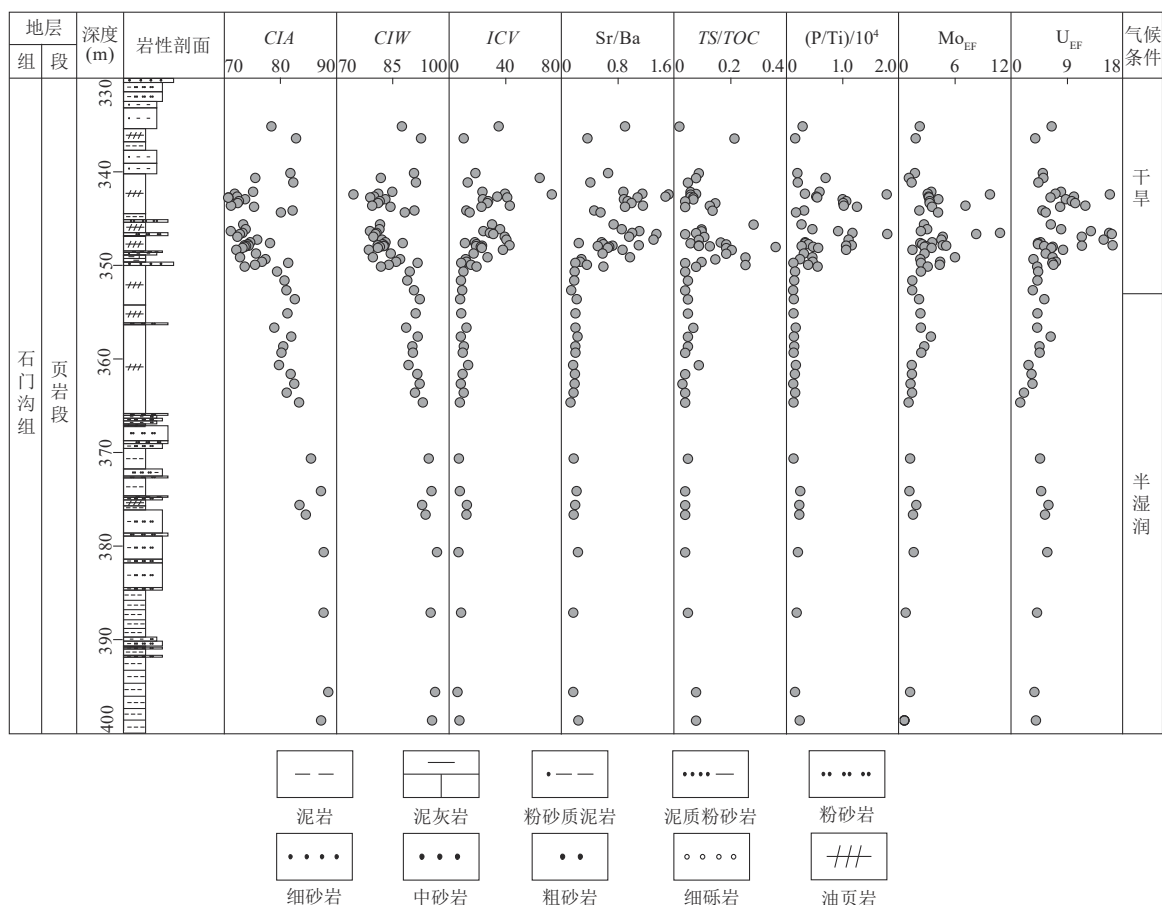


图7 柴达木盆地北缘鱼油页岩1井石门沟组页岩段元素地球化学参数

Fig. 7 Element geochemical parameters of the shale interval of the Shimengou Formation in well YYY-1, northern margin of the Qaidam Basin (CIA 为化学蚀变指数; CIW 为化学风化指数; IGV 为成分变异指数; Sr/Ba 和 P/Ti 为元素含量比值; 总含硫量(TS)/TOC 为 Mo_{EF} 为 Mo 元素富集因子; U_{EF} 为 U 元素富集因子。)

3.5 饱和烃生物标志化合物

在页岩段的油页岩中,正构烷烃整体以中碳数(nC_{21-25})和低碳数(nC_{15-20})直链烷烃为主,均具有明显的奇数碳优势(图8)。异戊二烯烷烃则具有非常显著的差异,下部黑色块状油页岩具有姥鲛烷优势,植烷相对丰度较低。然而,上部纹层状油页岩则具正好相反,植烷丰度远高于姥鲛烷。另外,纹层状油页岩一个非常显著的特征就是具有极高丰度的 β -胡萝卜素烷(图8b)。所有样品的萜烷类生物标志化合物均以藿烷类为主,三环萜烷含量极低,藿烷类则以高丰度的 $17\alpha, 21\beta-(C_{27}-C_{31})$ 藿烷和 $17\beta, 21\beta-(C_{27}-C_{31})$ 藿烷为特征。所有样品均检测到不同丰度的伽马蜡烷,下部黑色块状油页岩伽马蜡烷的相对丰度显著低于上部纹层状油页岩。不同类型油页岩的规则甾烷分布也同样差异显著,下部块状油页岩 C_{27} 规则甾烷与 C_{29} 规则甾烷含量大致相当,呈“V”字型分布,而上部纹层状油页岩则显示出 C_{27} 规则甾烷的优势,呈反的“L”型分布。

4 讨论

4.1 油页岩特征及生烃潜力

油页岩 TOC 与生烃潜量 S_1+S_2 呈显著的正相关,表明油页岩中有机质的丰度是影响其生烃潜力的重要因素(图9)。页岩段的下部 TOC 整体较高,介于 2.4% ~ 7.7%,平均值可达 5.1%(图6c)。其中,泥岩 S_1+S_2 介于 6.0 ~ 18.3 mg/g,平均值为 11.0 mg/g,显示出一般至较好的生烃潜力。黑色块状油页岩 S_1+S_2 显著高于泥岩,平均值可达 38.8 mg/g,整体具有良好至极好的生烃潜力(图9)。在页岩段上部,除泥灰岩 TOC 相对较低外(平均值为 3.3%),纹层状油页岩 TOC 平均值高达 10.1%。与之相对应的是其 S_1+S_2 同样高达 77.1 mg/g,显示出极好的生烃潜力,这与其高的含油率吻合(最高可达 9.3%)。

除有机质丰度外,有机质的类型对于油页岩的生

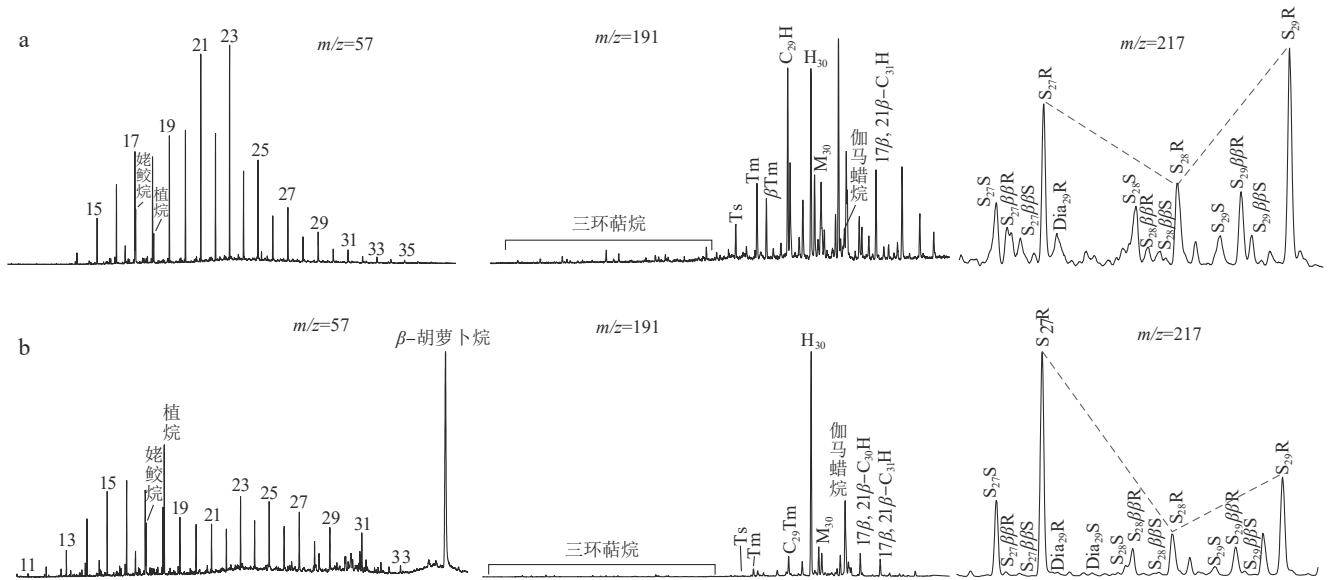


图8 柴达木盆地北缘鱼油页岩1井石门沟组典型油页岩样品生物标志化合物质量色谱

Fig. 8 Mass chromatograms of biomarkers in typical oil shale samples from the Shimengou Formation in well YYY-1, northern margin of the Qaidam Basin

a. 黑色块状油页岩,埋深359.2 m; b. 棕色纹层状油页岩,埋深346.5 m

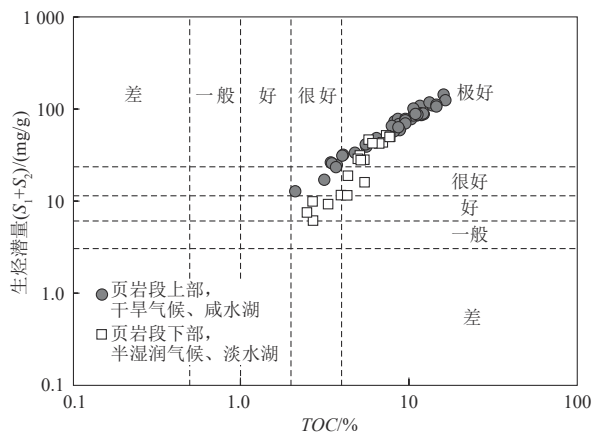


图9 柴达木盆地北缘鱼油页岩1井石门沟组页岩段TOC与 S_1+S_2 交汇图(图版据文献[37]修改)

Fig. 9 TOC content vs. S_1+S_2 cross plot of the shale interval of the Shimengou Formation in well YYY-1, northern margin of the Qaidam Basin (modified after reference [37])

烃模式与生烃效率同样至关重要^[6, 38]。页岩段下部较低的HI指数显示该段有机质类型以II型和III型为主,其中底部泥岩由于较低的HI(211~423 mg/g),其有机质类型多为III型,这与其丰富的镜质体含量有关。镜质体由于含丰富的芳基结构与含氧基团,热解产烃量较低^[39]。黑色块状油页岩具有高的HI(506~785 mg/g),显示其有机质类型多为II型,部分为I型(图10)。这是由于相比于泥岩,块状油页岩中藻类有机质占比更高(平均含量为47.8%),藻类体来源于藻类,富含类脂化合物,为产烃量最高的组分。页岩段上

部纹层状油页岩HI均表现出高值(平均为730 mg/g),有机质类型为I型,这与其藻类体为主的显微组分组成一致(图5d,e)。

另外,页岩段的 T_{max} 整体较低(平均值为435 °C)表明页岩段油页岩整体处于未成熟至生油窗的边缘,热演化程度较低。油页岩正构烷烃的奇偶优势分布特征同样显示低的热成熟度特征(图8),这种特征通常只出现在未成熟-低成熟度阶段,随着热演化程度的升高,干酪根裂解形成的正构烷烃不具有这种特征,碳优势指数(CPI)也趋近于1.00^[37]。油页岩整体具有较高的CPI,平均为1.66,显示低成熟的特征(图11a)。油页岩中检出的生物构型($\beta\beta$)藿烷同样印证了这一点(图8)。生物构型藿烷由于热稳定性较差,在热成熟过程中通常会向地质型藿烷($\alpha\beta$)转化^[37]。另外, C_{29} 规则甾烷的20S和20R异构化也同样可以反映有机质成熟度的变化,其20S/(20S+20R)比值在热演化过程中会逐渐到达平衡值(约为0.70)。页岩段油页岩 C_{29} 规则甾烷20S/(20S+20R)比值整体介于0.08~0.37,远低于平衡值。因此,页岩段油页岩热演化程度低,大规模的生排烃作用尚未发生,作为烃源岩对常规油气的贡献可能较低,作为油页岩开发则更具潜力。

4.2 气候干旱化事件

4.2.1 孢粉植物群演化

陆地植被对区域性气候变化响应极为敏感,是气

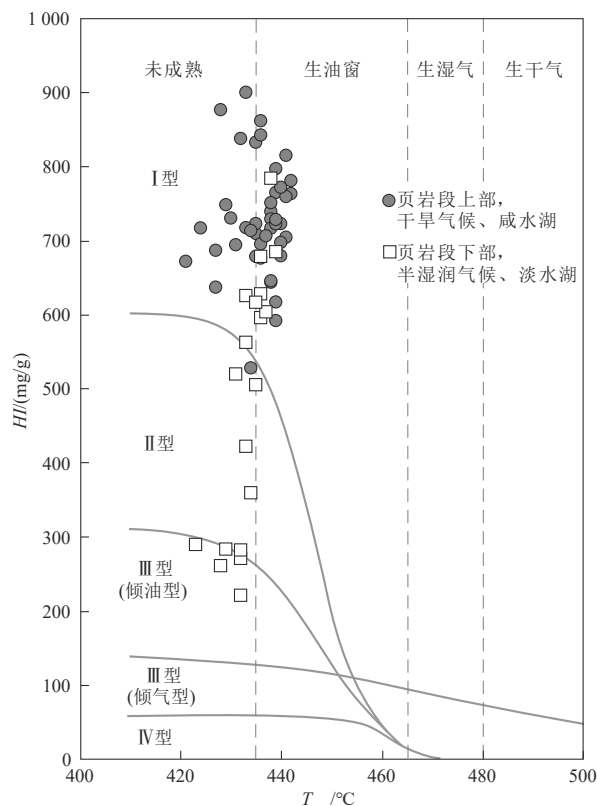


图10 柴达木盆地北缘鱼页1井石门沟组页岩段HI- $T_{\max}$ 关系图版

Fig. 10 HI vs. $T_{\max}$ cross plot of the shale interval of the Shimengou Formation in well YYY-1, northern margin of the Qaidam Basin
(HI为氢指数; $T_{\max}$ 为最高热解峰温。)

候变化的指示器^[29, 40-41]。根据孢粉植物亲缘关系,研究发现页岩段孢粉植物群主要由针叶、种子蕨、苏铁类以及少量蕨类植被组成。另外,各类植被在垂向上具有较为明显的分带特征,据此可划分出两个植物带:下部植物带A和上部植物带B,分别与孢粉组合A和B对应。

植物带A以针叶林植被为主,平均含量为73.2%,以松科类(双束松粉属 *Pinuspollenites*, 假云杉粉属 *Pseudopicea* 和原始松粉属 *Protopinus*)和罗汉松科(罗汉松粉属 *Podocarpidites*, 四字粉属 *Quadraeculina* 和拟云杉属 *Piceites*)植被为代表。在中生代期间,这两类植物多繁盛于北半球热带至温带气候区域。其中,罗汉松科植物更倾向于生长在湿润的低洼生境,而松科植物通常分布于相对温凉的高地生境,其对于干旱环境也具有一定适应性^[42-43]。此外,种子蕨类(如阿里粉属 *Alisporites*)和苏铁类植物(如苏铁粉属 *Cycadopites* 和单远极沟粉属 *Monosulcite*)在这一时期也较为繁盛。苏铁类植物于中生代生态体系中占据关键地位,在热

带和亚热带的干旱至半湿润气候区有着广泛的分布^[44-45]。相比之下,桫欏蕨科/蚌壳蕨科(桫欏孢属 *Cyathidites* 和三角孢属 *Dicksoniaceae*)的孢子仅少量出现,表明此时期喜湿热环境的蕨类植物丰度较低^[46-47]。因此,根据植物带A的植物群组成特征可知,页岩段下部沉积时期,研究区植被具有多样性,整体以中生植被为主,喜湿热丰度较低,耐旱植被几乎不发育,气候整体以温带半湿润气候环境为主。

植物带B仍以针叶林为主,平均含量高达73.8%,同时伴有少量的种子蕨类植物。与植物带A相似的是,针叶林的主要组成包括松科和罗汉松科植物。但是,两个孢粉植物群仍存在非常显著的差异。首先,根据孢粉相可知,孢粉带A中富含植物碎屑和孢型,而孢粉带B中孢型与植物碎屑含量极低,证实此时期陆地整体处于萎缩和退化状态(图4,图6a)。其次,植物带B中掌鳞杉科植物(克拉梭粉属 *Classopollis*)占比迅速增加,平均含量达到19.9%。掌鳞杉科植物具有耐旱特征,多栖息于热带至亚热带的干热环境或盐湖附近的生境,其大量繁盛通常代表干旱气候盛行^[19, 43]。因此,基于孢粉植物群的变化可知,页岩段上部沉积时期,研究区气候开始趋向于干旱。

4.2.2 物源区化学风化证据

化学风化过程与气候条件密切相关,通过分析沉积岩的元素组成及化学蚀变指数(CIA),可以有效揭示物源区碎屑岩的风化程度,进而反演古气候特征^[48-49]。大陆风化过程主要受到温度和湿度的影响,通常在高温、高湿环境中表现出较强的风化作用。在这种条件下,碱金属阳离子(如 K^+ , Ca^{2+} 和 Na^+)易被地下水系统带走,而铝离子(Al^{3+})和钛离子(Ti^{4+})等不易溶解的元素则相对富集在土壤残留物中^[48, 50]。基于此, Nesbitt 和 Young^[50]提出了化学蚀变指数(CIA, 无量纲),用于定量评估风化强度,高CIA值(80~100)反映强烈化学风化作用,CIA值介于60~80代表中等风化强度,而低的CIA值(<60)则指示了弱的风化强度。CIA计算公式如下:

$$CIA = [Al_2O_3 / (Al_2O_3 + CaO^* + Na_2O + K_2O)] \times 100 \quad (1)$$

式中:氧化物分子式代表该氧化物的含量,mol; CaO^* 代表硅酸盐矿物组分中的CaO,不包含碳酸盐和磷灰石中的CaO。 CaO^* 的计算参考文献[51]:①首先通过 P_2O_5 数据扣除磷灰石中的CaO($CaO' = CaO - 10P_2O_5/3$);②如果 $CaO' > Na_2O$,则以 Na_2O 近似替代硅酸盐矿物中的CaO,如果 $CaO' = Na_2O$,而 $CaO' < Na_2O$,则 CaO' 即

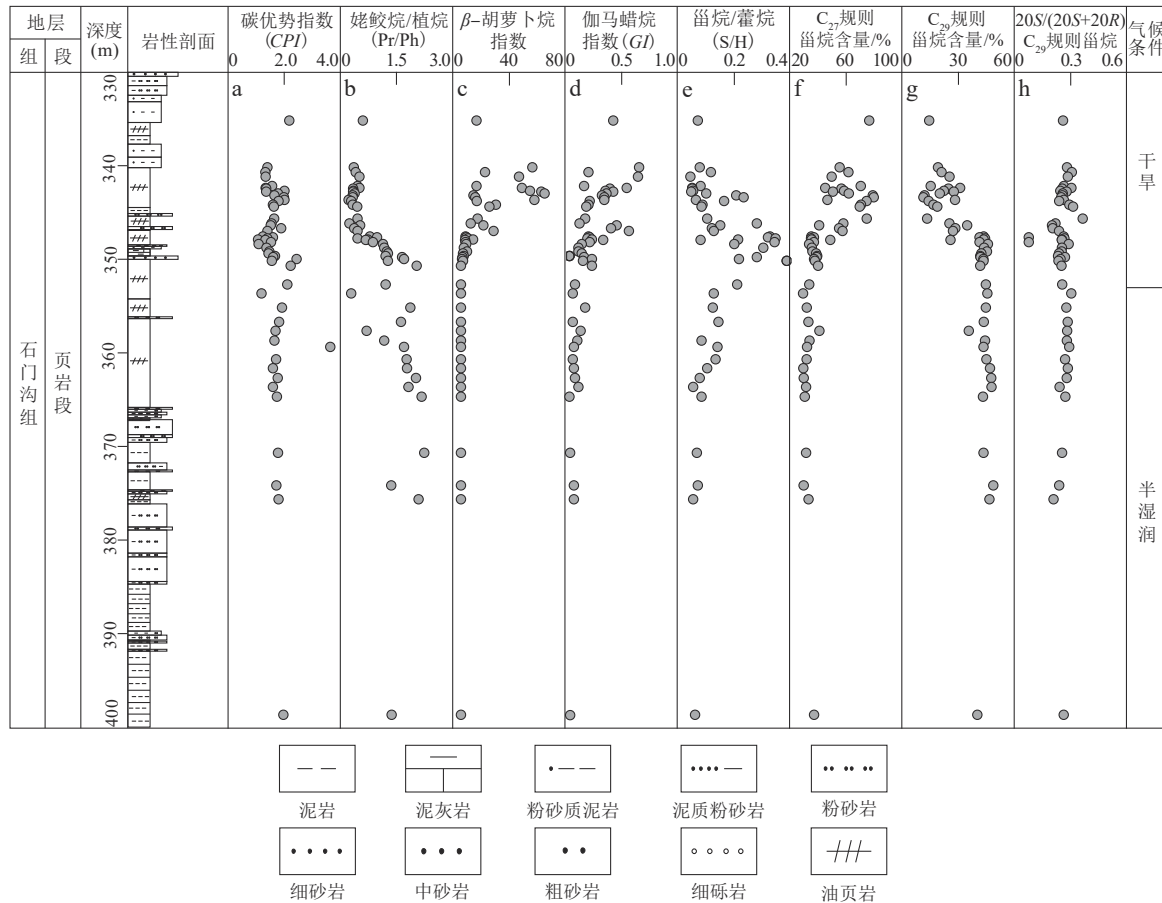


图 11 柴达木盆地北缘鱼油页岩 1 井石门沟组页岩段饱和烃生物标志化合物参数

Fig. 11 Parameters of the biomarkers of saturated hydrocarbons in the shale interval of the Shimengou Formation in well YYY-1, northern margin of the Qaidam Basin (see annexed table 1 for calculational formulas)

为 CaO^* 。

另外,化学风化指数(CIW ,无量纲)也是用于评估化学风化强度的指标之一。相较于 CIA , CIW 在计算过程中剔除了 K_2O ,以此来避免风化和成岩过程中 K 交代作用的影响^[52],其计算公式如下:

$$CIW = [\text{Al}_2\text{O}_3 / (\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{CaO}^* + \text{Na}_2\text{O})] \times 100 \quad (2)$$

此外,成分变异指数(ICV)是通过岩石中非黏土矿物和黏土矿物摩尔比例变化来甄别成岩物质是否经历再旋回沉积过程的重要指标^[53],是准确利用 CIA 和 CIW 重建物源区古气候的重要判别依据,其计算公式如下:

$$ICV = (\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O} + \text{CaO}^* + \text{MgO} + \text{MnO} + \text{TiO}_2) / \text{Al}_2\text{O}_3 \quad (3)$$

式中: ICV 为成分变异指数,无量纲;氧化物分子式代表该氧化物的含量,mol。一般 $ICV < 1$ 说明样品成熟度较高,富黏土矿物成分,可能经历了再旋回作用或首次沉积时经历了强风化作用; $ICV \geq 1$ 表明样品成熟度较低, CIA 受沉积再旋回影响较小。页岩段样品 ICV 值介于6.0~73.1,表明样品成熟度低, CIA 值不受沉积

再旋回的影响(图7)。另外,不含 K 的化学风化指数 CIW 可以排除成岩过程中钾交代的影响^[52]。页岩段 CIA 与 CIW 趋势几乎一致,二者复相关系数(R^2)为0.97,表明样品基本上不受钾交代的影响。综上可知,页岩段 CIA 值所代表的风化信息是可靠的。页岩段下部的 CIA 高值(平均值为83)显示此时期相对强烈的化学风化(图7),反映了相对湿润的气候背景。页岩段上部降低的 CIA 值(平均值为75)显示其沉积时期较弱的风化作用,减弱的化学风化作用证实了此时期逐渐变干的气候特征(图7)。

4.2.3 湖泊水体盐度响应

区域气候的干湿变化可在一定程度上通过湖泊水体的盐度变化来体现^[54]。元素地球化学被广泛应用于古湖泊/海洋的盐度恢复^[49]。例如,锶(Sr)和钡(Ba)作为两种化学性质相近的碱金属元素,但在不同矿化度水体中却具有不同的地球化学行为。与 Sr 相比, Ba 在水柱中更容易以 BaSO_4 或 BaCO_3 形式析出,而随着水柱盐度的增加, Sr 也逐渐沉淀^[55]。因此, Sr/Ba 含量比

值与水体盐度正相关,被广泛应用于古盐度恢复。另外,淡水沉积体系中往往硫酸盐浓度较低,而咸化水体中通常都有较高硫酸盐浓度,而水体中的硫酸根离子往往与水体盐度成正比,沉积物的总硫含量(TS)和TS/TOC比值与水体盐度往往呈正相关^[49]。

页岩段下部Sr/Ba与TS/TOC整体较低,Sr/Ba比值(平均值为0.19)低于淡水/半咸水阈值(0.20),而TS/TOC比值(平均值为0.04)全部低于淡水/咸化水体阈值(0.10),表明页岩段下部沉积时期湖泊水体盐度很低(图7)。页岩段上部纹层状油页岩富含碳酸盐矿物,这很大程度上干扰了Sr/Ba比值所反映的古盐度信息。这是由于 Sr^{2+} 容易替换碳酸盐矿物中 Ca^{2+} ,并占据其晶格位置,Sr元素含量极易受到过量碳酸盐矿物的影响^[49]。根据Wei和Algeo^[49]提出的方法进行矫正后显示,当样品中CaO含量大于1.0%时,页岩段上部Sr/Ba比值与CaO开始呈显著的正相关,表明页岩段上部碳酸盐矿物的含量是导致上部Sr/Ba升高的主要因素,而非盐度的变化。因此,页岩段上部古盐度信息更多依靠TS/TOC比值,急剧升高的TS/TOC比值显示页岩段上部湖泊水体盐度急剧升高。此外,生物标志化合物也是水体盐度的良好指示。页岩段上部纹层状油页岩中检测出高丰度的植烷、伽马蜡烷与 β -胡萝卜烷,这被认为是盐湖沉积物的典型特征^[37]。例如,在准噶尔盆地风城组和芦草沟组^[56-57]、三塘湖盆地芦草沟组油页岩^[16]、美国绿河组油页岩等咸化湖相地层及相关油气中,均发现有丰富的 β -胡萝卜烷和伽马蜡烷^[58-59]。因此,页岩段上部纹层状油页岩沉积时期,湖泊显示出显著的咸化特征,是对气候干旱化的显著响应。

综合孢粉植物群的演化、物源区化学风化强度与湖泊水体古盐度变化可知,耐旱植被的发育、风化的减弱以及湖泊咸化具有高度的一致性,均显示页岩段上部沉积时期研究区气候整体趋向于干旱化。由此可知,页岩段下部的黑色块状油页岩沉积于相对湿润气候背景下的淡水湖泊环境,而上部纹层状油页岩形成于相对干旱气候条件下的咸化湖泊环境。

4.3 气候干旱化对油页岩成矿富集条件的影响

4.3.1 有机质来源及生产力

有机质的生物来源决定了生产力的组成,影响了油页岩的有机质类型^[4]。根据上文可知,页岩段有机质类型自下而上整体由Ⅲ型和Ⅱ型向Ⅰ型演变(图10),反映了随着气候干旱化,湖泊有机质来源的显著变化。这种有机质类型及来源的变化同样可为孢

粉相的变化所证实(图6a)。页岩段下部孢粉有机质同时富含孢型、植物碎屑以及无定型有机质,显示出多种有机质来源(图6a)。通常,沉积物中所保存的植物碎屑几乎都是陆生植物来源,孢型则由植物的孢子和花粉组成,而无定形有机质通常是缺氧环境沉积物中的主要有机质成分,一般来源于降解的浮游藻类^[60]。页岩段上部孢粉有机质中植物碎屑与孢型含量极低,无定型有机质则急剧增加(平均含量为84.9%),表明纹层状油页岩有机质来源多为湖泊藻类。显微组分结果同样显示页岩段下部有机质为陆源有机质与藻类有机质的混合来源,而上部则以纹层状藻类为主,几乎不含陆源有机质(图5,图6b)。另外,页岩段规则甾烷的分布也显示出一致的变化规律,页岩段下部 C_{27} 规则甾烷与 C_{29} 规则甾烷大致相当,显示出混合有机质来源特征,而页岩段上部 C_{27} 规则甾烷优势则表明浮游生物/藻类为主的有机质来源(图12)。由此可知,页岩段下部与上部有机质来源发生了显著的变化,这与气候的干旱化具有很强的关联性。

生产力是控制湖泊初始有机质生产的关键,对于油页岩有机质的丰度有重要影响。磷是重要营养元素,在基本生化反应中扮演着重要的角色,包括遗传物质的形成(DNA和RNA)和能量的传递(ATP)^[61]。磷也是生物体内许多细胞结构的组成成分,在地质时间尺度上,磷是海洋/湖泊生物生产力的主要限制营养元素^[62]。因此,磷元素被广泛应用于古生产力的表征^[62]。然而,由于沉积物中的磷具有多种来源,包括陆源成因、生物成因与热液成因,通常只有与生物成因

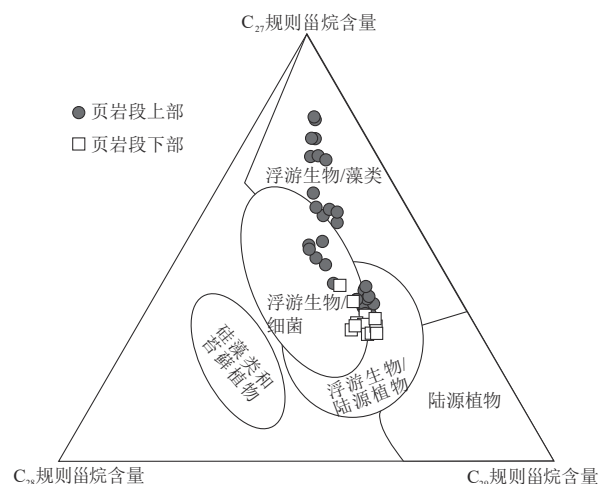


图12 柴达木盆地北缘鱼油页岩1井石门沟组页岩段 C_{27} 、 C_{28} 和 C_{29} 规则甾烷含量分布三角图(图版据文献[10]修改)

Fig. 12 Distribution of C_{27} , C_{28} , and C_{29} regular steranes in the shale interval of the Shimengou Formation in well YYY-1, northern margin of the Qaidam Basin (modified after [10])

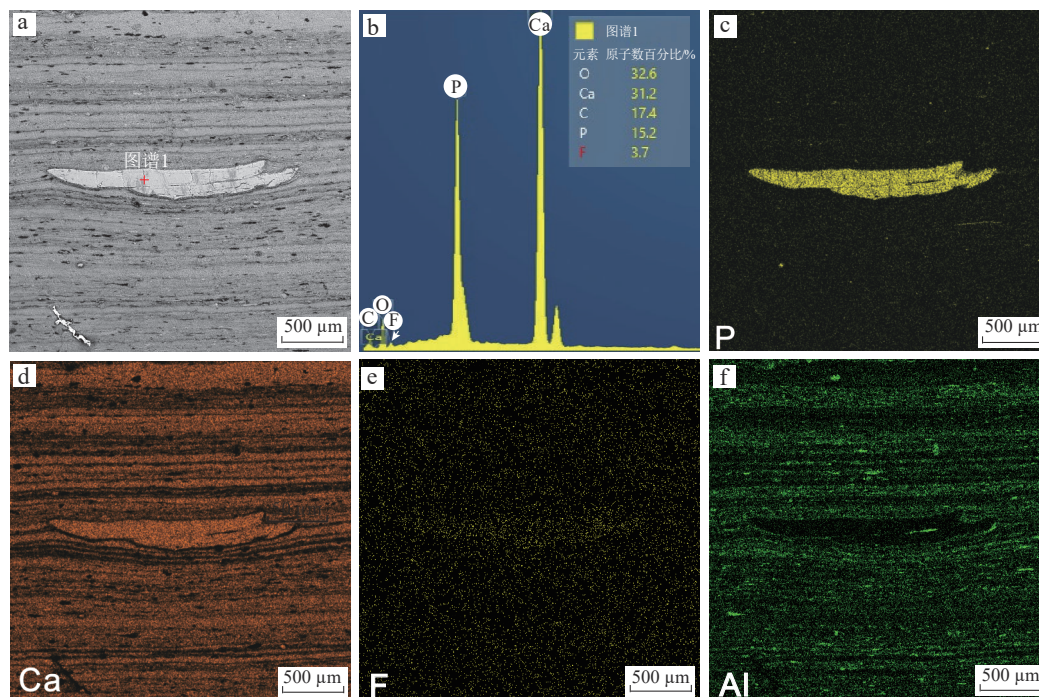


图13 柴达木盆地北缘鱼油页岩1井石门沟组页岩段纹层状油页岩样品(埋深346.8 m)能谱图与元素面分析图

Fig. 13 EDS and elemental analyses of laminated oil shale samples from the shale interval of the Shimengou Formation in well YYY-1, northern margin of the Qaidam Basin

a. 纹层状油页岩背散射照片;b. 纹层状油页岩能谱图;c. 磷(P)元素面扫描图;d. 钙(Ca)元素面扫描图;e. 氟(F)元素面扫描图;f. 铝(Al)元素面扫描图

相关的磷元素才可反映生产力的变化。因此,磷作为生产力指标需要通过钛(Ti)等代表陆源输入的元素扣除陆源因素的影响^[62]。页岩段下部P/Ti含量值整体较为稳定,而上部P/Ti比值急剧升高显示出大幅提升的湖盆生产力(图7f)。通过对页岩段上部高磷样品进行能谱以及磷元素的面分析可知,纹层状油页岩中的磷元素主要赋存于透镜状的碳酸盐氟磷灰石中(图13)。袁伟等^[63]对鄂尔多斯盆地长七段富有机质页岩中磷灰石进行成因分析时认为磷灰石形成机制主要为生物的间接作用,受生物量和氧化还原条件的影响。浮游生物吸收水介质中的磷进行繁殖生长,死亡后释放出自身所含的磷。磷在富氧状态下磷酸盐以高铁络合物形式矿化而保留在沉积物中,而在厌氧状态下 Fe^{3+} 被还原为 Fe^{2+} ,易与磷生成可溶性的磷酸亚铁盐,并与磷酸盐一起释入上覆水中,进而大幅提升表层生产力,另一部分进则入沉积物孔隙水中形成磷灰石^[64]。这可能是页岩段上部生产力大幅提升的原因。

根据有机岩石学观察显示下部泥岩与块状油页岩中藻类多为淡水*Botryococcus*藻,而上部纹层状油页岩多为层状藻类(图5)。这表明随着湖盆盐度的变化,湖泊藻类属种发生了显著更替。Jia等^[9]对嫩江组油页岩的有机岩石学分析同样发现藻类属种随着湖盆水

体盐度的变化,在淡水环境中结构藻(*Botryococcus*藻)更为发育,而层状藻类更适应相对咸化的水体中。许圣传等^[65]对山东黄县盆地油页岩研究时发现,海侵导致湖泊咸化,湖泊古生态也随之发生变化,原先适应淡水环境的金星类介形虫大量死亡,造成湖盆底部沉积大量介形虫化石。同时,广盐性生物逐渐发展,并逐渐取代局限性淡水生物。这意味湖泊水体盐度变化过程中都往往伴随着生物群落的演替。据此可以推断随着气候干旱化,湖泊水体盐度上升,引发了淡水生物的大量死亡,释放出大量的磷元素,在相对富氧的情况下进入到沉积物中。页岩段上部缺氧的底水环境诱发了沉积物中磷元素大量释放至水体中,为藻类勃发提供了充足的营养物质,极大提升了生产力。页岩段上部剧烈波动的甾烷/藿烷含量比值(S/H)也印证了这一点(图11e)。沉积岩中的甾烷主要由真核生物甾醇转化而成,而藿烷的先质为细菌藿多醇,二者的比值反映了生物群落中真核生物与原核生物的占比^[66]。S/H比值在页岩段下部整体呈稳定的低值,而上部开始急剧升高,显示出真核藻类的急剧扩张。

4.3.2 有机质保存

有机质在水体沉降过程中通常伴随着有机质的分

解和矿化,而通过微生物有氧呼吸被氧化产生水和 CO_2 是有机质分解的关键过程之一^[18, 67]。因此,水体的氧化还原状态是有机质保存效率的关键因素^[68-69]。沉积物中的氧化-还原敏感元素含量、富集度和比值通常受控于水柱氧化-还原电位,可有效用于指示底水氧化-还原状态^[70-71]。在现今海洋中,U和Mo元素在氧化条件下分别以化学行为保守的碳酸铀酰配合物和钼酸盐阴离子的形式溶解于海水中。然而,在缺氧环境下,U和Mo元素分别被沉积物快速吸收^[70]。因此,U和Mo元素在沉积物中的富集程度可有效表征水体的氧化-还原状态,其自生富集程度可用富集因子表征^[70],其计算公式如下:

$$X_{\text{EF}} = (X/\text{Al})_{\text{样品}} / (X/\text{Al})_{\text{参考物质}} \quad (4)$$

式中:X和Al分别代表元素X(Mo或U)和Al的含量,%; X_{EF} 为元素X的富集因子,无量纲。在本文中,后太古宙黑色页岩(PAAS)作为参考物质用于标准化,其Mo,U和Al含量分别为 1.0×10^{-6} 、 3.1×10^{-6} 和10%^[72]。

尽管如此,Mo和U元素在还原条件下仍存在重要差异,这可能导致它们在沉积物中丰度的差异。通常,U元素在二价铁(Fe^{2+})和三价铁(Fe^{3+})转换界面就开始沉积,而Mo元素的沉积则需要在富含 H_2S 的环境中,故 U_{EF} 与 Mo_{EF} 的比值在一定程度上可以反映水体的缺氧硫化程度^[73]。页岩段下部 Mo_{EF} 和 U_{EF} 整体呈现出稳定的低值,而上部则急剧升高,表明湖泊水体缺氧程度升高(图7)。根据石门沟组 $Mo_{\text{EF}}-U_{\text{EF}}$ 协变关系图可知,页岩段下部整体沉积于贫氧的水体环境中,而页岩段上部则以缺氧环境为主(图14)。上段部分样品 $Mo_{\text{EF}}/U_{\text{EF}}$ 接近于1.0,表明湖泊可能存在间歇性的硫化。另外,Meng等^[74]在团鱼山纹层状油页岩中检测出较低丰度的芳基类异戊二烯烃,同样推断此时期湖泊水体环境存在轻微的透光层硫化现象。与之相对应的是,页岩段下部姥鲛烷/植烷含量比值(Pr/Ph)同样显示出低值(平均值为0.71),整体小于0.80(图11)。姥鲛烷与植烷均来自于叶绿素a和b的植基侧链,在缺氧条件下有利于形成植醇,最后形成植烷。然而,在富氧条件下植醇优先转化为姥鲛烷。因此,低的 Pr/Ph 比值(通常小于0.80)被认为是缺氧水体的标志^[75]。另外,页岩段 $\text{Pr}/n\text{C}_{17}$ 和 $\text{Ph}/n\text{C}_{18}$ 含量比值($n\text{C}_{17}$ 和 $n\text{C}_{18}$ 为正构烷烃)同样显示页岩段沉积水体环境由早期的贫氧状态向后期缺氧状态演变整体特征(图15)。

根据上述分析可知,随着气候干旱化,湖泊咸化,湖泊水体氧化-还原度发生了显著的变化,由贫氧的淡水环境演变为缺氧的咸化环境(图7,图14)。通常,在咸化湖泊当中由于纵向上的盐度梯度差异,经常引

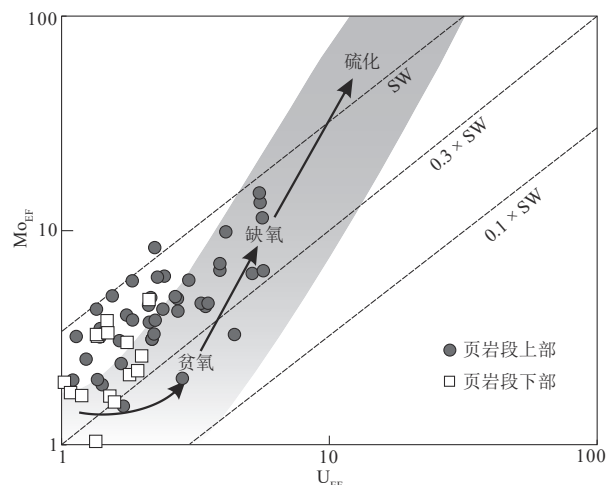


图14 柴达木盆地北缘鱼油页岩1井石门沟组页岩段 $Mo_{\text{EF}}-U_{\text{EF}}$ 协变关系

Fig. 14 Mo_{EF} vs. U_{EF} covariation diagram of the shale interval of the Shimengou Formation in well YYY-1, northern margin of the Qaidam Basin

(Mo_{EF} 为Mo元素富集因子; U_{EF} 为U元素富集因子。)

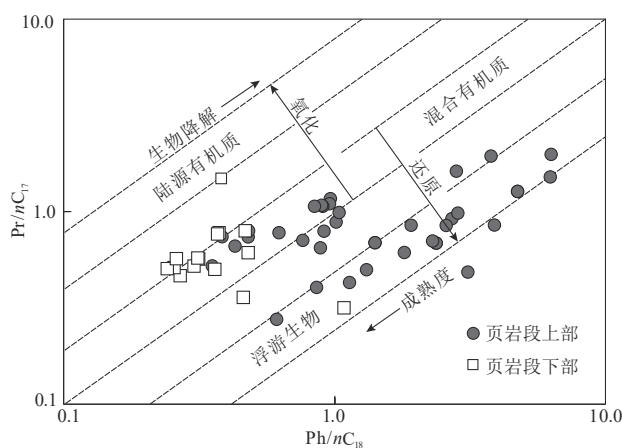


图15 柴达木盆地北缘鱼油页岩1井石门沟组页岩段 $\text{Pr}/n\text{C}_{17}$ 与 $\text{Ph}/n\text{C}_{18}$ 交汇图

Fig. 15 $\text{Pr}/n\text{C}_{17}$ vs. $\text{Ph}/n\text{C}_{18}$ cross plot of the shale interval of the Shimengou Formation in well YYY-1, northern margin of the Qaidam Basin

($\text{Pr}/n\text{C}_{17}$ 为姥鲛烷/ $n\text{C}_{17}$; $\text{Ph}/n\text{C}_{18}$ 为植烷/ $n\text{C}_{18}$ 。)

发湖泊的盐度分层,使得表层与底层水体循环受限,底层水体得以保持长期的缺氧状态^[18, 76]。页岩段上部纹层状油页岩高丰度的伽马蜡烷同样支持这一结论(图11d)。伽马蜡烷的生物前身物纤毛虫通常生存于的氧化还原界面,以绿硫细菌作为食物来源,故沉积物中高丰度的伽马蜡烷往往与水体的分层密切相关^[77]。页岩段伽马蜡烷指数(GI)整体呈现向上逐渐上升的趋势,下部整体为低值(平均值为0.08),而上部急剧上升,平均值为0.29,最高可达0.65,显示分层和局限的

水体状态(图 11d,图 15)。随着气候干旱化,湖泊水体盐度升高,产生密度分层,底层水体缺氧加剧,长期维持稳定的缺氧环境,促进了有机质的保存。

4.4 气候干旱化与油页岩成矿耦合机制

在系统梳理油页岩生烃潜力、气候干旱化以及油页岩有机质富集条件的基础上,本次研究建立了气候干旱化进程中的油页岩差异成矿模式。中侏罗世时期,柴达木盆地处于构造沉降阶段,盆地经历了水体不断加深,湖侵作用不断加强的过程^[32, 78]。在中侏罗世晚期,即石门沟组页岩段沉积时期,湖泊规模达到最大,研究区整体为深湖-半深湖沉积,这为湖相油页岩的发育提供了先决条件^[78]。湖泊的扩张增加了湖泊自生藻类的供给。同时,在相对湿润的气候背景下,陆地针叶植被更为繁盛,保障了陆源有机质的充分供给。发达的地表径流则为陆源有机质的注入提供了传输通道。湖泊自生藻类与陆源有机质的混合来源最终形成了黑色块状油页岩中Ⅱ型至Ⅰ型的有机质。与此同时,高的陆源通量携带了一定的氧气,尽管此时期湖

泊水体最深,但难以维持稳定的缺氧条件,形成了贫氧的淡水环境。因此,此时期有机质的保存条件并非最佳状态,但总体仍有利于有机质的保存。在这一时期沉积的黑色块状油页岩有机质丰度相对较高,生烃潜力好到极好,属于中品质的油页岩(图 16a)。

在页岩段的上部纹层状油页岩沉积时期,研究区气候趋于干旱化,引发了湖泊咸化。随着湖泊水体盐度的变化,湖泊生物群落发生了显著的更替,淡水生物大量消亡,释放出自身所含的P,并进入到沉积物中。随着湖泊咸化程度加剧,引发的水体盐度分层,底层水体处于稳定的缺氧状态,此时累积在沉积物中的P释放到水体中,刺激了表层水体藻类勃发,大幅提升了湖泊有机质的生产力。与之相对应的是,封闭的湖泊水文条件以及萎缩的陆地植被使得注入湖盆中的陆源有机质大幅下降,造就了页岩段上部的藻类为主的有机质来源,最终形成了Ⅰ型有机质。表层水体藻类的繁盛和随后大量死亡的降解作用进一步加剧了底层水体的缺氧,对有机质的保存极为有利,是油页岩有机质富集的最佳模式。因此,此时期沉积的纹层状油页岩中

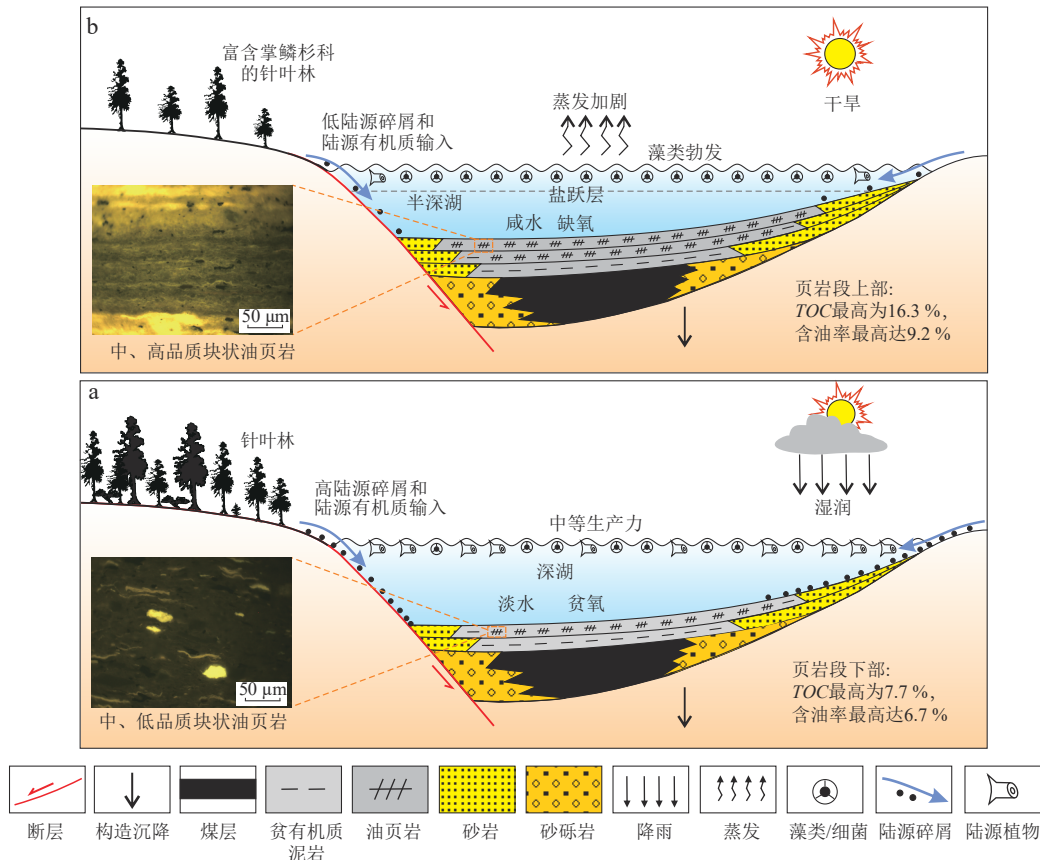


图 16 柴达木盆地中侏罗世晚期气候转折期油页岩成矿模式示意图

Fig. 16 Schematic diagrams showing the metallogenetic models of oil shales in the Qaidam Basin during the dramatic climate shift in the late Middle Jurassic

a. 页岩段下部沉积时期;b. 页岩段上部沉积时期

有机质丰度高,生烃潜力极强,为中等偏高品质油页岩(图16b)。

由上可知,尽管页岩段油页岩为连续沉积,但实际上沉积的是两种完全不同成因类型的油页岩。下部块状油页岩代表的是淡水湖相油页岩,而上部纹层状油页岩则是典型咸水油页岩,促使这两种看似截然不同类型的油页岩成矿转换的关键在于气候干旱化导致的湖盆咸化,继而引发了湖泊水体分层以及藻类的勃发。然而,需要注意的是,这种现象更多发生于气候由湿润向干旱转折的初期。长期干旱化容易加剧湖泊萎缩,将不利于油页岩长期成矿。页岩段纹层状油页岩沉积厚度在12 m左右,其上开始发育浅湖沉积,显示湖泊开始萎缩,不再发育油页岩。相比之下,气候频繁的干湿交替使湖水循环地咸化分层、淡化补水,可能更有利于油页岩的长期沉积。例如,桦甸盆地始新世油页岩形成于气候湿润-干旱频繁交替的盐度分层环境,沉积了多层油页岩层(含油率最高达24.8%)^[79]。另外需要指出的是,现有的研究关注的焦点多在于湖盆咸化分层作用下良好的保存条件对于油页岩有机质富集的贡献,包括海侵作用引发的湖盆咸化亦是如此^[9, 79]。但很少关注咸化过程中生物群落演替,营养元素循环以及生产力的变化对于油页岩成矿富集的影响。本次研究建立的咸化进程中的油页岩成矿模式对此进行了初步的解释,可为油页岩成矿富集提供一些新的认识。

5 结论

1) 基于孢粉学和高分辨率地球化学分析显示,在页岩段上部沉积时期,陆地植被萎缩,耐旱植被发育,化学风化减弱,湖泊趋于咸化。这证实了页岩段沉积时期气候由湿润向干旱转变。其中,下部黑色块状油页岩沉积于相对湿润气候背景的淡水湖,而上部纹层状油页岩形成于干旱气候背景的咸化湖泊。

2) 气候干旱化导致油页岩中有机质的来源由湖泊自生藻类有机质和陆源有机质的混合有机质来源演变为以湖泊自生藻类为主的单一有机质来源,且藻类勃发显著提升了有机质的生产力。同时,湖泊沉积环境也从湿润气候背景下的淡水和贫氧环境,转变为干旱气候背景下的高盐和分层水体环境,促进了有机质的保存。

3) 形成于湿润气候背景下的块状油页岩,有机质丰度较高,有机质类型为Ⅱ型至Ⅰ型,为生烃潜力好到很好的中品质油页岩。而形成于干旱气候背景下的纹

层状油页岩,有机质丰度极高,有机质类型以Ⅰ型为主,为生烃潜力极好的中等偏高品质油页岩。此次气候干旱化事件引发的湖盆咸化,一定程度上提升了油页岩的品质。

参 考 文 献

- [1] 刘招君,董清水,叶松青,等. 中国油页岩资源现状[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2006, 36(6): 869-876.
LIU Zhaojun, DONG Qingshui, YE Songqing, et al. The situation of oil shale resources in China [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2006, 36(6): 869-876.
- [2] 刘招君,孟庆涛,柳蓉. 中国陆相油页岩特征及成因类型[J]. 古地理学报, 2009, 11(1): 105-114.
LIU Zhaojun, MENG Qingtao, LIU Rong. Characteristics and genetic types of continental oil shales in China [J]. Journal of Palaeogeography (Chinese Edition), 2009, 11(1): 105-114.
- [3] 柳蓉,张坤,刘招君,等. 中国油页岩富集与地质事件研究[J]. 沉积学报, 2021, 39(1): 10-28.
LIU Rong, ZHANG Kun, LIU Zhaojun, et al. Oil shale mineralization and geological events in China [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2021, 39(1): 10-28.
- [4] 刘招君,孙平昌. 中国陆相盆地油页岩形成环境与成矿机制[J]. 古地理学报, 2021, 23(1): 1-17.
LIU Zhaojun, SUN Pingchang. Formation environment and mineralization mechanism of oil shale in continental basins of China [J]. Journal of Palaeogeography (Chinese Edition), 2021, 23(1): 1-17.
- [5] 许圣传,刘招君,董清水,等. 抚顺煤田始新统沉积演化及其对煤和油页岩发育的控制[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2012, 36(2): 45-52, 67.
XU Shengchuan, LIU Zhaojun, DONG Qingshui, et al. Eocene sedimentary evolution and its control over coal & oil shale development in Fushun Coalfield [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2012, 36(2): 45-52, 67.
- [6] SUN Pingchang, SACHSENHOFER R F, LIU Zhaojun, et al. Organic matter accumulation in the oil shale- and coal-bearing Huadian Basin (Eocene; NE China) [J]. International Journal of Coal Geology, 2013, 105: 1-15.
- [7] WANG Xiaolin, ZHU Xiaomin, LAI Jin, et al. Paleoenvironmental reconstruction and organic matter accumulation of the Paleogene Shahejie oil shale in the Zhanhua Sag, Bohai Bay Basin, eastern China [J]. Petroleum Science, 2024, 21(3): 1552-1568.
- [8] QIAO Jinqi, LUO Qingyong, ZHANG Kuihua, et al. Geochemistry and organic petrography of the Middle Permian Lucaogou alkaline lacustrine oil shale in the southern Junggar Basin, China: Implications for formation conditions and organic matter accumulation [J]. International Journal of Coal Geology, 2023, 268: 104198.
- [9] JIA Jianliang, BECHTEL A, LIU Zhaojun, et al. Oil shale formation in the Upper Cretaceous Nenjiang Formation of the Songliao Basin (NE China): Implications from organic and

- inorganic geochemical analyses [J]. *International Journal of Coal Geology*, 2013, 113: 11–26.
- [10] ZHANG Kun, LIU Rong, DING Wenjing, et al. The influence of Early Cretaceous paleoclimate warming event on sedimentary environment evolution and organic matter sources in Yin'e Basin: Evidence from petrology and molecular geochemistry [J]. *International Journal of Coal Geology*, 2022, 254: 103972.
- [11] PAN Yongshuai, HUANG Zhilong, LI Tianjun, et al. Environmental response to volcanic activity and its effect on organic matter enrichment in the Permian Lucaogou Formation of the Malang Sag, Santanghu Basin, northwest China [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2020, 560: 110024.
- [12] XU Chuan, SHAN Xuanlong, HE Wentong, et al. The influence of paleoclimate and a marine transgression event on organic matter accumulation in lacustrine black shales from the Late Cretaceous, southern Songliao Basin, northeast China [J]. *International Journal of Coal Geology*, 2021, 246: 103842.
- [13] ZHANG Kun, LIU Rong, LIU Zhaojun, et al. Influence of palaeoclimate and hydrothermal activity on organic matter accumulation in lacustrine black shales from the Lower Cretaceous Bayingebi Formation of the Yin'e Basin, China [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2020, 560: 110007.
- [14] LI Yuanji, SUN Pingchang, LIU Zhaojun, et al. Factors controlling the distribution of oil shale layers in the Eocene Fushun Basin, NE China [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2021, 134: 105350.
- [15] FRENCH K L, BIRDWELL J E, VANDEN BERG M D. Biomarker similarities between the saline lacustrine Eocene Green River and the Paleoproterozoic Barney Creek Formations [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2020, 274: 228–245.
- [16] LIU Bo, BECHTEL A, SACHSENHOFER R F, et al. Depositional environment of oil shale within the second member of Permian Lucaogou Formation in the Santanghu Basin, northwest China [J]. *International Journal of Coal Geology*, 2017, 175: 10–25.
- [17] 冯德浩, 刘成林, 杨海波, 等. 准噶尔盆地东部中二叠统咸化湖相烃源岩生气潜力及天然气勘探意义[J]. *石油与天然气地质*, 2024, 45(5): 1289–1304.
- FENG Dehao, LIU Chenglin, YANG Haibo, et al. Gas-generating potential of the Middle Permian saline lacustrine source rocks and significance for natural gas exploration in the eastern Junggar Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2024, 45(5): 1289–1304.
- [18] WARREN J. *Evaporites* [M]//WHITE W M. *Encyclopedia of Geochemistry*. Cham: Springer, 2018: 464–471.
- [19] 邓胜徽, 卢远征, 赵怡, 等. 中国侏罗纪古气候分区与演变[J]. *地学前缘*, 2017, 24(1): 106–142.
- DENG Shenghui, LU Yuanzheng, ZHAO Yi, et al. The Jurassic palaeoclimate regionalization and evolution of China [J]. *Earth Science Frontiers*, 2017, 24(1): 106–142.
- [20] XIE Wenquan, TAN Jingqiang, WANG Wenhui, et al. Record of middle Jurassic wildfire and its incidental mercury emissions in northern Qaidam Basin, China: Evidence from the inertinite and mercury anomalies in coal [J]. *International Journal of Coal Geology*, 2022, 261: 104078.
- [21] QIN Jing, WANG Shuangqing, SANEI H, et al. Revelation of organic matter sources and sedimentary environment characteristics for shale gas formation by petrographic analysis of middle Jurassic Dameigou Formation, northern Qaidam Basin, China [J]. *International Journal of Coal Geology*, 2018, 195: 373–385.
- [22] 谢文泉, 刘招君, 肖丽佳, 等. 柴北缘鱼卡地区中侏罗统石门沟组油页岩资源潜力[J]. *特种油气藏*, 2018, 25(5): 78–83.
- XIE Wenquan, LIU Zhaojun, XIAO Lijia, et al. Oil shale resource potential of the Middle Jurassic Shimengou Formation in Yuka of the North Rim in Qaidam Basin [J]. *Special Oil & Gas Reservoirs*, 2018, 25(5): 78–83.
- [23] MENG Qingtao, LIU Zhaojun, SUN Pingchang, et al. Characteristic and accumulation model of Middle Jurassic oil shale in the Yuqia area, northern Qaidam Basin, northwest China [J]. *Oil Shale*, 2018, 35(1): 1–25.
- [24] YUAN Jinglian, LIU Yongjiang, LI Weimin, et al. Reconstruction of the Early-Middle Jurassic source-to-sink system in the western Qaidam Basin (North Tibet): Constraints from zircon U-Pb ages of Jurassic sediments and granites [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2022, 232: 105164.
- [25] 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.
- [26] 魏学斌, 马新民, 杨梅, 等. 柴达木盆地英雄岭构造带新生代隆升过程与油气成藏效应[J]. *特种油气藏*, 2024, 31(2): 19–27.
- WEI Xuebin, MA Xinmin, YANG Mei, et al. Cenozoic uplift processes and hydrocarbon accumulation effects in the Yingxiongling tectonic belt in Qaidam Basin [J]. *Special Oil & Gas Reservoirs*, 2024, 31(2): 19–27.
- [27] LI Meng, SHAO Longyi, LIU Lei, et al. Lacustrine basin evolution and coal accumulation of the Middle Jurassic in the Saishiteng coalfield, northern Qaidam Basin, China [J]. *Journal of Palaeogeography*, 2016, 5(3): 205–220.
- [28] 胡俊杰, 马寅生, 吴祎, 等. 柴达木盆地旺尕秀地区上侏罗统一白垩统风成砂的发现及其意义[J]. *古地学报*, 2018, 20(5): 776–786.
- HU Junjie, MA Yinsheng, WU Yi, et al. Discovery and significance of the Upper Jurassic–Lower Cretaceous Eolian sands in Wanggaxiu area, Qaidam Basin [J]. *Journal of Palaeogeography (Chinese Edition)*, 2018, 20(5): 776–786.
- [29] WANG Yongdong, MOSBRUGGER V, ZHANG Hong. Early to Middle Jurassic vegetation and climatic events in the Qaidam Basin, northwest China [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2005, 224(1/3): 200–216.
- [30] 谢文泉, 贾建亮, 刘招君. 柴达木盆地北缘中侏罗统石门沟组煤中多环芳烃分布特征及其地质意义[J]. *地质学报*, 2023, 97(7): 2363–2377.
- XIE Wenquan, JIA Jianliang, LIU Zhaojun. Distribution and

- geological significance of polycyclic aromatic hydrocarbons in coal from the Shimengou Formation of Middle Jurassic in the northern Qaidam Basin[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2023, 97(7): 2363–2377.
- [31] 王君贤. 柴达木盆地团鱼山地区中侏罗统石门沟组油页岩特征及资源评价[D]. 长春: 吉林大学, 2018.
- WANG Junxian. Characteristics and resource evaluation of oil shale in the Middle Jurassic Shimen Gou Formation in Tuyu Shan area of Qaidam Basin[D]. Changchun: Jilin University, 2018.
- [32] 李猛. 柴达木盆地北缘侏罗系沉积体系与页岩气富集规律[D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2014.
- LI Meng. Sedimentology and shale gas accumulation of the Jurassic in the northern Qaidam Basin [D]. Beijing: China University of Mining and Technology (Beijing), 2014; .
- [33] 杨平, 杨玉芹, 马立协, 等. 柴达木盆地北缘侏罗系沉积环境演变及其石油地质意义[J]. *石油勘探与开发*, 2007, 34(2): 160–164.
- YANG Ping, YANG Yuqin, MA Lixie, et al. Evolution of the Jurassic sedimentary environment in northern margin of Qaidam Basin and its significance in petroleum geology [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2007, 34(2): 160–164.
- [34] 白悦悦, 刘招君, 孙平昌, 等. 柴北缘鱼卡地区中侏罗统石门沟组沉积相特征研究[J]. *矿产勘查*, 2020, 11(7): 1321–1333.
- BAI Yueyue, LIU Zhaojun, SUN Pingchang, et al. Sedimentary facies characteristics in Middle Jurassic Shimengou Formation, Yuqia area, North Qaidam Basin[J]. *Mineral Exploration*, 2020, 11(7): 1321–1333.
- [35] 党洪量. 柴达木盆地北缘中侏罗统石门沟组二段油页岩特征及赋存规律[D]. 长春: 吉林大学, 2019.
- DANG Hongliang. Characteristics and occurrence regularity of oil shales in the second of Middle Jurassic Shimengou Formation in northern Qaidam Basin[D]. Changchun: Jilin University, 2019.
- [36] TYSON R V. Sedimentary organic matter: Organic facies and palynofacies[M]. London: Chapman & Hall, 1995.
- [37] PETERS K E, CASSA M R. Applied source rock geochemistry [M]/MAGOON L B, DOW W G. The Petroleum System—from Source to Trap. Tulsa: American Association of Petroleum Geologists, 1994: 93–120.
- [38] 贾建亮, 刘招君, 孟庆涛, 等. 中国陆相油页岩含油率与总有机碳的响应机理[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2020, 50(2): 368–377.
- JIA Jianliang, LIU Zhaojun, MENG Qingtao, et al. Response mechanism between oil yield and total organic carbon of non-marine oil shale in China[J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2020, 50(2): 368–377.
- [39] International Committee for Coal and Organic Petrology (ICCP). The new vitrinite classification (ICCP System 1994) [J]. *Fuel*, 1998, 77(5): 349–358.
- [40] 陶明华, 崔周旗, 陈国强. 中国东北部中生代孢粉组合序列及古气候演变[J]. *微体古生物学报*, 2013, 30(3): 275–287.
- TAO Minghua, CUI Zhouqi, CHEN Guoqiang. Mesozoic spore-pollen assemblages and climate fluctuations in northeast China [J]. *Acta Micropalaeontologica Sinica*, 2013, 30(3): 275–287.
- [41] GALLOWAY J M, SWEET A R, SWINDLES G T, et al. Middle Jurassic to Lower Cretaceous paleoclimate of Sverdrup Basin, Canadian Arctic archipelago inferred from the palynostratigraphy [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2013, 44: 240–255.
- [42] LI Liqin, WANG Yongdong. Late Triassic palynofloras in the Sichuan Basin, South China: Synthesis and perspective [J]. *Palaeoworld*, 2016, 25(2): 212–238.
- [43] SANTOS A A, JAIN S, DIEZ J B. Upper Jurassic palynology from the Blue Nile Basin (Ethiopia) [J]. *Review of Palaeobotany and Palynology*, 2021, 285: 104361.
- [44] VAKHRAMEEV V A. Jurassic and Cretaceous floras and climates of the earth [M]. LITVINOV J V, translated. Cambridge: Cambridge University Press, 1991.
- [45] LI Liqin, WANG Yongdong, VAJDA V, et al. Late Triassic ecosystem variations inferred by palynological records from Hechuan, southern Sichuan Basin, China [J]. *Geological Magazine*, 2018, 155(8): 1793–1810.
- [46] 杜圳, 张明震, 王森, 等. 甘肃窑街中侏罗统煤系沉积的孢粉记录及其古气候意义[J]. *微体古生物学报*, 2018, 35(4): 403–416.
- DU Zhen, ZHANG Mingzhen, WANG Sen, et al. Palynological records of the coal-bearing deposition from the Middle Jurassic in Yaojie, Gansu Province, northwest China and its palaeoclimatic significance [J]. *Acta Micropalaeontologica Sinica*, 2018, 35(4): 403–416.
- [47] 刘松欣, 辛存林, 王晶菁, 等. 甘肃宝积山盆地中侏罗世植物群特征及古生态、古气候研究[J]. *地质学报*, 2021, 95(12): 3592–3605.
- LIU Songxin, XIN Cunlin, WANG Jingjing, et al. Characteristics of the Middle Jurassic flora in the Baojishan Basin, Gansu Province, and its study on paleoecology and paleoclimate [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2021, 95(12): 3592–3605.
- [48] WANG Ping, DU Yuansheng, YU Wenchao, et al. The chemical index of alteration (CIA) as a proxy for climate change during glacial-interglacial transitions in Earth history [J]. *Earth-Science Reviews*, 2020, 201: 103032.
- [49] WEI Wei, ALGEO T J. Elemental proxies for paleosalinity analysis of ancient shales and mudrocks [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2020, 287: 341–366.
- [50] NESBITT H W, YOUNG G M. Early Proterozoic climates and plate motions inferred from major element chemistry of lutites [J]. *Nature*, 1982, 299(5885): 715–717.
- [51] MCLENNAN S M. Weathering and global denudation [J]. *The Journal of Geology*, 1993, 101(2): 295–303.
- [52] HARNOIS L. The CIW index: A new chemical index of weathering[J]. *Sedimentary Geology*, 1988, 55(3/4): 319–322.
- [53] COX R, LOWE D R, CULLERS R L. The influence of sediment recycling and basement composition on evolution of mudrock chemistry in the southwestern United States [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1995, 59(14): 2919–2940.
- [54] WARREN J K. Evaporites: Sediments, resources and hydrocarbons[M]. Berlin: Springer, 2006.
- [55] BURAZER N, ŠAJNOVIĆ A, SPAHIĆ D, et al. Unveiling the paleosalinity constraints on southern peri-Pannonian Lower Miocene lacustrine systems in Serbia and Bosnia and Herzegovina: Lopare (Dinaride Lake System) versus Toplica Basin (Serbian

- Lake System[J]. *Chemical Geology*, 2025, 671: 122475.
- [56] WANG Dongyong, LI Meijun, CHEN Jianfa, et al. The biological source and paleoenvironment implication of rare short-chain lanostanes in alkaline lacustrine sediments [J]. *Organic Geochemistry*, 2023, 186: 104705.
- [57] DING Wenjing, HOU Dujie, JIANG Lian, et al. High abundance of carotenes in the brackish-saline lacustrine sediments: A possible cyanobacteria source? [J]. *International Journal of Coal Geology*, 2020, 219: 103373.
- [58] FRENCH K L, BIRDWELL J E, VANDEN BERG M D. Biomarker similarities between the saline lacustrine Eocene Green River and the Paleoproterozoic Barney Creek Formations [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2020, 274: 228–245.
- [59] MARTINS L L, SCHULZ H M, SEVERIANO RIBEIRO H J P, et al. Organic geochemical signals of freshwater dynamics controlling salinity stratification in organic-rich shales in the Lower Permian Irati Formation (Paraná Basin, Brazil)[J]. *Organic Geochemistry*, 2020, 140: 103958.
- [60] MANSOUR A, GENTZIS T, CARVAJAL-ORTIZ H, et al. Geochemistry and palynology of the Upper Albian at the Abu Gharadig Basin, southern Tethys: Constraints on the oceanic anoxic event 1d[J]. *Geological Journal*, 2020, 55(9): 6338–6360.
- [61] TANG Quehui, PENG Liang, YANG Yang, et al. Total phosphorus-precipitation and Chlorophyll a-phosphorus relationships of lakes and reservoirs mediated by soil iron at regional scale[J]. *Water Research*, 2019, 154: 136–143.
- [62] TRIBOVILLARD N, ALGEO T J, LYONS T, et al. Trace metals as paleoredox and paleoproductivity proxies: An update [J]. *Chemical Geology*, 2006, 232(1/2): 12–32.
- [63] 袁伟, 柳广弟, 罗文斌, 等. 鄂尔多斯盆地长7段富有机质页岩中磷灰石类型及其成因[J]. *天然气地球科学*, 2016, 27(8): 1399–1408.
- YUAN Wei, LIU Guangdi, LUO Wenbin, et al. Species and formation mechanism of apatites in the 7th member of Yanchang Formation organic-rich shale of Ordos Basin, China[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2016, 27(8): 1399–1408.
- [64] SCHOEPFER S D, SHEN Jun, WEI Hengye, et al. Total organic carbon, organic phosphorus, and biogenic barium fluxes as proxies for paleomarine productivity[J]. *Earth-Science Reviews*, 2015, 149: 23–52.
- [65] 许圣传, 董清水, 闫丽萍, 等. 山东黄县断陷盆地油页岩特征及生成机制[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2006, 36(6): 954–958.
- XU Shengchuan, DONG Qingshui, YAN Liping, et al. The characteristics and the formation mechanism of the oil shale in Huangxian faulted basin, Shandong Province[J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2006, 36(6): 954–958.
- [66] VOLKMAN J K. Lipids of geochemical interest in microalgae[M]// WILKES H. *Hydrocarbons, Oils and Lipids: Diversity, Origin, Chemistry and Fate*. Cham: Springer, 2020: 159–191.
- [67] 张慧芳, 吴欣松, 王斌, 等. 陆相湖盆沉积有机质富集机理研究进展[J]. *沉积学报*, 2016, 34(3): 463–477.
- ZHANG Huifang, WU Xinsong, WANG Bin, et al. Research progress of the enrichment mechanism of sedimentary organics in lacustrine basin[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2016, 34(3): 463–477.
- [68] MORT H P, ADATTE T, FOLLM K B, et al. Phosphorus and the roles of productivity and nutrient recycling during oceanic anoxic event 2[J]. *Geology*, 2007, 35(6): 483–486.
- [69] LU Yangbo, JIANG Shu, LU Yongchao, et al. Productivity or preservation? The factors controlling the organic matter accumulation in the late Katian through Hirnantian Wufeng organic-rich shale, South China [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2019, 109: 22–35.
- [70] ALGEO T J, LI Chao. Redox classification and calibration of redox thresholds in sedimentary systems [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2020, 287: 8–26.
- [71] TRIBOVILLARD N, ALGEO T J, LYONS T, et al. Trace metals as paleoredox and paleoproductivity proxies: An update [J]. *Chemical Geology*, 2006, 232(1/2): 12–32.
- [72] TAYLOR S R, MCCLENNAN S M. *The continental crust: its composition and evolution* [M]. Oxford: Blackwell Scientific, 1985.
- [73] ALGEO T J, LI Chao. Redox classification and calibration of redox thresholds in sedimentary systems [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2020, 287: 8–26.
- [74] MENG Q T, BECHTEL A, SACHSENHOFER R F, et al. Hydrocarbon potential and palaeo-depositional environment of lacustrine source rocks: Middle Jurassic Shimengou Formation, northern Qaidam Basin, NW China [J]. *Journal of Petroleum Geology*, 2019, 42(1): 37–58.
- [75] PETERS K E, WALTERS C C, MOLDOWAN J M. *The Biomarker Guide: Volume 2, Biomarkers and isotopes in petroleum exploration and earth history* [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2005.
- [76] LIANG Chao, YANG Bo, CAO Yingchang, et al. Salinization mechanism of lakes and controls on organic matter enrichment: From present to deep-time records [J]. *Earth-Science Reviews*, 2024, 251: 104720.
- [77] SINNINGHE DAMSTÉ J S, KENIG F, KOOPMANS M P, et al. Evidence for gammacerane as an indicator of water column stratification [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1995, 59(9): 1895–1900.
- [78] 杨平, 谢宗奎, 袁秀君, 等. 柴达木盆地北缘侏罗纪古生态特征及其古地理意义[J]. *古地理学报*, 2006, 8(2): 165–173.
- YANG Ping, XIE Zongkui, YUAN Xiujun, et al. Palaeoecological characteristics and its palaeogeographic significance of the Jurassic in northern margin of Qaidam Basin [J]. *Journal of Palaeogeography (Chinese Edition)*, 2006, 8(2): 165–173.
- [79] 胡晓峰, 刘招君, 柳蓉, 等. 桦甸盆地始新统桦甸组黏土矿物和无机地球化学特征及其古环境意义[J]. *煤炭学报*, 2012, 37(3): 416–423.
- HU Xiaofeng, LIU Zhaojun, LIU Rong, et al. Clay mineral and inorganic geochemical characteristics of Eocene Huadian Formation in Huadian Basin and their paleoenvironment implications [J]. *Journal of China Coal Society*, 2012, 37(3): 416–423.