

文章编号:1000-0550(2025)04-1489-18

湖相富有机质泥页岩岩相划分及沉积环境 ——以鄂尔多斯盆地长7₃亚段为例

徐明慧¹,王峰^{1,2},田景春^{1,2},任肇才³,孟浩⁴,余威¹,王集¹,吴静仪¹,肖云宵¹

1. 成都理工大学沉积地质研究院, 成都 610059

2. 油气藏地质及开发工程国家重点实验室(成都理工大学), 成都 610059

3. 中国石油长庆油田分公司勘探开发研究院, 西安 710000

4. 中国石油长庆油田分公司油田开发事业部, 西安 710000

摘要 【目的】鄂尔多斯盆地延长组长7₃亚段发育了大套厚层湖相富有机质泥页岩,明确富有机质泥页岩的成因机理、沉积过程及建立沉积模式对页岩油勘探具有重要意义。【方法】基于鄂尔多斯盆地延长组长7₃亚段典型露头观测、岩心描述、薄片观察、X射线衍射、主微量元素地球化学分析以及总有机碳(TOC)分析探讨富有机质泥页岩的沉积环境及分布特征。【结果】长7₃亚段主要发育6种富有机质泥页岩岩相类型:中有机质断续纹层泥岩相(Mdm)、中有机质粒序层理粉砂质泥岩相(Mgm)、富有机质模糊纹层含粉砂页岩相(Rfs)、富有机质变形—微波页岩相(Rds)、富有机质清晰纹层页岩相(Rcs)和富有机质含凝灰质似块状页岩相(Rts),有机质含量依次增加。长7₃亚段富有机质泥页岩沉积于缺氧还原的淡水环境,局部发育于微咸水环境,气候温暖湿润,整体沉积速率较低。【结论】大规模、有机质丰度高、连续性好的富有机质页岩沉积主要发育于湖盆中心和东南部,与盐度变化和碎屑输入量呈现较为明显的相关性,较多的碎屑输入会导致有机质被氧化降解和稀释,火山热液活动引起的局部微咸水化和强还原环境有利于有机质的富集和保存。

关键词 鄂尔多斯盆地;延长组;长7₃亚段;富有机质泥页岩;岩相;沉积模式

第一作者简介 徐明慧,男,1998年出生,硕士研究生,地质学,E-mail: xmh1479722585@163.com

通信作者 王峰,男,副教授,沉积学,E-mail: wangfeng07@cdut.edu.cn

中图分类号 P512.2 **文献标志码** A

DOI: 10.14027/j.issn.1000-0550.2023.076

CSTR: 32268.14/j.cjxb.62-1038.2023.076

0 引言

富有机质页岩是指总有机碳(TOC)含量较高的页岩(一般TOC>2.0%)^[1],通常作为重要的油源、页岩油气储层和常规储层的密封层^[2],对于油气资源的分布和大油气田的形成起着决定性作用,因此对富有机质页岩的研究显得尤为重要^[3-4]。我国发育包括准噶尔盆地吉木萨尔凹陷二叠系芦草沟组、江汉盆地古近系潜江组和渤海湾盆地济阳拗陷古近系沙河街组^[5-10]等多套陆相富有机质页岩层系,在这些陆相页岩层系中获得了工业油流,展现出页岩油资源勘探开发的巨大潜力和广阔前景。

不同于上述盆地碳酸盐岩发育的泥页岩层系,鄂尔多斯盆地作为陆相湖盆,长7₃亚段发育大套长英质泥页岩组合夹多期薄层状砂岩及凝灰岩,具有分布面积广、厚度大、有机质丰度高和生烃强度高的特点^[11],是目前湖相页岩油气勘探开发关注的核心层位。近年来,针对长7₃亚段页岩油层系岩相特征、有机质赋存状态、沉积构造和形成环境等方面的研究,前人已做了大量的工作,刘群等^[12]对黏土岩进行成因分类,揭示了黏土岩石学特征与沉积环境之间的对应关系。袁选俊等^[13]建立了以湖侵—水体分层为主的湖相富有机质页岩的沉积模式。蕙克来等^[14]根据富有机质页岩纹层类型及组合特征划分了富凝

收稿日期:2023-06-15;修回日期:2023-08-20;录用日期:2023-09-14;网络出版日期:2023-09-14

基金项目:国家自然科学基金项目(项目编号42372141);中石油长庆油田科研项目(2021-21061)[Foundation: National Natural Science Foundation of China, No. 42372141; CNPC Changqing Oilfield Funded Project, No. 2021-21061]

灰质纹层、富有机质纹层、粉砂级长英质纹层和黏土纹层4种纹层类型。Zhang *et al.*^[15]综合研究了长7段黑色页岩的形成环境及其对页岩油富集的控制作用。Chen *et al.*^[16]分析了火山灰对长7段同沉积黑色页岩的影响。Liao *et al.*^[17]以鄂尔多斯盆地西部天环坳陷DP1井为研究对象,揭示了长7₃亚段的古环境、古生产力和油气潜力。Bian *et al.*^[18]通过对长7₃段页岩纹层特征与矿物含量、有机质含量的相关性分析,建立了页岩纹层与有机质富集的关系。王岚等^[19]结合古地貌、气候、水文条件综合分析,认为长7₃亚段富有机质页岩形成于湖盆生产力极高、水体缺氧甚至硫化的强还原环境,并受火山活动和湖底热液的影响。由于湖相富有机质泥页岩具有极强的非均质性,古环境条件的结果往往随采样地点的不同而变化较大^[20-21]。因此,鄂尔多斯盆地长7₃段的富有机质页岩层系的岩相划分、沉积过程及演化亟待进一步探究。

本文在对霸王庄、马泉剖面等野外露头剖面的勘察研究以及城页1井、罗254井、高135井等30口富有机质泥页岩发育井岩心观察基础上,对长7₃亚段富有机质泥页岩的岩石学特征及元素地球化学指标进行分析,划分泥页岩岩相类型并对其沉积环境和展布规律展开深入剖析,建立了长7₃亚段富有机质页岩层系沉积发育模式,以期对页岩油勘探中甜点段的选取提供理论依据。

1 区域地质概况

鄂尔多斯盆地位于华北地台西部,是一个发育在太古代—早元古代结晶基底之上的大型多旋回克拉通盆地,由晋西挠褶带、西缘冲断带、渭北隆起、北部伊盟隆起以及天环坳陷和伊陕斜坡等6个构造单元组成^[22-23](图1a)。晚三叠世延长组沉积期,华北陆块与扬子陆块碰撞拼接,受秦岭造山活动的影响,在鄂尔多斯地区西南部形成了大型陆相坳陷湖盆,湖盆演化经历了形成—发展—全盛—消亡的完整旋回^[24-26](图1b)。长7期经历了晚三叠世最大的一次湖泊事件,强烈的构造活动使得盆地基底迅速沉降,发生快速湖侵,形成大范围的深水沉积,形成了一套厚度大、有机质含量高的优质烃源岩^[27],泥页岩厚度介于30~60 m,局部泥页岩累计厚度超过80 m^[24],分布面积超过 6.5×10^4 km²,页岩油资源潜力巨大,初步估算页岩油可采资源量可达 $(10 \sim 15) \times 10^8$ t^[28]。长7油层组由下到上发育3个层段,其中,长7₃亚段富有机质泥页岩

发育^[29-30],除碎屑沉积外,还广泛发育多层凝灰岩夹层、各类深部物质上拱挤入构造和产物、事件性沉积物,且主要分布在富烃坳陷深湖—半深湖区^[31]。

2 样品采集测试及方法

为开展长7₃亚段富有机质泥页岩岩相和沉积环境的研究,在全区优选重点井30口,采集样品130余块。

选取30个样品进行TOC分析,选取80个样品进行主、微量元素分析。样品预处理和地球化学实验分析均在中国科学院西北生态环境资源研究院地球化学分析测试中心完成。样品经去离子水多次超声波洗净烘干后,人工磨碎至低于80目,进行实验分析。将分离出的3 g样品在CS-344碳硫分析仪上分别进行TOC分析。

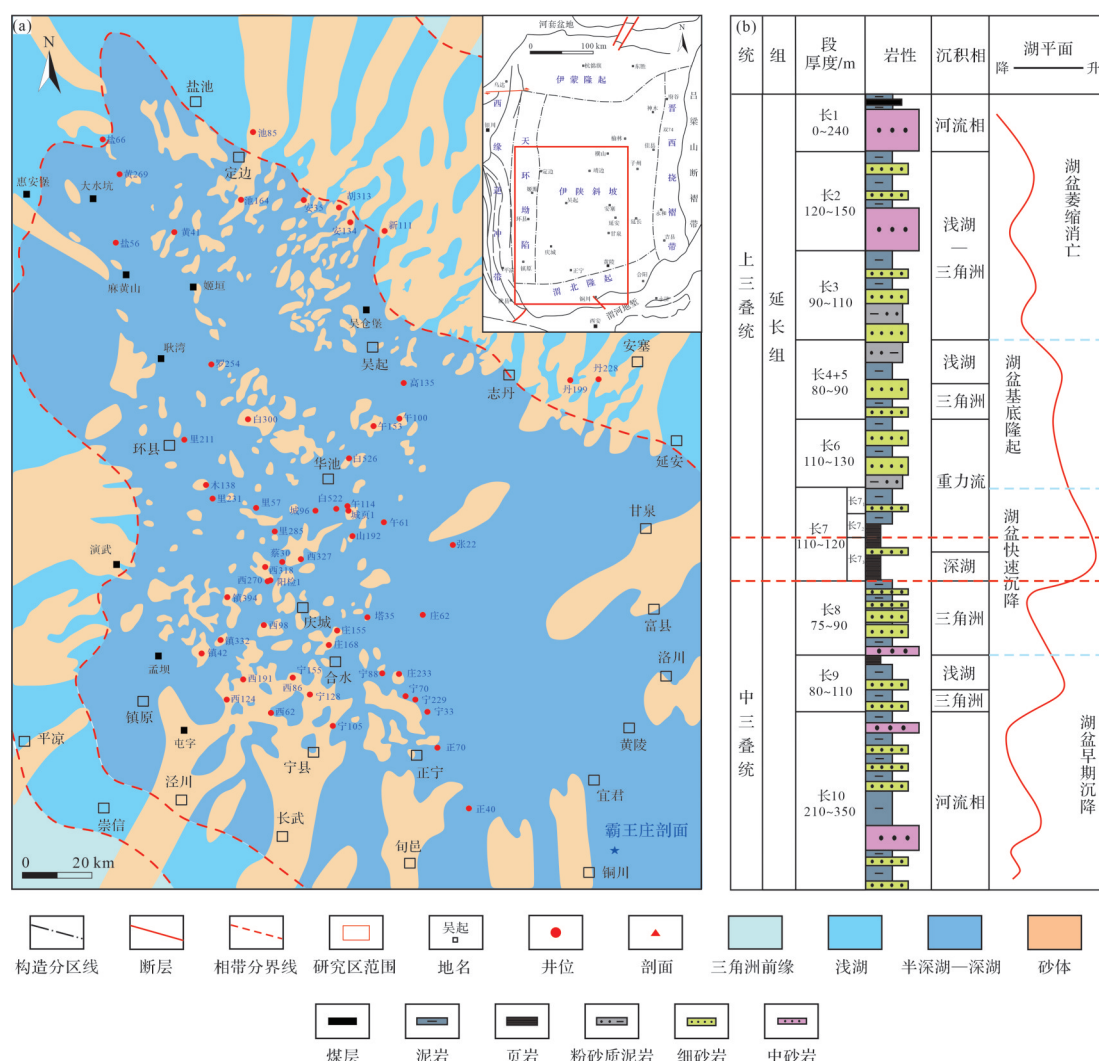
主量元素的测试分析采用熔片X射线荧光光谱法(XRF),精确称量1.0~1.5 g样品放置于陶瓷坩埚中煅烧4 h,然后取出冷却2 h,称量烧失后的样品 0.5 ± 0.05 g,置于塑料杯中,再滴加四硼酸锂($\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$)与助熔剂,放在制样机上加热15 min。将制作好的样品放入Rigaku 100e型X荧光光谱仪(XRF)中进行测试。

微量元素测试分析采用Nu Attom型激光剥蚀等离子体质谱仪(LA-ICP-MS)。样品预处理采用酸溶法,首先将200目的样品在105℃下烘干3 h;然后称取 50 ± 1 mg的岩石样品放入聚四氟乙烯溶样内胆中,滴入 HNO_3 、HF和 HClO_4 溶解样品;最后加入Rh内标溶液用去离子水稀释至100.0 g,使Rh在溶液中浓度为10 ng/mL,使用LA-ICP-MS进行分析。

选取20件样品送样至成都理工大学油气藏地质及开发工程国家重点实验室进行X射线衍射分析(XRD)。将样品破碎并研磨至200目以下,将粉碎后的样品粉末装入仪器样品模具内,采用背压法垂直均匀压紧成型,把向下的一面作为测试面,使用D8 DISCOVER型X射线衍射仪进行测试分析,扫描范围、步长分别为 $5^\circ \sim 65^\circ$ 、 0.013° 。

3 岩相特征及划分

岩相是一定沉积环境中形成的岩石或岩石组合,它不仅反映岩性、矿物成分、组构、构造等岩石学特征,还反映沉积环境特征与沉积过程^[32]。岩相影响页岩的物性变化和油气分布,因此岩相特征的研究对预

图1 鄂尔多斯盆地长7₃亚段沉积特征

(a)研究区地质概况图;(b)鄂尔多斯盆地延长组地层柱状图(据文献[24]修改)

Fig.1 Tectonic and sedimentary characteristics of the Chang 7₃ sub-member in the Ordos Basin

测富有机质泥页岩勘探潜力具有重要意义^[33]。湖相泥质岩形成受沉积环境影响大,非均质性强且岩相在空间上变化快^[34],根据页理特征,可分为没有页理的泥岩和有页理的页岩两大类^[35]。泥页岩的TOC含量是影响页岩油气勘探潜力的关键因素,与沉积环境关系密切,受水深、盐度、陆源输入等因素影响。长7₃亚段泥页岩有机质含量与页岩的矿物岩石学特征、沉积构造具有较强的相关性,即有机质含量越高,黏土矿物含量越高,纹层越发育^[19]。因此,本文在泥页岩成因分类的基础上^[36-40],根据颜色、矿物岩石学特征、沉积构造等因素,将其划分为暗色泥岩和黑色页岩两大类,再以TOC含量为关键指标划分出6种代表性的富有机质泥页岩岩相类型(表1)。

(1) 中有机质断续纹层泥岩相(Mdm)

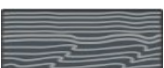
该岩相岩心呈深褐色(图2a),局部夹粉砂质条带或透镜体,偶见凝灰质薄层。断续一水平层理发育,间有波状层理及变形构造发育(图3a),纹层单层厚度通常为50~300 μm。矿物组成以石英和长石为主(图4a),平均含量分别为62.3%和8.3%;黏土矿物平均含量为21.9%,以伊蒙混层为主,占矿物总量的19.2%,其次为伊利石,占矿物总量的2.2%,绿泥石占矿物总量的0.5%;TOC相对丰富,一般介于0.60%~6.10%,平均为4.39%。镜下可见纹层中有少量云母碎片,黄铁矿、磷灰石零星发育(图5a),有机质局部富集,顺层分布。该类泥岩的形成受牵引流和湖盆底流影响。

(2) 中有机质粒序层理粉砂质泥岩相(Mgm)

该岩相岩心呈深灰—灰黑色,肉眼可见粉砂质

表1 鄂尔多斯盆地长7₃亚段富有机质泥页岩岩相类型

Table 1 Petrographic types of organic-rich mud and shales in the Chang 7₃ sub-member of the Ordos Basin

岩性	岩相类型	代码	沉积特征	纹层特征	TOC/%
暗色泥岩	中有机质断续纹层泥岩相	Mdm		波状断续或平行的纹层， 单层厚度通常为50~300 μm	(0.60~6.10)4.39/5
	中有机质粒序层理粉砂质泥岩相	Mgm		纹层内部粒度由粗到细，边界由粒度区分。 纹层单层厚度通常为300~2 000 μm	(0.89~6.15)4.24/4
黑色页岩	富有机质模糊纹层含粉砂页岩相	Rfs		准平行连续纹层，边界模糊， 单层厚度通常为2 000~3 000 μm	(4.76~10.75)7.64/4
	富有机质变形—微波页岩相	Rds		准连续不规则带状纹层。 单层厚度通常为50~3 000 μm	(7.00~10.51)8.83/3
	富有机质清晰纹层页岩相	Rcs		连续的有机质或凝灰质纹层， 单层厚度通常为20~100 μm	(7.27~13.28)10.70/3
	富有机质含凝灰质似块状页岩相	Rts		无纹层结构	(12.00~18.20)14.70/4

注：“()”内为变化范围，“/”前为平均值，“/”后为样品数。

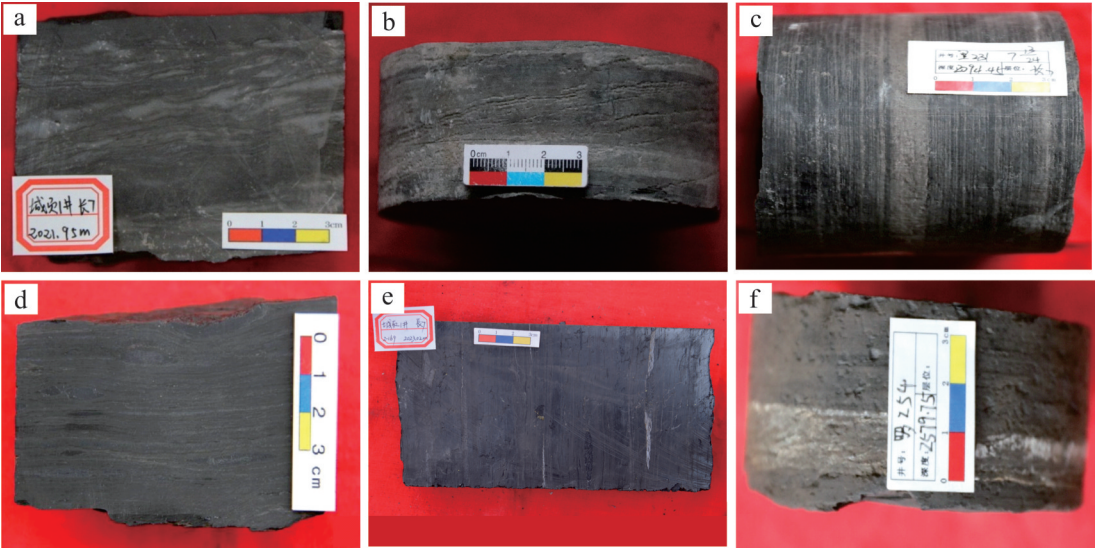


图2 研究区长7₃亚段富有机质泥页岩岩相典型岩心特征

(a)城页1井,2 021.95 m,中有机质断续纹层泥岩,发育断续水平层理;(b)蔡30井,1 964.70 m,中有机质粒序层理粉砂质泥岩;(c)里231井,2 094.00 m,富有机质模糊纹层含粉砂页岩,局部含灰黑色薄层粉砂;(d)里211井,2 360.54 m,富有机质变形—微波页岩,可见清晰连续的波状层理;(e)城页1井,2 023.02 m,富有机质清晰纹层页岩,纹层平直清晰;(f)霸王庄剖面,风化的富有机质含凝灰质似块状页岩

Fig.2 Typical core characteristics of organic-rich shale lithofacies in the Chang 7₃ sub-member

条带(图2b),常与薄层粉砂岩互层产出。镜下可见明显的粒序层理(图3b),颜色由浅变深,由粉砂向泥页岩过渡,其中浅色条带多为陆源碎屑,颗粒分布具有一定的定向性,纹层内部粒度由粗到细,边界有粒度区分。纹层单层厚度通常为300~2 000 μm。矿物组成以石英和长石为主(图4b),平均含量分别为39.1%、33.6%;黏土矿物含量为16.9%,以伊蒙混层为主,占矿物总量的12.4%,其次为伊利石和绿泥石,分别占矿物总量的1.8%、2.5%;高岭石占矿物总量的

0.2%;黄铁矿、磷灰石零星发育(5b,c),TOC平均含量为4.24%。推测该类泥岩沉积机制为浊流细颗粒物随着能量降低,不断与水融合,出现大量的“悬浮云”后快速沉降^[41-42],形成粒度较细的粒序层理。湖盆底部的低密度浊流增加了陆源有机质输入,但也在一定程度上破坏了缺氧环境,有机质保存条件受到破坏,导致其有机质含量变化范围较大。

(3) 富有机质模糊纹层含粉砂页岩相(Rfs)

该岩相岩心呈灰黑色—黑色(图2c),由浅色纹

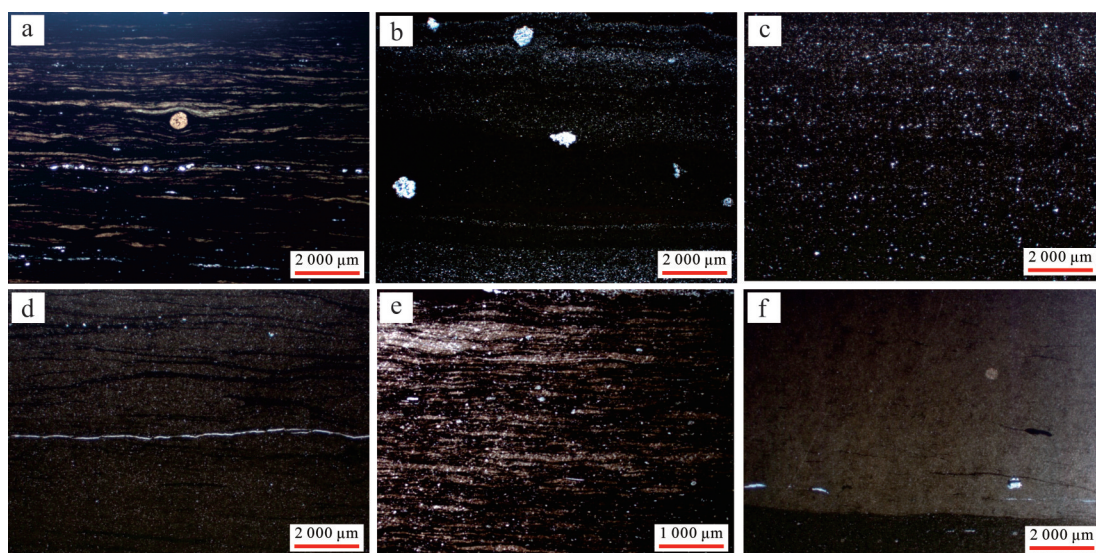


图3 研究区长 7_3 亚段富有机质泥页岩微观特征

(a)城页1井,2 018.70 m,中有机质断续纹层泥岩,纹层中可见云母碎片;(b)高135井,1 819.81 m,中有机质粒序层理粉砂质泥岩,浅色条带为陆源碎屑;(c)高135井,1 814.65 m,富有机质模糊纹层含粉砂岩,纹层界线模糊;(d)罗254井,2 573.45 m,富有机质变形—微波页岩,可见清晰连续的波状层理;(e)城页1井,2 036.20 m,富有机质清晰纹层岩,层间分布粒度较小的黄铁矿;(f)罗254井,2 568.58 m,富有机质含凝灰质似块状页岩,无明显纹层结构

Fig.3 Microcosmic characteristics of organic-rich shale from Chang 7_3 sub-member in the Ordos Basin

层和暗色纹层组成,纹层平整且连续。镜下观察浅色纹层为含石英颗粒的粉砂级长英质纹层,暗色纹层主要为含伊利石的黏土纹层。可见少量分散状分布的有机质碎片,纹层界线模糊(图3c),准平行连续纹层,边界模糊,单层厚度通常为2 000~3 000 μm 。矿物组成以石英和黏土矿物为主(图4c),含量分别为32.1%、38.7%。黏土矿物以伊蒙混层为主,占矿物总量的28.6%,其次为绿泥石和伊利石,分别占矿物总量的5.1%、4.5%;长石含量为11.9%;黄铁矿零星发育,局部聚集,平均含量为13.0%。TOC平均含量为7.64%。纹层及矿物成分特征表明该类页岩发育于水动力微弱,接近静水的环境中,推测其成因为絮凝颗粒平流运输—悬浮沉降—压实脱水形成略微倾斜的“假平行”纹层^[43-44]。

(4) 富有机质变形—微波页岩相(Rds)

该岩相岩心呈灰黑色—黑色,纹层不易分辨(图2d)。镜下可见连续的微波状—局部变形纹层,界线清晰(图3d),单层厚度通常为50~3 000 μm ,不透光的黏土矿物、有机质纹层形成明暗相间的微波状纹层组合。矿物组成以石英和黏土矿物为主(图4d),含量分别为27.2%、23.7%,长石含量为15.9%,黄铁矿含量为24.8%,TOC平均含量为8.82%。黄铁矿局部富集,极少见到完整的陆源碎屑颗粒,有机质呈细长带状或透镜体形态分布(图5d)。该类岩相纹层厚度相对较大,有机质纹层较少,微波状层理构造发

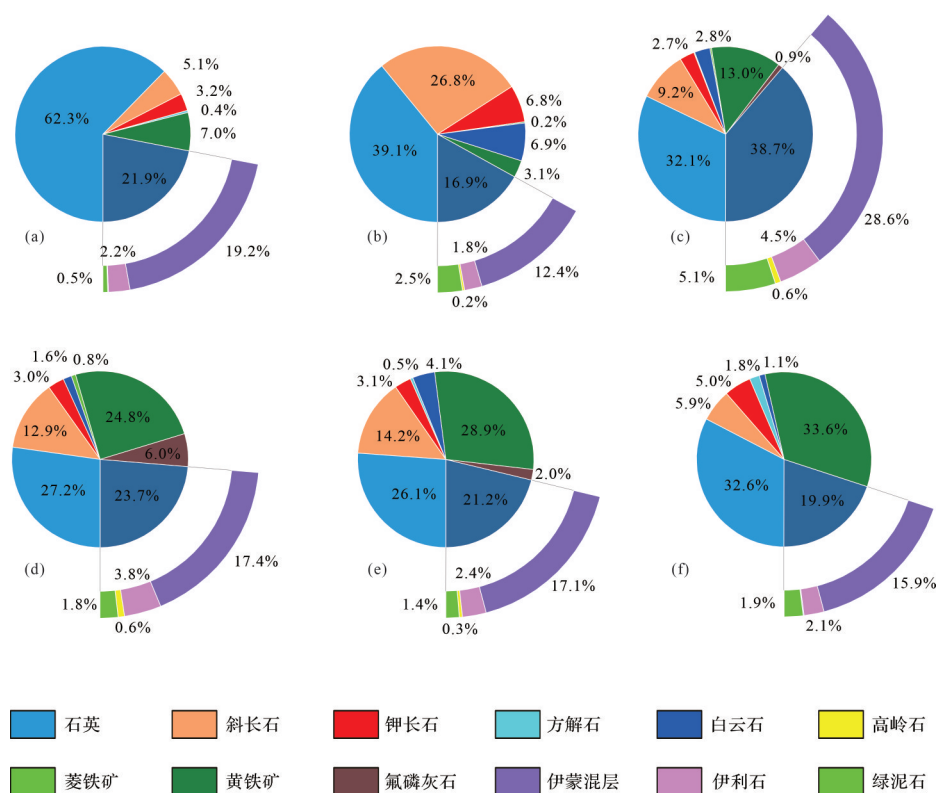
育,表明其沉积环境具有一定的水动力,不属于完全静水环境。推测湖盆底流使原先沉积在相对浅水区的泥质沉积物被侵蚀,以底覆载荷的形式搬运,进入较低流速区域时发生沉积,形成断续分布的条带状或透镜体形态^[45-46]。

(5) 富有机质清晰纹层页岩相(Rcs)

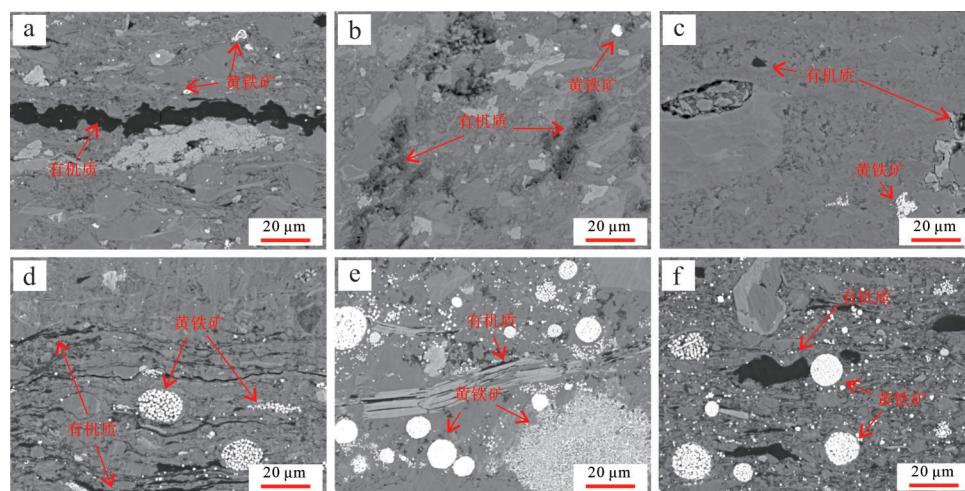
该岩相岩心呈黑色(图2e),露头风化后呈纸片状,页理极度发育,偶见鱼类化石。纹层呈水平分布,界线清晰,单层厚度通常为20~100 μm ,纹层结构保存完整。纹层主要为深褐色的黏土纹层与暗色的有机质纹层交替形成的“二元结构”(图3e),有机质纹层中可见透镜状凝灰质团块。层间发育粒度小、顺层分布相对集中的黄铁矿,形态多为莓球状集合体。该岩相石英含量为26.1%(图4e);长石含量为17.3%;黏土矿物含量为21.2%,主要为伊蒙混层、伊利石、绿泥石和少量高岭石;黄铁矿含量为28.9%;TOC介于8.00%~20.00%,平均为10.70%。该类页岩纹层发育,沉积物粒度细小,主要沉积作用为悬浮沉积,表明沉积水动力弱。黏土矿物、粉砂颗粒的来源为重力流输入湖盆中央的细粒悬浮沉积物以及少量季风携带的颗粒物质。该类页岩多发育于长 7_3 亚段中下部。

(6) 富有机质含凝灰质似块状页岩相(Rts)

该岩相岩心呈深褐—黑色,由大量火山灰、脉状有机质及扁平状黏土透镜体的黑色页岩组成,常与

图4 长₇₃亚段富有机质泥页岩岩相矿物成分

(a)中有机质断续纹层泥岩;(b)中有机质粒序层理粉砂质泥岩;(c)富有机质模糊纹层含粉砂页岩;(d)富有机质变形—微波页岩;(e)富有机质清晰纹层页岩;(f)富有机质含凝灰质似块状页岩

Fig.4 Petrographic mineralogical compositions of organic matter-rich mud shales of the Chang 7₃ sub-member图5 长₇₃亚段富有机质泥页岩黄铁矿发育特征

(a)高135井,1 814.65 m中有机质断续纹层泥岩,黄铁矿零星发育;(b)高135井,1 819.81 m,中有机质粒序层理粉砂质泥岩,黄铁矿零星发育;(c)罗254井,2 565.84 m,中有机质粒序层理粉砂质泥岩,黄铁矿零星发育;(d)罗254井,2 573.40 m,富有机质变形—微波页岩;(e)罗254井,2 560.71 m,富有机质含凝灰质似块状页岩;(f)罗254井,2 568.58 m,富有机质含凝灰质似块状页岩

Fig.5 Development characteristics of organic-rich shale pyrite in the Chang 7₃ sub-member

薄层凝灰岩互层产出,主要为似块状或透镜状结构。露头风化后呈灰褐色—黄褐色,页理发育,可见凝灰质(图3f)。该岩相凝灰质组分中长英质颗粒分选较好,磨圆较差,呈分散状或透镜状与黏土透镜体均匀

分布,同时含较多的黄铁矿、胶磷矿以及大量藻类化石。石英平均含量为32.6%(图4f),长石平均含量为10.9%,黏土矿物含量为19.9%,黄铁矿含量为33.6%。TOC含量总体较高,一般为12.00%~18.20%,平均为

14.70%。该岩相形成受到火山和热液活动影响最明显,莓球状黄铁矿大量发育,有机质碎片分散分布(图5e,f),火山和热液活动造成水体富营养化,引起藻类大量生长,造成缺氧还原的湖泊环境,火山灰落入水体中使得大量有机质—矿物集合体快速沉降形成无明显纹层结构似块状的页岩。

4 富有机质泥页岩地球化学特征

泥页岩沉积过程受水体深度、物源供给、盐度、氧化还原条件等因素的综合作用,这些因素的变化会影响泥页岩内地球化学元素含量的变化^[47]。基于主微量元素的绝对、相对含量指标来重建古沉积环境与沉积过程的方法已经取得了长足进展^[48]。因此,可以通过各类主微量元素的含量差异研究不同沉积环境的特征,为古环境恢复提供可靠依据。

选取不同岩相的典型泥页岩样品,进行了主量元素、微量元素及稀土元素分析,通过元素比值来确定不同岩相的古盐度、古氧化—还原条件、古气候条件、碎屑流入以及沉积速率,以进一步区分不同岩相沉积古环境的差异。

4.1 古盐度

古盐度是影响有机质积累的重要因素,适当的盐度更有利于有机质的积累^[49]。钡(Ba^{2+})化合物的溶解度低于锶(Sr^{2+})化合物,因此 Ba^{2+} 比 Sr^{2+} 更容易与 SO_4^{2-} 反应形成沉淀。随着湖泊盐度的增加, SO_4^{2-} 的浓度增加, Ba^{2+} 首先以 BaSO_4 的形式沉淀,而只有当湖泊的浓度达到临界值时, Sr^{2+} 才以 SrSO_4 的方式沉淀^[50-51]。因此, Sr/Ba 值可作为反映沉积环境的盐度指标,一般 Sr/Ba 比值大于1.0为海相咸水,小于0.5为陆相淡水,介于0.6~1.0为半咸水环境^[52]。

研究区样品微量元素分析结果表明(图6a), Sr/Ba 值介于0.20~0.50,平均值为0.28,Rts样品 Sr/Ba 值最高,为0.34~0.44。其他页岩样品 Sr/Ba 值介于0.20~0.35。由此推断研究区长 7_3 沉积期主要为陆相淡水环境,Rts形成于局部盐度相对较高的环境。

4.2 古气候

古气候是影响页岩发育的重要因素,温暖湿润的气候条件有利于风化剥蚀作用,降水增加使得地表径流向湖盆输入陆源碎屑及有机物,为泥页岩的形成提供物质基础的同时也有利于湖盆中形成温跃层和缺氧环境,使得有机质更好地保存^[9]。古气候对沉积物的矿物组成和化学组成也有影响,不同的元

素在特定的环境下可以保存下来。微量元素Cu、Sr及其比值 Sr/Cu 对不同气候条件非常敏感,可以用于分析特定时期的沉积环境。 Sr/Cu 小于10指示温暖湿润气候, Sr/Cu 大于10指示干燥炎热气候^[53-54]。除去1个样品 Sr/Cu 值为9,其余样品 Sr/Cu 值介于1.30~5.61,平均为3.39,显示长 7_3 亚段沉积期为温暖潮湿沉积环境(图6b)。

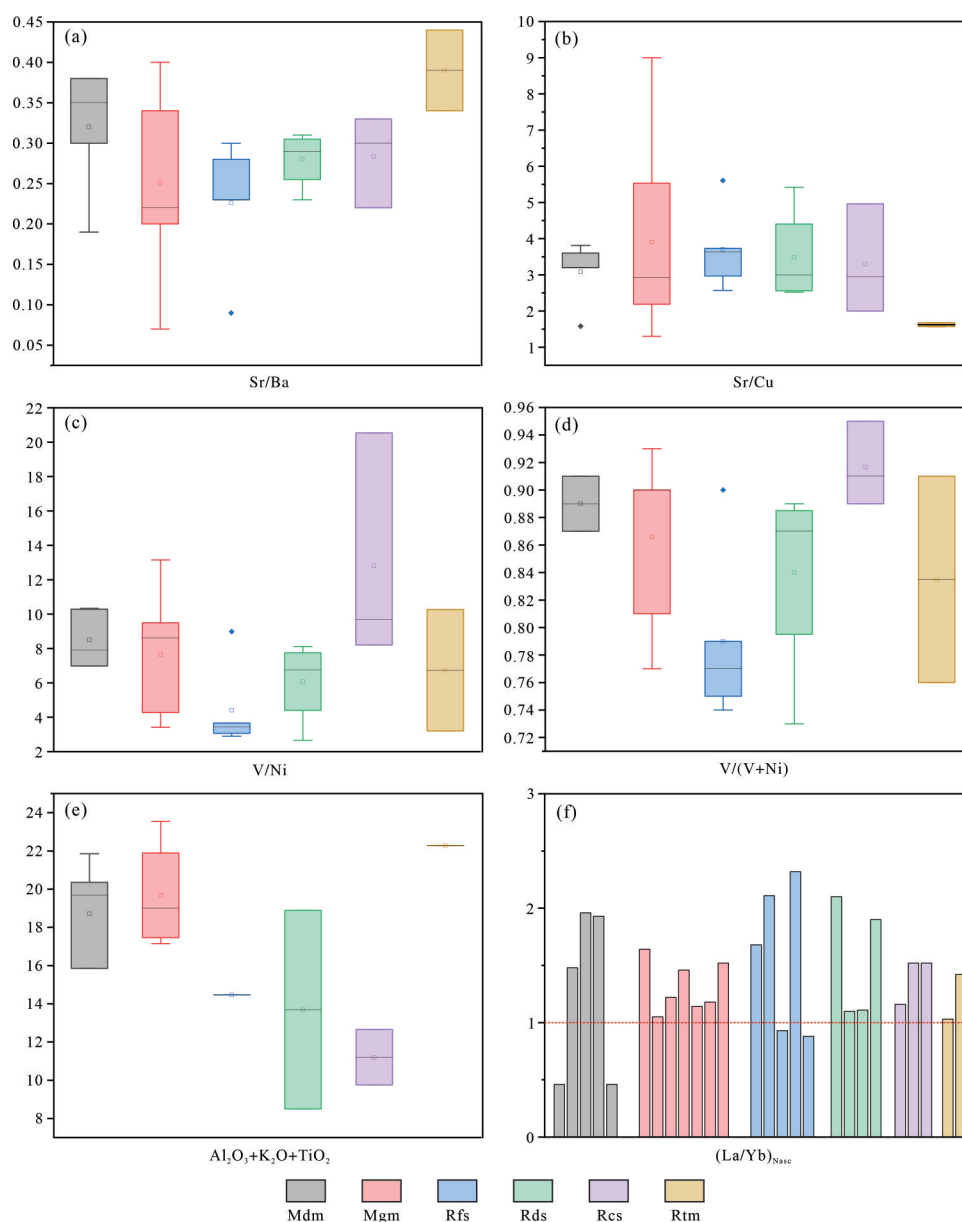
4.3 氧化还原条件

底水的氧化还原状态是有机质有效保存的重要因素。在缺氧的还原性底水条件下,底栖生物大量减少,缺少生物扰动使得有机质难以被氧化,有利于纹层的形成和有机质的保存^[55]。沉积岩中Ni、Co、U、Th、V、Cr、Cu、Zn等微量元素在不同氧化还原条件下的赋存和富集程度不同,因此微量元素的含量及其相应比值可用于分析沉积环境中氧化还原条件的变化^[56]。V在有氧条件下以钒阴离子(HVO_4^{2-} 、 H_2VO_4^-)的形式存在,在中等还原条件下以颗粒(VO_2 、 $\text{VO}(\text{OH})^{3-}$ 、 $\text{VO}(\text{OH})_2$)的形式存在,在缺氧硫化物环境中以 V_2O_3 和 $\text{V}(\text{OH})_3$ 的形式沉淀,这些元素可以作为古氧化还原条件的指标。由于V和Ni的相对比例受沉积环境的控制^[57], V/Ni 值大于3.0表示还原状态,而 V/Ni 值介于1.9~3.0、小于1.9分别表示亚缺氧和富氧条件下的沉积^[58]。除 V/Ni 外, $\text{V}/(\text{V}+\text{Ni})$ 是海洋和湖泊环境中使用的另一种类似的氧化还原替代物。 $\text{V}/(\text{V}+\text{Ni})$ 值小于0.46为氧化环境,介于0.46~0.57为水体分层弱的贫氧环境,介于0.57~0.83为水体分层不强的缺氧环境,介于0.83~1.00为反映水体分层及底层水体中出现 H_2S 的闭塞滞留环境^[48,59]。

通过对20件样品微量元素结果分析,除1个Rfs样品 V/Ni 值为2.89,其余样品 V/Ni 值均大于3(图6c,d); $\text{V}/(\text{V}+\text{Ni})$ 值为0.74~0.95,平均为0.85,Rcs样品的 $\text{V}/(\text{V}+\text{Ni})$ 值为0.89~0.95,指示了一种极端的缺氧还原环境。根据判别指标,研究区长 7_3 亚段沉积水体主要为分层的缺氧还原环境,局部存在氧化—弱还原过渡环境。

4.4 碎屑输入

陆源碎屑输入对有机质富集程度的影响是复杂的。一方面,陆源碎屑的输入导致沉积速率增大,有利于有机质保存,使得有机质富集程度高^[60]。另一方面,沉积环境中碎屑流入量的增加会使有机质遭到稀释,单位沉积物中含有的有机质质量减少^[61],有机质富集程度低。当 K_2O 和 TiO_2 含量与 Al_2O_3 呈正相关

图6 长7₃亚段不同岩相地球化学特征

(a)研究区样品Sr/Ba比值结果箱线图;(b)研究区样品Sr/Cu比值结果箱线图;(c)研究区样品V/Ni比值结果箱线图;(d)研究区样品V/(V+Ni)比值结果箱线图;(e)研究区样品Al₂O₃+K₂O+TiO₂值结果箱线图;(f)研究区样品(La/Yb)_N比值结果柱状图

Fig.6 Geochemical characteristics of different petrographic phases in the Chang 7₃ sub-member

时,表明K₂O和TiO₂丰度受黏土矿物控制,Al₂O₃+K₂O+TiO₂含量总和可作为碎屑流入的指标^[62-63]。

样品中Al₂O₃+K₂O+TiO₂值与TOC呈负相关,碎屑输入的增加使得有机质被稀释。对长7₃亚段样品进行了Al₂O₃、K₂O和TiO₂的分析(图6e),结果显示样品中K₂O+TiO₂含量与Al₂O₃含量整体呈现正相关。Mgm样品的Al₂O₃+K₂O+TiO₂值最高,平均为18.38,表明该类页岩陆源碎屑含量较高;Rcs样品的Al₂O₃+K₂O+TiO₂值最低,平均为10.35,表明该类页岩陆源碎

屑含量较少;此外,样品中Al₂O₃+K₂O+TiO₂值与TOC整体上呈负相关,表明陆源碎屑输入的增加不利于有机质的富集和保存。

4.5 沉积速率

沉积速率对有机质聚集的影响是复杂的。较快的沉降速率使得有机质快速埋藏,有利于有机质的保存,然而也可能导致有机质的稀释,不利于有机质的保存^[64-65]。稀土元素配分模式及(La/Yb)_N(下标N代表NASC标准化^[66])也可定性评价沉积速率。稀土

元素在水体中可以与细粒沉积物结合引起稀土元素的分异^[67-68]。较高的沉积速率使沉积物快速堆积,导致分异程度较弱;反之,沉积速率较低时沉积物沉积缓慢,促使黏土矿物与稀土元素接触充分,分异程度相对较强。因而,根据稀土元素的分异程度可以定性表征沉积速率。而 $(La/Yb)_N$ 值是稀土元素分异程度的可靠指标, $(La/Yb)_N$ 值为1.0左右时,反映稀土元素基本无分异或分异程度弱,沉积速率较高; $(La/Yb)_N$ 值显著大于或小于1.0时,代表稀土元素分异程度较强,沉积速率较低^[69]。

研究区20个样品 $(La/Yb)_N$ 值分布区间为0.46~2.32(图6f),6个样品 $(La/Yb)_N$ 值接近1,显示出长 7_3 沉积期沉积速率较低。Mgm样品的 $(La/Yb)_N$ 值较高(1.05~1.64),平均为1.32,两个Rts的样品 $(La/Yb)_N$ 值为1.03、1.42,表明Mgm、Rts这两类页岩的沉积速率相对其他泥页岩高。

5 岩相展布特征

根据岩相划分和岩相特征,在鄂尔多斯盆地长 7_3 亚段的野外剖面、钻井岩心、地球化学特征(表2)

分析的基础上,选取城页1井及北东—南西的剖面进行沉积发育特征对比,以解析富有机质泥页岩的垂向发育特征和平面分布特征。

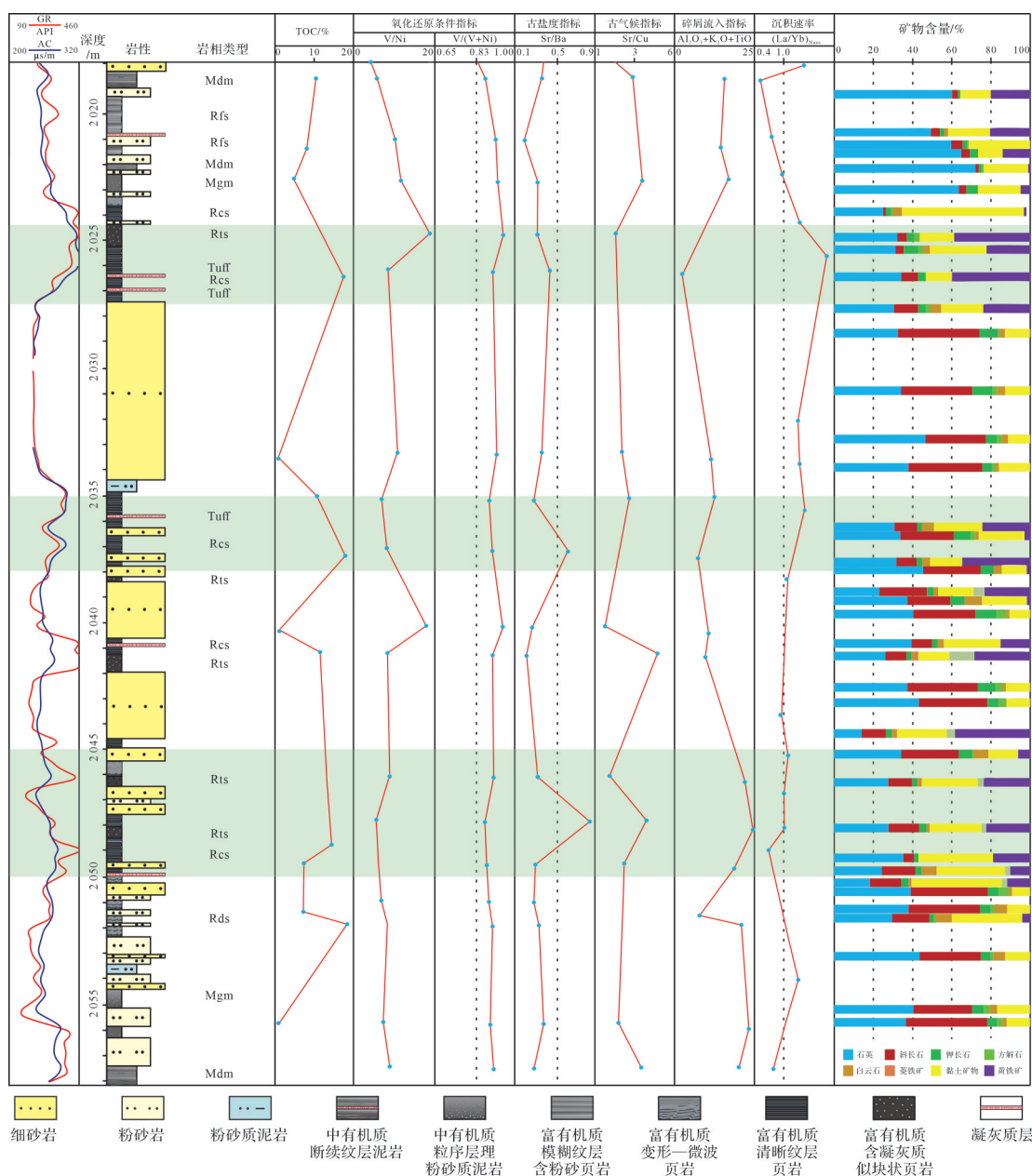
5.1 岩相展布特征

华池地区城页1井位于湖盆中心半深湖—深湖相带,长 7_3 亚段厚度为40 m,岩性垂向组合表现为深湖相暗色泥岩、黑色页岩与远端重力流粉—细砂岩的不稳定交互沉积^[24],有机质较富集层段主要发育Rcs,长 7_3 亚段上、中和下部均有分布,连续性较差(图7)。长 7_3 亚段底部主要发育Mdm、Mgm和粉—细砂岩的组合,厚度约5 m,岩石中石英、长石含量高达60.0%~70.0%,黏土矿物含量低,为12.0%~16.0%,基本不含黄铁矿,TOC较低。向上过渡为Rds与滑动—滑塌粉—细砂岩的组合,厚度约3.5 m,页岩中的石英、长石含量降低至45.0%,黏土矿物含量增加至37.0%,发育少量黄铁矿,TOC含量增加。长 7_3 亚段中下部—中上部(2 023~2 050 m)主要发育Rcs、Rts及重力流、滑动—滑塌细砂岩,局部夹薄层凝灰岩。Rcs厚度为0.5~1.0 m, Rts通常小于0.5 m,页岩中TOC含量高达10.75%~18.00%,石英、长石含量普遍

表2 鄂尔多斯盆地不同地区长 7_3 亚段地球化学特征

编号	地区	井号	V/Ni	V/(V+Ni)	Sr/Ba	Sr/Cu	Al ₂ O ₃ +K ₂ O+TiO ₂	$(La/Yb)_N$	TOC/%
1	志丹	高135	(2.70~6.06)	(0.73~0.86)	(0.22~0.29)	(1.48~9.71)	(16.13~17.96)	(0.92~2.10)	14.05
			4.57/11	0.81/11	0.26/11	6.15/11	17.05/11	1.55/11	
2	古风庄	黄269	(3.33~4.41)	(0.77~0.82)	(0.35~0.61)	(1.50~5.23)	(17.50~21.97)	—	6.73
			4.14/5	0.80/5	0.50/5	2.81/5	20.36/5	—	
3	麻黄山	盐56	(2.47~4.26)	(0.71~0.83)	(0.31~0.49)	(2.97~8.05)	(17.72~23.12)	(0.90~3.52)	6.19
			3.78/20	0.79/20	0.40/12	4.74/20	20.76/20	2.11/14	
4	环县	里211	(3.44~5.31)	(0.77~0.85)	(0.21~0.43)	(1.51~5.80)	(18.77~20.42)	—	11.05
			5.21/4	0.81/4	0.30/4	3.71/4	19.51/3	—	
		里231	(4.35~5.58)	(0.81~0.85)	(0.30~0.49)	(1.78~3.65)	(17.01~17.91)	—	
5			4.78/3	0.83/3	0.41/3	2.63/3	17.48/3	—	
6	姬垣	罗254	(2.55~6.18)	(0.72~0.86)	(0.23~0.44)	(0.90~5.43)	(17.77~20.82)	(1.42~2.13)	8.63
			4.51/16	0.81/16	0.31/16	3.20/13	19.26/3	1.69/12	
7	庆城	里57	(4.28~9.05)	(0.81~0.90)	(0.17~0.47)	(0.74~1.86)	(15.46~22.94)	—	—
			6.67/9	0.87/9	0.29/9	1.19/9	18.42/13	—	
8	吴起	午100	(1.60~9.74)	(0.54~0.79)	(0.26~0.46)	(2.38~8.45)	(16.66~25.04)	—	3.37
			2.39/7	0.69/7	0.36/7	4.62/7	19.21/11	—	
9	华池	城96	(2.88~3.56)	(0.74~0.78)	(0.24~0.30)	(3.63~7.75)	—	(1.94~2.16)	6.74
			3.26/4	0.76/4	0.28/4	5.52/3	—	2.0/4	
		城页1	(1.19~20.54)	(0.75~0.95)	(0.22~0.64)	(0.74~5.95)	(7.43~25.04)	(0.46~2.25)	
10			7.43/14	0.91/14	0.35/14	5.07/10	14.98/12	1.23/14	
11	铜川	—	(5.63~19.52)	(0.85~0.95)	(0.19~0.69)	(1.01~8.84)	(10.93~21.85)	(0.86~1.96)	—
			9.54/16	0.90/16	0.40/14	2.65/16	17.49/16	1.34/16	

注:“—”表示无数据;“()”内为比值范围,“()”后为平均值,“/”后为数据个数。编号7~8数据引自文献[70-71],11数据引自文献[72-73]。TOC/%为地区平均值,引自文献[74]。

图7 鄂尔多斯盆地城页1井长₇亚段岩相纵向分布特征Fig.7 Longitudinal distribution of petrographic phases in the Chang ₇ sub-member of well CY1 in the Ordos Basin

低于40.0%,黏土矿物含量增加至40.0%~60.0%,黄铁矿含量普遍增加,最高达39.8%。长₇亚段顶部主要发育浊流成因的粉细砂岩、Rfs以及Mgm,局部发育Rds。页岩中的石英、长石含量增加,达到26.4%~67.4%,黏土矿物含量降低至21.4%,黄铁矿、TOC含量急剧减少,最低分别为4.90%、4.88%。地球化学特征表明城页1井长₇亚段整体沉积于温暖湿润气候背景下的缺氧还原淡水环境。富有机质页岩Rcs、Rts样品(TOC含量介于14.51%~18.00%)的Sr/Ba值分布区间为0.46~0.87,少数样品处于微咸水环境区

间,说明更高的盐度对富有机质页岩的形成有促进作用。V/Ni、V/(V+Ni)指标显示水体为强还原环境,且有机质富集层段的黄铁矿含量高达22.2%~34.6%,结合城页1井长₇亚段发育的多层凝灰岩,说明富有机质页岩的形成明显受到了火山热液活动的影响。中、上部的有机质富集层段 $Al_2O_3+K_2O+TiO_2$ 值为2.44%~7.43%、 $(La/Yb)_N$ 值为1.65~2.25,显示出相对较低的碎屑输入和沉积速率,上一中部矿物组分中石英、长石含量增加,黏土矿物减少也反映了这一特征。下部有机质富集层段 $Al_2O_3+K_2O+TiO_2$ 值介于

18.90%~24.80%、 $(La/Yb)_N$ 值多接近1,显示出较高的陆源输入和沉积速率,推测受到远端重力流的影响。袁伟等^[75]通过米兰科维奇旋回计算了长 7_3 亚段沉积速率(平均为1.15 cm/ka),指出在该沉积速率下,稀释作用对TOC富集并没有控制作用。多数富有机质页岩(Rds、Rcs、Rts)发育的层段都显示较低的碎屑输入和较低的沉积速率,陆源碎屑输入会使得湖盆深处溶解氧量增加,引起氧化还原条件的变化,导致沉积有机质的稀释及氧化降解^[74],不利于有机质的富集和保存。

5.2 平面分布特征

结合钻井岩心上泥页岩的发育特征和类型,NE—SW向剖面(图8)分布范围从盆地西南缘扇三角洲延伸至东北部曲流河三角洲前缘地区,横贯盆地半深湖—深湖地区,近乎平行于物源方向。高94井属于滨浅湖范围,发育三角洲前缘沉积,镇118井—高135井沉积环境均处于半深湖—深湖范围内,主要发育滑塌型重力流沉积及半深湖—深湖沉积,蔡30井—白522井位于湖盆中心地区,长 7_3 亚段中下部发育连续厚层的Rcs,白266井黑色页岩则主要发育在长 7_3 亚段上部。盆地西南缘的镇118井—镇61井属于深湖—半深湖和滨浅湖过渡地区,水体环境相对动荡,发育重力流沉积和连续性较差的暗色泥岩(Mdm)。

东北部的高135井—午100井,位于湖盆缓坡带

向湖盆中心深湖延伸区域,发育大量滑动滑塌沉积,高135井底部发育厚层的Rfs及Rcs。结合不同地区地球化学特征及TOC含量(表2)分析,高135井区域泥页岩TOC含量较午100井区域高, $Al_2O_3+K_2O+TiO_2$ 值显示高135井和午100井都具有一定的陆源碎屑输入,这可能是由于相对靠近物源区,短暂受到三角洲前缘碎屑输入的影响。相比之下,午100井的 $Al_2O_3+K_2O+TiO_2$ 值分布区间为16.60%~25.04%,显示其陆源碎屑输入更强。V/Ni和V/V+Ni值显示高135井、午100井都属于缺氧还原的淡水环境,在部分地层中表现为弱缺氧环境,午100井局部有较高的古盐度水平,这可能与深部断裂上来的卤水有关。城96井和城页1井位于湖盆中心的华池地区,具有相似的岩相分布特征,有机质富集层段主要位于长 7_3 亚段中下部,主要发育Rcs,顶部和底部发育远端重力流粉—细砂岩。地球化学特征表明城96井为弱缺氧还原环境,盐度水平较城页1井低。湖盆西北部(天环坳陷中部)盐56井、黄269井 $Al_2O_3+K_2O+TiO_2$ 平均值大于20.00%(表2),显示受到碎屑输入的影响程度大于湖盆中心,有机质丰度相对不高,可能是受辫状河三角洲体系的影响。长 7_3 亚段泥页岩中的有机质丰度和有机质类型较其他地区差^[17]。V/Ni和V/V+Ni值显示长 7_3 期该区域水体为分层不强的缺氧环境。生物标志化合物的研究显示该区域长 7_3 亚段陆相有机质输入相对较多,呈现先增加后减少的趋势^[176],频发

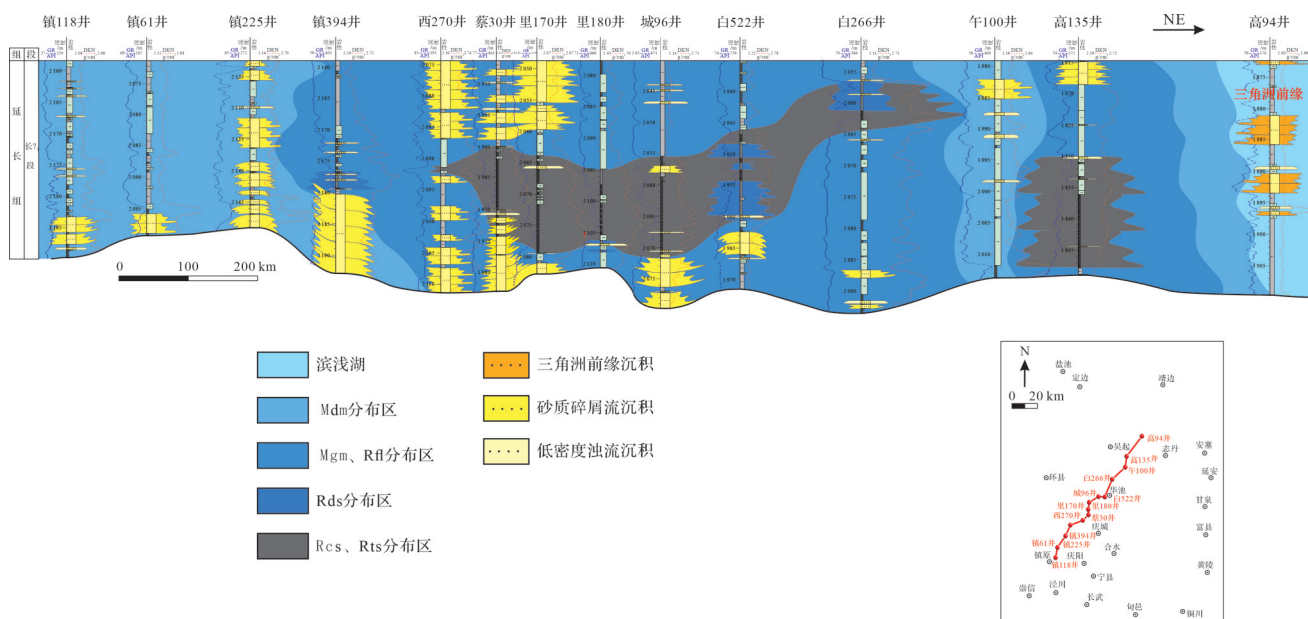


图8 鄂尔多斯盆地长 7_3 亚段北东—南西向地层对比图

Fig.8 Stratigraphic correlation of the Chang 7_3 sub-member, Ordos Basin in the NE-SW direction

的重力流向湖盆输入一定陆源有机质的同时使得沉积物中有机质被稀释和氧化。湖盆西北部水体较浅离火山源区较远, Sr/Ba 值分布区间为 0.31~0.65, 显示水体盐度变化范围较大。尤继元^[77]对黄 269 井热水沉积判别结果显示其以正常碎屑沉积为主, 受热液影响较小或无, 推测局部水体咸化可能与环境海水入侵或水体分层有关^[16]。刘翰林等^[74]认为湖盆边部较浅水位置出现的局部水体微咸化可能是由于间歇性干热环境引发水体快速浓缩沉淀导致的。湖盆中西部姬垣—环县—庆城一带位于半深湖—深湖向湖盆深部延伸的区域, $Al_2O_3+K_2O+TiO_2$ 平均值显示其陆源碎屑输入相对西北部较弱, 整体为缺氧还原的淡水环境。有机岩相学和生物标志化合物综合分析表明, 湖相水生生物与陆源高等植物是湖盆中西部有机质的主要来源^[76], 有机质丰度和有机质类型优于湖盆西北部和东北部。地球化学特征(表 2)显示南缘铜川地区长 7₃ 亚段沉积于缺氧闭塞的水体环境, 盐度极高, 碎屑输入较强, 沉积速率较快。盆地南缘靠近秦岭造山带, 火山热液和地震等构造事件频发^[78-79], 地层内部可见同沉积构造作用引起的液化变形砂及一些微型构造, 指示沉积环境和水动力状态具有一定的活动性^[31]。长 7₃ 亚段中部的“钙质结核”岩石学特征, 表明盆地南缘受到热液流体影响^[80], 且热液输入强度越大, 富有机质页岩有机质丰度越高^[76]。有机质主要源自菌藻类和水生植物的贡献, 而陆源输入的有机质相对较少^[81]。此外, 凝灰岩在南缘集中发育^[82], 页岩中丰富的凝灰岩纹层记录了高频火山活动, 表明火山活动对该地区富有机质页岩发育起着重要促进作用。

6 沉积模式

综合研究区长 7₃ 亚段富有机质泥页岩岩相类型、沉积环境特征及其空间分布特征, 建立了研究区富有机质泥页岩层系沉积模式(图 9)。

长 7₃ 沉积期, 构造活动强烈, 鄂尔多斯盆地开始受到东部古特提斯洋板块的显著影响, 盆地南部处于拉张应力环境, 快速伸展沉降导致了湖盆的高速扩张和沉陷, 使可容空间增大, 深湖环境广泛发育, 基底断裂为热液流体提供了有利通道。热液中富含 Fe^{2+} 、 Mn^{2+} 阳离子和 H_2S 气体, 导致底水缺氧, 形成强还原环境。频繁的火山喷发和地震等构造事件可能引发斜坡带沉积物的滑塌失稳, 从而导致水下重力流将大量

细粒沉积物输送到深湖, 火山活动产生大量含硫气体, 最终以酸雨的形式进入水体, 使水体的还原性增强。由于火山灰组分的不稳定性, 沉积于湖盆边缘和湖盆内的组分会发生分解, 提供的大量营养元素(N、P、Fe、Ba 等)导致浮游植物异常繁盛, 进而提高有机质初级生产力。陆源有机物通过地表径流向深湖转移的过程中, 有机物的分解会消耗大量的氧气, 进一步加剧了水体的缺氧和分层。缺氧条件下, 有机物降解的速度大大降低, 利于有机质的保存和富集。此外, 温暖湿润的古气候带来的降雨使湖平面上升, 深湖环境的沉积速率减小, 避免了沉积物中有机质的稀释。富有机质泥页岩沉积受浅湖—半深湖相沉积、重力流沉积及火山热液流体活动的影响, 多种沉积过程共同控制了页岩的发育。

7 结论

(1) 长 7₃ 亚段富有机质泥页岩可划分为 6 种岩相类型, 分别为中有机质断续纹层泥岩相(Mdm)、中有机质粒序层理粉砂质泥岩相(Mgm)、富有机质模糊纹层含粉砂页岩相(Rfs)、微波—变形页岩相(Rds)、富有机质清晰纹层页岩相(Rcs)和富有机质含凝灰质似块状页岩相(Rts)。从岩相 Mdm 到岩相 Rts, TOC、黄铁矿含量依次增加。

(2) 富有机质页岩的形成是多种因素综合作用的结果, 包括古气候、古水深、水体氧化还原性、古盐度、陆源碎屑输入、火山作用和热液活动及沉积速率等, 这些因素都会直接或者间接地影响有机质供给或有机质的埋藏和保存。鄂尔多斯盆地长 7₃ 期整体为温暖湿润气候, 缺氧还原的淡水环境, 局部发育微咸水环境。

(3) 城页 1 井长 7₃ 亚段主要发育富有机质泥页岩沉积和重力流—滑动滑塌沉积, 受到明显的火山热液活动影响, 有机质富集的层段黄铁矿大量发育, 有机质丰度与盐度、碎屑输入表现出相关性, 即高盐度、低碎屑输入更有利于有机质富集和富有机质页岩的形成。湖盆边部较浅水位置的地区水体动荡, 陆源碎屑输入较多, 受火山热液活动影响小, 偏氧化的环境不利于有机质的保存, 因此有机质丰度整体较低, 多发育 Mdm、Mgm。湖盆中心和东南部受频繁的火山热液事件影响明显, 水体盐度升高, 形成强还原的缺氧环境, 主要发育有机质丰度更高的 Rfs、Rds、Rcs 和 Rts。

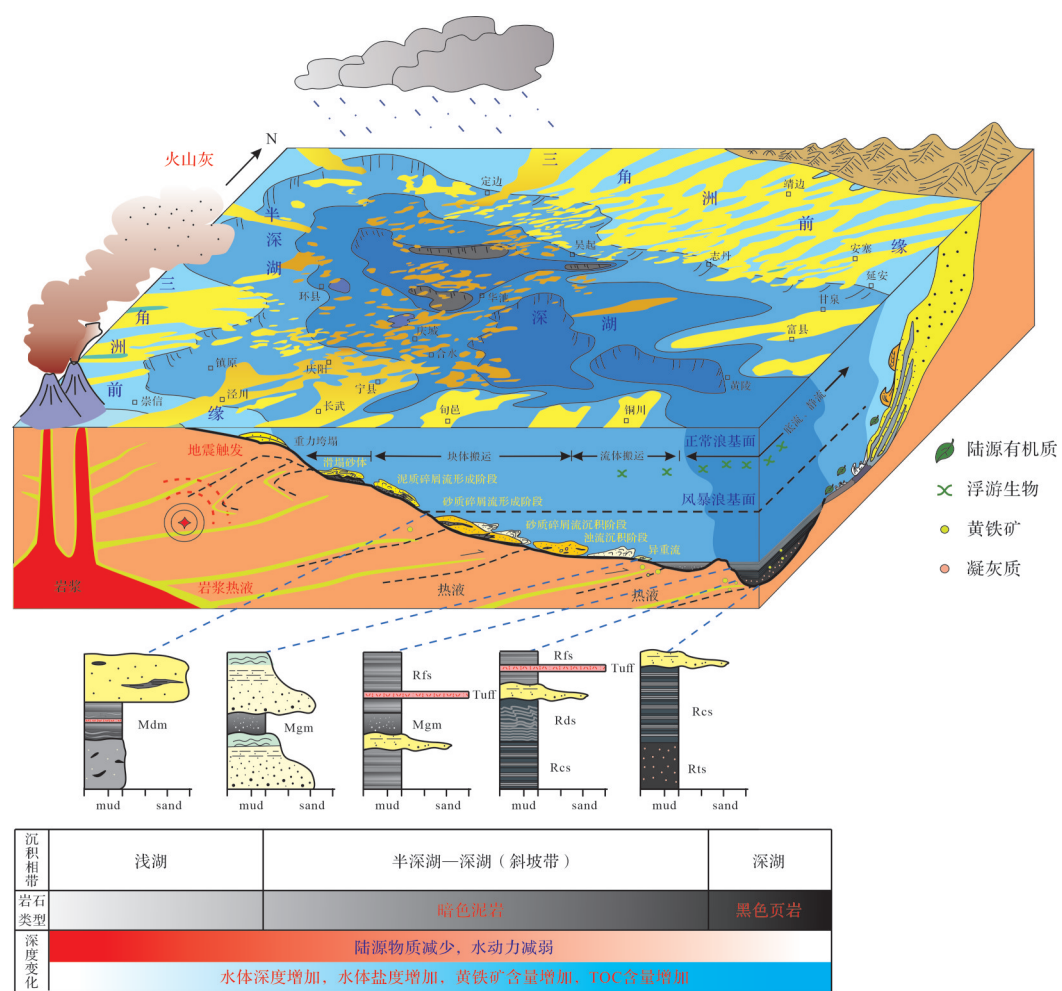


图9 长₇亚段沉积模式图
Fig.9 Sedimentary model of the Chang 7₃ sub-member

参考文献(References)

[1] Hosterman J W, Whitlow S I. Munsell color value as related to organic carbon in Devonian shale of Appalachian Basin[J]. AAPG Bulletin, 1981, 65(2): 333-335.

[2] Abouelresh M O, Slatt R M. Lithofacies and sequence stratigraphy of the Barnett Shale in east-central Fort Worth Basin, Texas [J]. AAPG Bulletin, 2012, 96(1): 1-22.

[3] 袁伟. 鄂尔多斯盆地延长组长7段富含有机质页岩形成机理[D]. 北京:中国石油大学(北京), 2018. [Yuan Wei. Formation mechanism of organic-rich shale in the 7th member of Yanchang Formation, Ordos Basin[D]. Beijing: China University of Petroleum (Beijing), 2018.]

[4] 李得路. 鄂尔多斯盆地南部三叠系延长组长7油页岩地球化学特征及古沉积环境分析[D]. 西安:长安大学, 2018. [Li Delu. The geochemical characteristics and paleo-environment reconstruction of Triassic Chang 7 oil shale in the south of Ordos Basin [D]. Xi'an: Chang'an University, 2018.]

[5] 黎茂稳, 马晓潇, 金之钧, 等. 中国海、陆相页岩层系岩相组合多样性与非常规油气勘探意义[J]. 石油与天然气地质, 2022, 43(1): 1-25. [Li Maowen, Ma Xiaoxiao, Jin Zhijun, et al. Diversity in the lithofacies assemblages of marine and lacustrine shale strata and significance for unconventional petroleum exploration in China[J]. Oil & Gas Geology, 2022, 43(1): 1-25.]

[6] 张少敏, 操应长, 朱如凯, 等. 湖相细粒混合沉积岩岩石类型划分:以准噶尔盆地吉木萨尔凹陷二叠系芦草沟组为例[J]. 地学前缘, 2018, 25(4): 198-209. [Zhang Shaomin, Cao Yingchang, Zhu Rukai, et al. Lithofacies classification of fine-grained mixed sedimentary rocks in the Permian Lucaogou Formation, Jimsar Sag, Junggar Basin[J]. Earth Science Frontiers, 2018, 25(4): 198-209.]

[7] 龙玉梅, 陈曼霏, 陈凤玲, 等. 潜江凹陷潜江组盐间页岩油储层发育特征及影响因素[J]. 油气地质与采收率, 2019, 26(1): 59-64. [Long Yumei, Chen Manfei, Chen Fengling, et al. Characteristics and influencing factors of inter-salt shale oil reservoirs in Qianjiang Formation, Qianjiang Sag[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2019, 26(1): 59-64.]

[8] 宋明水. 济阳拗陷页岩油勘探实践与现状[J]. 油气地质与采收

- 率, 2019, 26(1): 1-12. [Song Mingshui. Practice and current status of shale oil exploration in Jiyang Depression[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2019, 26(1): 1-12.]
- [9] 刘惠民, 孙善勇, 操应长, 等. 东营凹陷沙三段下亚段细粒沉积岩岩相特征及其分布模式[J]. 油气地质与采收率, 2017, 24(1): 1-10. [Liu Huimin, Sun Shanyong, Cao Yingchang, et al. Lithofacies characteristics and distribution model of fine-grained sedimentary rock in the Lower Es₃ member, Dongying Sag[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2017, 24(1): 1-10.]
- [10] 张顺, 陈世悦, 鄢继华, 等. 东营凹陷西部沙三下亚段: 沙四下亚段泥页岩岩相及储层特征[J]. 天然气地球科学, 2015, 26(2): 320-332. [Zhang Shun, Chen Shiyue, Yan Jihua, et al. Characteristics of shale lithofacies and reservoir space in the 3rd and 4th members of Shahejie Formation, the west of Dongying Sag[J]. Natural Gas Geoscience, 2015, 26(2): 320-332.]
- [11] 付锁堂, 金之钧, 付金华, 等. 鄂尔多斯盆地延长组7段从致密油到页岩油认识的转变及勘探开发意义[J]. 石油学报, 2021, 42(5): 561-569. [Fu Suotang, Jin Zhijun, Fu Jinhua, et al. Transformation of understanding from tight oil to shale oil in the member 7 of Yanchang Formation in Ordos Basin and its significance of exploration and development[J]. Acta Petrolei Sinica, 2021, 42(5): 561-569.]
- [12] 刘群, 袁选俊, 林森虎, 等. 鄂尔多斯盆地延长组湖相黏土岩分类和沉积环境探讨[J]. 沉积学报, 2014, 32(6): 1016-1025. [Liu Qun, Yuan Xuanjun, Lin Senhu, et al. The classification of lacustrine mudrock and research on its' depositional environment [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2014, 32(6): 1016-1025.]
- [13] 袁选俊, 林森虎, 刘群, 等. 湖盆细粒沉积特征与富有机质页岩分布模式: 以鄂尔多斯盆地延长组长7油层组为例[J]. 石油勘探与开发, 2015, 42(1): 34-43. [Yuan Xuanjun, Lin Senhu, Liu Qun, et al. Lacustrine fine-grained sedimentary features and organic-rich shale distribution pattern: A case study of Chang 7 member of Triassic Yanchang Formation in Ordos Basin, NW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2015, 42(1): 34-43.]
- [14] 惠克来, 李克, 操应长, 等. 鄂尔多斯盆地三叠系延长组长7₃亚段富有机质页岩纹层组合与页岩油富集模式[J]. 石油勘探与开发, 2020, 47(6): 1244-1255. [Xi Kelai, Li Ke, Cao Yingchang, et al. Laminae combination and shale oil enrichment patterns of Chang 7₃ sub-member organic-rich shales in the Triassic Yanchang Formation, Ordos Basin, NW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2020, 47(6): 1244-1255.]
- [15] Zhang B, Mao Z G, Zhang Z Y, et al. Black shale formation environment and its control on shale oil enrichment in Triassic Chang 7 member, Ordos Basin, NW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2021, 48(6): 1304-1314.
- [16] Chen X L, Zhang B, Huang H P, et al. Controls on organic matter accumulation of the Triassic Yanchang Formation lacustrine shales in the Ordos Basin, North China[J]. ACS Omega, 2021, 6(40): 26048-26064.
- [17] Liao Z W, Wu Z J, Chen Q, et al. Extremely high primary productivity and organic matter enrichment in lacustrine sediments: Late Triassic Chang 7₃ sub-member, western Ordos Basin[J]. Geofluids, 2022, 2022: 2150607.
- [18] Bian C S, Zhao W Z, Yang T, et al. The impact of lamina characteristics and types on organic matter enrichment of Chang 7₃ Sub-member in Ordos Basin, NW China[J]. Geofluids, 2022, 2022: 6558883.
- [19] 王岚, 李文厚, 刘群, 等. 鄂尔多斯盆地延长组长7黑色页岩岩相分类与沉积环境恢复[J]. 古地理学报, 2023, 25(3): 598-613. [Wang Lan, Li Wenhao, Liu Qun, et al. Lithofacies characteristics and sedimentary environment of Chang 7 black shale in the Yanchang Formation, Ordos Basin[J]. Journal of Palaeogeography, 2023, 25(3): 598-613.]
- [20] Hackley P C, Fishman N, Wu T, et al. Organic petrology and geochemistry of mudrocks from the lacustrine Lucaogou Formation, Santanghu Basin, northwest China: Application to lake basin evolution[J]. International Journal of Coal Geology, 2016, 168: 20-34.
- [21] You J Y, Liu Y Q, Song S S, et al. Characteristics and controlling factors of LORS from the Chang 7-3 section of the Triassic Yanchang Formation in the Ordos Basin[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2021, 197: 108020.
- [22] 李士祥, 牛小兵, 柳广弟, 等. 鄂尔多斯盆地延长组长7段页岩油形成富集机理[J]. 石油与天然气地质, 2020, 41(4): 719-729. [Li Shixiang, Niu Xiaobing, Liu Guangdi, et al. Formation and accumulation mechanism of shale oil in the 7th member of Yanchang Formation, Ordos Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2020, 41(4): 719-729.]
- [23] 付金华, 邓秀芹, 楚美娟, 等. 鄂尔多斯盆地延长组深水岩相发育特征及其石油地质意义[J]. 沉积学报, 2013, 31(5): 928-938. [Fu Jinhua, Deng Xiuqing, Chu Meijuan, et al. Features of deepwater lithofacies, Yanchang Formation in Ordos Basin and its petroleum significance[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2013, 31(5): 928-938.]
- [24] 张家强, 李士祥, 李宏伟, 等. 鄂尔多斯盆地延长组7油层组湖盆远端重力流沉积与深水油气勘探: 以城页水平井区长7₃小层为例[J]. 石油学报, 2021, 42(5): 570-587. [Zhang Jiaqiang, Li Shixiang, Li Hongwei, et al. Gravity flow deposits in the distal lacustrine basin of the 7th reservoir group of Yanchang Formation and deepwater oil and gas exploration in Ordos Basin: A case study of Chang 7₃ sublayer of Chengye horizontal well region[J]. Acta Petrolei Sinica, 2021, 42(5): 570-587.]
- [25] 刘显阳, 李士祥, 郭茂恒, 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.]

- [26] 刘池洋,赵红格,桂小军,等. 鄂尔多斯盆地演化—改造的时空坐标及其成藏(矿)响应[J]. 地质学报, 2006, 80(5): 617-638. [Liu Chiyang, Zhao Hongge, Gui Xiaojun, et al. Space-time coordinate of the evolution and reformation and mineralization response in Ordos Basin[J]. Acta Geologica Sinica, 2006, 80(5): 617-638.]
- [27] 杨华,牛小兵,徐黎明,等. 鄂尔多斯盆地三叠系长7段页岩油勘探潜力[J]. 石油勘探与开发, 2016, 43(4): 511-520. [Yang Hua, Niu Xiaobing, Xu Liming, et al. Exploration potential of shale oil in Chang7 member, Upper Triassic Yanchang Formation, Ordos Basin, NW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2016, 43(4): 511-520.]
- [28] 李树同,李士祥,刘江艳,等. 鄂尔多斯盆地长7段纯泥页岩型页岩油研究中的若干问题与思考[J]. 天然气地球科学, 2021, 32(12): 1785-1796. [Li Shutong, Li Shixiang, Liu Jiangyan, et al. Some problems and thoughts on the study of pure shale-type shale oil in the 7th member of Yanchang Formation in Ordos Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2021, 32(12): 1785-1796.]
- [29] 付金华,郭雯,李士祥,等. 鄂尔多斯盆地长7段多类型页岩油特征及勘探潜力[J]. 天然气地球科学, 2021, 32(12): 1749-1761. [Fu Jinhua, Guo Wen, Li Shixiang, et al. Characteristics and exploration potential of multi-type shale oil in the 7th member of Yanchang Formation, Ordos Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2021, 32(12): 1749-1761.]
- [30] 徐黎明,郭芪恒,刘元博,等. 鄂尔多斯盆地长7₃亚段深水重力流砂岩储层特征及控制因素:以华池地区CY1井为例[J]. 天然气地球科学, 2021, 32(12): 1797-1809. [Xu Liming, Guo Qiheng, Liu Yuanbo, et al. Characteristics and controlling factors of deep-water gravity flow sandstone reservoir in the Chang 7₃ sub-member in Ordos Basin: Case study of well CY1 in Huachi area[J]. Natural Gas Geoscience, 2021, 32(12): 1797-1809.]
- [31] 赵俊峰,刘池洋,张东东,等. 鄂尔多斯盆地南缘铜川地区三叠系延长组长7段剖面及其油气地质意义[J]. 油气藏评价与开发, 2022, 12(1): 233-245. [Zhao Junfeng, Liu Chiyang, Zhang Dongdong, et al. Description and its hydrocarbon geological implications of outcrop sections of Triassic Chang-7 member in southern Ordos Basin[J]. Petroleum Reservoir Evaluation and Development, 2022, 12(1): 233-245.]
- [32] 张雪. 陆相富有机质页岩的岩相特征与成因分析[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2019. [Zhang Xue. Lithofacies characteristics and genesis analysis of continental organic-rich shale [D]. Beijing: China University of Petroleum (Beijing), 2019.]
- [33] 彭丽,陆永潮,彭鹏,等. 渤海湾盆地渤南洼陷沙三下亚段泥页岩非均质性特征及演化模式:以罗69井为例[J]. 石油与天然气地质, 2017, 38(2): 219-229. [Peng Li, Lu Yongchao, Peng Peng, et al. Heterogeneity and evolution model of the Lower Shahejie member 3 mud-shale in the Bonan Subbasin, Bohai Bay Basin: An example from well Luo 69[J]. Oil & Gas Geology, 2017, 38(2): 219-229.]
- [34] Werne J P, Sageman B B, Lyons T W, et al. An integrated assessment of a “type euxinic” deposit: Evidence for multiple controls on black shale deposition in the Middle Devonian Oatka Creek Formation[J]. American Journal of Science, 2002, 302(2): 110-143.
- [35] 刘群,袁选俊,林森虎,等. 湖相泥岩、页岩的沉积环境和特征对比:以鄂尔多斯盆地延长组7段为例[J]. 石油与天然气地质, 2018, 39(3): 531-540. [Liu Qun, Yuan Xuanjun, Lin Senhu, et al. Depositional environment and characteristic comparison between lacustrine mudstone and shale: A case study from the Chang 7 member of the Yanchang Formation, Ordos Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2018, 39(3): 531-540.]
- [36] 邓宏文,钱凯. 深湖相泥岩的成因类型和组合演化[J]. 沉积学报, 1990, 8(3): 1-21. [Deng Hongwen, Qian Kai. The genetic types and association evolution of deep lacustrine facies mudstones[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 1990, 8(3): 1-21.]
- [37] 朱光有,金强,张水昌,等. 济阳坳陷东营凹陷古近系沙河街组深湖相油页岩的特征及成因[J]. 古地理学报, 2005, 7(1): 59-69. [Zhu Guangyou, Jin Qiang, Zhang Shuichang, et al. Characteristics and origin of deep lake oil shale of the Shahejie Formation of Paleogene in Dongying Sag, Jiyang Depression[J]. Journal of Palaeogeography, 2005, 7(1): 59-69.]
- [38] 王冠民. 济阳坳陷古近系页岩的纹层组合及成因分类[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2012, 42(3): 666-671, 680. [Wang Guanmin. Laminae combination and genetic classification of Eocene shale in Jiyang Depression[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2012, 42(3): 666-671, 680.]
- [39] 姜在兴,梁超,吴靖,等. 含油气细粒沉积岩研究的几个问题[J]. 石油学报, 2013, 34(6): 1031-1039. [Jiang Zaixing, Liang Chao, Wu Jing, et al. Several issues in sedimentological studies on hydrocarbon-bearing fine-grained sedimentary rocks[J]. Acta Petrolei Sinica, 2013, 34(6): 1031-1039.]
- [40] 冉治,王贵文,周正龙,等. 鄂尔多斯盆地合水地区长7致密油岩性岩相类型识别及其应用[J]. 中国地质, 2016, 43(4): 1331-1340. [Ran Ye, Wang Guiwen, Zhou Zhenglong, et al. Identification of lithology and lithofacies type and its application to Chang 7 tight oil in Heshui area, Ordos Basin[J]. Geology in China, 2016, 43(4): 1331-1340.]
- [41] Macquaker J H S, Bentley S J, Bohacs K M. Wave-enhanced sediment-gravity flows and mud dispersal across continental shelves: Reappraising sediment transport processes operating in ancient mudstone successions[J]. Geology, 2010, 38(10): 947-950.
- [42] 梁超. 含油气细粒沉积岩沉积作用与储层形成机理[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2015. [Liang Chao. The sedimentation and reservoir formation mechanism of hydrocarbon-bearing fine-grained sedimentary rocks[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2015.]
- [43] Schieber J, Southard J B, Schimmelmann A. Lenticular shale fabrics resulting from intermittent erosion of water-rich muds: Interpreting the rock record in the light of recent flume experiments

- [J]. *Journal of Sedimentary Research*, 2010, 80(1): 119-128.
- [44] 王鑫锐, 孙雨, 刘如昊, 等. 陆相湖盆细粒沉积岩特征及形成机理研究进展[J]. *沉积学报*, 2023, 41(2): 349-377. [Wang Xinrui, Sun Yu, Liu Ruhao, et al. Research progress into fine-grained sedimentary rock characteristics and formation in a continental lake basin[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2023, 41(2): 349-377.]
- [45] 卢斌, 邱振, 周川闽, 等. 泥页岩沉积物理模拟研究进展与发展趋势[J]. *沉积学报*, 2021, 39(4): 781-793. [Lu Bin, Qiu Zhen, Zhou Chuanmin, et al. Progress and prospects in the physical simulation of mudstone deposition[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2021, 39(4): 781-793.]
- [46] Wenger L M, Baker D R. Variations in vitrinite reflectance with organic facies: Examples from Pennsylvanian cyclothems of the Midcontinent, U. S. A. [J]. *Organic Geochemistry*, 1987, 11(5): 411-416.
- [47] 熊小辉, 肖加飞. 沉积环境的地球化学示踪[J]. *地球与环境*, 2011, 39(3): 405-414. [Xiong Xiaohui, Xiao Jiafei. Geochemical indicators of sedimentary environments: A summary[J]. *Earth and Environment*, 2011, 39(3): 405-414.]
- [48] 范柏江, 师良, 杨杰, 等. 鄂尔多斯盆地中部湖相有机质沉积环境特征[J]. *石油与天然气地质*, 2022, 43(3): 648-657. [Fan Bojiang, Shi Liang, Yang Jie, et al. Sedimentary environment of lacustrine organic matter in the central Ordos Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2022, 43(3): 648-657.]
- [49] Wang Q F, Jiang F J, Ji H C, et al. Effects of paleosedimentary environment on organic matter enrichment in a saline lacustrine rift basin: A case study of Paleogene source rock in the Dongpu Depression, Bohai Bay Basin[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2020, 195: 107658.
- [50] Panahi A, Young G M, Rainbird R H. Behavior of major and trace elements (including REE) during Paleoproterozoic pedogenesis and diagenetic alteration of an Archean granite near Ville Marie, Québec, Canada[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2000, 64(13): 2199-2220.
- [51] Abanda P A, Hannigan R E. Effect of diagenesis on trace element partitioning in shales[J]. *Chemical Geology*, 2006, 230(1/2): 42-59.
- [52] 王益友, 吴萍. 江浙海岸带沉积物的地球化学标志[J]. *同济大学学报*, 1983(4): 79-87. [Wang Yiyu, Wu Ping. Geochemical criteria of sediments in the coastal area of Jiangsu and Zhejiang provinces[J]. *Journal of Tongji University*, 1983(4): 79-87.]
- [53] 范玉海, 屈红军, 王辉, 等. 微量元素分析在判别沉积介质环境中的应用: 以鄂尔多斯盆地西部中晚三叠世为例[J]. *中国地质*, 2012, 39(2): 382-389. [Fan Yuhai, Qu Hongjun, Wang Hui, et al. The application of trace elements analysis to identifying sedimentary media environment: A case study of Late Triassic strata in the middle part of western Ordos Basin[J]. *Geology in China*, 2012, 39(2): 382-389.]
- [54] Yandoka B M S, Abdullah W H, Abubakar M B, et al. Geochemical characterisation of Early Cretaceous lacustrine sediments of Bima Formation, Yola Sub-Basin, northern Benue Trough, NE Nigeria: Organic matter input, preservation, paleoenvironment and palaeoclimatic conditions[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2015, 61: 82-94.
- [55] Demaison G J, Moore G T. Anoxic environments and oil source bed genesis[J]. *AAPG Bulletin*, 1980, 64(8): 1179-1209.
- [56] Jones B, Manning D A C. Comparison of geochemical indices used for the interpretation of palaeoredox conditions in ancient mudstones[J]. *Chemical Geology*, 1994, 111(1/2/3/4): 111-129.
- [57] Lewan M D. Factors controlling the proportionality of vanadium to nickel in crude oils[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1984, 48(11): 2231-2238.
- [58] Galarraga F, Reategui K, Martínez A, et al. V/Ni ratio as a parameter in palaeoenvironmental characterisation of nonmature medium-crude oils from several Latin American basins[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2008, 61(1): 9-14.
- [59] Neumeister S, Algeo T J, Bechtel A, et al. Redox conditions and depositional environment of the Lower Jurassic Bächental bituminous marls (Tyrol, Austria)[J]. *Austrian Journal of Earth Sciences*, 2016, 109(2): 142-159.
- [60] Henrichs S M, Reeburgh W S. Anaerobic mineralization of marine sediment organic matter: Rates and the role of anaerobic processes in the oceanic carbon economy[J]. *Geomicrobiology Journal*, 1987, 5(3/4): 191-237.
- [61] 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.]
- [62] Hou L H, Pang Z L, Luo X, et al. Sedimentary features of the gravity flow influenced shale deposit: A case study of Chang 7 member in the Ordos Basin, China[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2023, 153: 106277.
- [63] Choi J, Lee H S, Kim Y, et al. Multiple controls on the accumulation of organic-rich sediments in the Besa River Formation of Liard Basin, British Columbia, Canada[J]. *Geofluids*, 2021, 2021: 6672043.
- [64] Sajid Z, Ismail M S, Zakariah M N A, et al. Impact of paleosalinity, paleoredox, paleoproductivity/preservation on the organic matter enrichment in black shales from Triassic turbidites of Semanggol Basin, Peninsular Malaysia[J]. *Minerals*, 2020, 10(10): 915.
- [65] Yang Y Y, Liu Y Q, Zhou D W, et al. Lithotypes, organic matter and paleoenvironment characteristics in the Chang 7₃ submember of the Triassic Yanchang Formation, Ordos Basin, China: Implications for organic matter accumulation and favourable target lithotype[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2022, 216: 110691.
- [66] McLennan S M. Rare earth elements in sedimentary rocks: In-

- fluence of provenance and sedimentary processes[J]. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 1989, 21(1): 169-200.
- [67] Cao J, Yang R F, Yin W, et al. Mechanism of organic matter accumulation in residual bay environments: The Early Cretaceous Qiangtang Basin, Tibet[J]. *Energy & Fuels*, 2018, 32(2): 1024-1037.
- [68] Murray R W, Brink M R B T, Gerlach D C, et al. Rare earth, major, and trace elements in chert from the Franciscan Complex and Monterey Group, California: Assessing REE sources to fine-grained marine sediments[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1991, 55(7): 1875-1895.
- [69] 何文渊, 蒙启安, 付秀丽, 等. 松辽盆地古龙凹陷青山口组页岩沉积环境特征及其有机质富集机理[J]. *沉积学报*, 2024, 42(5): 1799-1816. [He Wenyuan, Meng Qi'an, Fu Xiuli, et al. Geochemical study of the sedimentary environment and its organic matter enrichment mechanism in Qingshankou Formation shale, Gulong Sag, Songliao Basin[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2024, 42(5): 1799-1816.]
- [70] 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.]
- [71] 罗文斌. 鄂尔多斯盆地长7富有机质页岩特征及分布预测[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2016. [Luo Wenbin. Characteristics and distributions of Chang 7 source rock in Ordos Basin [D]. Beijing: China University of Petroleum (Beijing), 2016.]
- [72] 杨奕曜. 湖相黑色泥岩地球化学与生烃能力研究: 以鄂尔多斯盆地南缘长7₃段为例[D]. 西安: 西北大学, 2019. [Yang Yiyao. Comparative study on geochemistry and hydrocarbon potential of lacustrine black mudstones: A case study of Chang 7₃ in the southern margin of the Ordos Basin[D]. Xi'an: Northwest University, 2019.]
- [73] Li D L, Li R X, Tan C Q, et al. Depositional conditions and modeling of Triassic oil shale in southern Ordos Basin using geochemical records[J]. *Journal of Central South University*, 2019, 26(12): 3436-3456.
- [74] 刘翰林, 邹才能, 邱振, 等. 鄂尔多斯盆地延长组7段3亚段异常高有机质沉积富集因素[J]. *石油学报*, 2022, 43(11): 1520-1541. [Liu Hanlin, Zou Caineng, Qiu Zhen, et al. Sedimentary enrichment factors of extraordinarily high organic matter in the sub-member 3 of member 7 of Yanchang Formation, Ordos Basin [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2022, 43(11): 1520-1541.]
- [75] 袁伟, 柳广弟, 罗文斌. 鄂尔多斯盆地延长组长7段沉积速率及其对烃源岩有机质丰度的影响[J]. *西安石油大学学报(自然科学版)*, 2016, 31(5): 20-26. [Yuan Wei, Liu Guangdi, Luo Wenbin. Deposition rate of the seventh member of Yangchang Formation, Ordos Basin and its impact on organic matter abundance of hydrocarbon source rock[J]. *Journal of Xi'an Shiyou University (Natural Science Edition)*, 2016, 31(5): 20-26.]
- [76] Qiao J Q, Baniasad A, Zieger L, et al. Paleo-depositional environment, origin and characteristics of organic matter of the Triassic Chang 7 member of the Yanchang Formation throughout the mid-western part of the Ordos Basin, China[J]. *International Journal of Coal Geology*, 2021, 237: 103636.
- [77] 尤继元. 鄂尔多斯盆地南缘三叠系延长组长7喷积岩特征及其与烃源岩关系研究[D]. 西安: 西北大学, 2020. [You Jiyuan. Study on the characteristics of hydrothermal-exhalative sedimentary rocks (HESR) and its relationship with source rocks from Chang 7 section of Triassic Yanchang Formation in the southern margin of Ordos Basin[D]. Xi'an: Northwest University, 2020.]
- [78] 梁庆韶, 田景春, 王峰, 等. 构造活动影响下地质事件沉积序列: 以鄂尔多斯盆地延长组长7油层组为例[J]. *地质论评*, 2023, 69(2): 481-495. [Liang Qingshao, Tian Jingchun, Wang Feng, et al. Sedimentary sequence of geological events under the influence of tectonic activities: A case from Chang 7 oil member of Yanchang Formation in Ordos Basin[J]. *Geological Review*, 2023, 69(2): 481-495.]
- [79] 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.]
- [80] 樊婷婷, 柳益群, 周鼎武, 等. 鄂尔多斯南缘长7油页岩中钙质结核成因探讨[J]. *沉积学报*, 2023, 41(3): 932-944. [Fan Tingting, Liu Yiqun, Zhou Dingwu, et al. Genesis of calcareous concretions in Chang 7 oil shale, southern Ordos Basin[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2023, 41(3): 932-944.]
- [81] 朱长凤. 湖相优质烃源岩发育的生物地球化学研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2020. [Zhu Changfeng. Biogeochemical constraints on the development of high-quality lacustrine source rocks[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2020.]
- [82] 王建强, 刘池洋, 李行, 等. 鄂尔多斯盆地南部延长组长7段凝灰岩形成时代、物质来源及其意义[J]. *沉积学报*, 2017, 35(4): 691-704. [Wang Jianqiang, Liu Chiyang, Lu Hang, et al. Geochronology, potential source and regional implications of tuff intervals in Chang-7 member of Yanchang Formation, South of Ordos Basin[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2017, 35(4): 691-704.]

Classification of Lacustrine Organic-Rich Mud Shale Petrography and the Depositional Environment: An example from the Chang 7₃ sub-member in the Ordos Basin

XU MingHui¹, WANG Feng^{1,2}, TIAN JingChun^{1,2}, REN ZhaoCai³, MENG Hao⁴, YU Wei¹, WANG Ji¹, WU JingYi¹, XIAO YunXiao¹

1. Institute of Sedimentary Geology, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China

2. State Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China

3. Exploration and Development Research Institute of Changqing Oilfield Company, PetroChina, Xi'an 710000, China

4. Oilfield Development Division of Changqing Oilfield Company, PetroChina, Xi'an 710000, China

Abstract: [Purpose] The organic-rich mudstone of lacustrine facies developed in the Chang 7₃ sub-member of the Yanchang Formation in the Ordos Basin. It is important to clarify the genesis mechanism and depositional process of organic-rich mud shale and establish the deposition model for shale oil exploration. [Methods] Based on the typical outcrop observation, core description, thin section observation, X-ray diffraction, main trace element geochemical analysis, and total organic carbon (TOC) analysis in the Chang 7₃ sub-section of the Ordos Basin, we investigated the depositional environment and distribution characteristics of the organic-rich mud shale. [Results] Six mud shale facies developed in the Chang 7₃ sub-member: middle organic matter discontinuous striated mudstone phases (Mdm), middle organic matter grain sequence stratified siltstone mudstone phase (Mgm), organic-rich fuzzy-grained chalky shale phase (Rfs), organic-rich deformed-microwave shale phase (Rds), organic-rich clear-grained shale phase (Rcs), and organic-rich tuffaceous blocky shale phase (Rts), with increasing organic matter content. The Chang 7₃ sub-member was deposited in a freshwater, anoxic reduction environment with a warm and humid climate, and the overall deposition rate is low. [Conclusions] The large scale, high abundance of organic matter and good continuity of organic-rich shale deposit developed in the center and southeast of the lake basin and are significantly correlated with salinity and detritus input. More detritus input leads to the oxidative degradation and dilution of organic matter. The local brackish hydration and strong reduction environment caused by volcanic hydrothermal activities is conducive to the enrichment and preservation of organic matter.

Key words: Ordos Basin; Yanchang Formation; Chang 7₃ sub-member; organic-rich mud shale; lithofacies types; sedimentary mode