

文章编号:1000-0550(2025)06-2151-17

湖相富有机质泥岩纹层组合类型及其储集意义 ——以济阳坳陷沙河街组泥岩为例

董济凯^{1,2},董春梅^{1,2},林承焰^{1,2},赵子茹^{1,2},郑心如¹,刘连启³,聂聪³,刘斌³

1.中国石油大学(华东)地球科学与技术学院,山东青岛 266580

2.深层油气全国重点实验室(中国石油大学(华东)),山东青岛 266580

3.中国石化胜利油田分公司采油厂,山东东营 257200

摘要【目的】中国陆相页岩油资源十分丰富,勘探潜力巨大。目前济阳坳陷沙一段页岩油的勘探开发已取得实质性突破,但不同岩相泥岩间的储集性差异还存在一些问题尚待解决。【方法】选取济阳坳陷沙河街组泥岩为研究对象,采用X射线衍射、岩石热解、荧光分析、扫描电镜、低温气体吸附等研究手段,详细探讨了渤海洼陷沙一段纹层状泥岩纹层类型、纹层组合及纹层组合的孔隙类型和孔隙结构特征。【结果】沙一段泥岩矿物类型多样,根据成分不同,将研究区泥岩中纹层划分为长英质纹层、黏土矿物纹层、文石纹层、泥晶方解石纹层和富有机质纹层五种类型,根据其垂向叠置关系划分为“富有机质+泥晶方解石质”“富有机质+文石质”“富有机质+长英质”三种二元纹层组合。其中,“富有机质+文石质”和“富有机质+长英质”二元组合泥岩的孔隙度相对较高,且孔隙结构与连通性优于“富有机质+泥晶方解石质”二元组合泥岩。在“富有机质+文石质”二元纹层组合泥岩中,页岩油以游离态赋存于层间缝中,可动性最好;“富有机质+文石质”二元纹层组合泥岩中游离油与吸附油共存,可动性相对较差;而在“富有机质+长英质”二元纹层组合泥岩中页岩油主要以吸附态形式存在,可动性最差。【结论】不同泥岩的孔隙度、孔隙结构及油气富集机理受到纹层组合形式的决定性控制作用,其油气赋存模式可以为未一低成熟度页岩油开采起到指导作用。

关键词泥岩;纹层类型及组合;储集特征;赋存模式;渤海湾盆地

第一作者简介 董济凯,男,2000年出生,硕士研究生,储层地质学,E-mail: 1225119180@qq.com

通信作者 董春梅,女,教授,E-mail: dongchunmei1@126.com

中图分类号 P618.13 **文献标志码** A

DOI: 10.14027/j.issn.1000-0550.2023.131

CSTR: 32268.14/j.cjxb.62-1038.2023.131

0 引言

近年来,页岩油的勘探与开发受到国内外油气领域的广泛关注,随着美国页岩油革命的成功,页岩油已然成为当今能源领域中值得关注的热门非常规油气领域之一^[1]。目前,北美海相盆地是世界上页岩油的主要高产地区,尤其是美国的巴肯组、鹰滩组、巴尼特组^[2-4]。在这种情况下,中国陆相页岩油资源同样极为丰富,随着从源外走向源内的勘探理念转变和技术进步,推动陆相页岩油的勘探与开发也成为了中国石油勘探的热点领域^[5-8]。近年来在准噶尔、鄂尔多斯、松辽、渤海湾、四川、三塘湖、柴达木等

盆地取得页岩油重要进展,建立了新疆吉木萨尔、大庆古龙等国家级陆相页岩油示范区,展现出良好发展前景^[9-16]。

泥岩从沉积构造的角度可以将纹层间距大于50 cm的划分为块状泥岩,10~50 cm为层状泥岩,1~10 cm为薄层状泥岩,1 mm~1 cm为页状泥岩,小于1 mm为纹层状泥岩^[17]。前人研究表明,纹层状泥岩相较于块状、层状等泥岩相可动油比例更高,层间缝更发育,因而更有利于页岩油赋存^[18-19],是目前技术条件下寻找页岩油的最有利岩相。因此,针对泥岩纹层中纹层组合类型及其油气赋存模式的研究对于

收稿日期:2023-10-07;修回日期:2023-12-05;录用日期:2024-01-10;网络出版日期:2024-01-10

基金项目:国家自然科学基金项目(42372156);山东省重点研发计划(竞争性创新平台)(2022CXPT048)[Foundation: National Natural Science Foundation of China, No. 42372156; Shandong Provincial Key Research and Development Program (Competitive Innovation Platform), No. 2022CXPT048]

寻找页岩油甜点具有重要意义。目前针对纹层与储层的关系国内学者已开展了较多研究,施振生等^[20-21]对四川盆地志留统龙马溪组一段典型井含气泥岩不同纹层及组合储集层特征差异性及其成因展开了研究。蕙克莱等^[22]将鄂尔多斯盆地三叠系延长组泥岩划分为4种纹层类型,并基于不同纹层组合建立了页岩油富集模式。陈扬等^[23]针对渤海湾盆地东营凹陷沙四上亚段泥岩划分出4种纹层单元以及7种纹层组合类型,并确定了不同纹层组合的泥岩的储集物性影响因素。然而,目前的研究仍存在3个方面的问题:(1)纹层的矿物成分如何对储层物性产生影响,不同碳酸盐矿物纹层的储集性是否存在差异;(2)不同纹层组合的储集性差异是否能够用孔隙结构特征来表征;(3)不同纹层组合的页岩油赋存模式存在哪些区别。为解决上述问题,需要开展湖相富有机质泥岩纹层组合特征精细研究,明确不同纹层及其组合的岩石组分与储集空间等特征,建立该类泥岩中的页岩油赋存模式,这不仅对研究区内的页岩油勘探开发具有重要指导意义,而且对陆相页岩油理论发展同样具有一定的补充作用。因此,本文在总结前人研究的基础上,借助荧光显微镜、扫描电镜、能谱分析、X射线衍射(XRD)以及气体吸附实验等手段对渤海南洼陷沙一段纹层状泥岩的纹层类型、纹层组合、孔隙类型和孔隙结构进行研究,探讨不同纹层组合储集性差异,并确定不同纹层组合对泥岩孔隙度、孔隙结构和油气赋存的控制作用,最终建立不同纹层组合泥岩的页岩油赋存模式,以期为未来的页岩油气开采提供科学依据。

1 地质背景

研究工区渤海南洼陷位于渤海湾盆地济阳坳陷沾化凹陷的中部,是济阳坳陷的一个三级负向构造单元,整体呈现出北陡南缓,东陡西缓的“箕状断陷”构造格局(图1a)。其北部与埕子口凸起相邻,以埕东断层为界,西以北东向的义东断层为界与义和庄凸起相邻,南部斜坡带即陈家庄凸起的北部斜坡,东北边界为北西向的孤西断层。孤西断层向北西延伸,止于东西向的埕南断层,埕南断层的西端与义东断层相接,连接构成锯齿形的断陷边界(图1b)。由于渤海南洼陷处于埕南断层和义东断层上盘半地堑断陷的斜坡部位,因而其东、西两侧的基岩面及古近系总体向北西方向倾斜,而中部则向北倾斜^[24-26]。

渤海南洼陷沉积地层发育,分布于以中生界为主的基底之上,沉积盖层主要为第三系,自下而上发育孔店组、沙河街组、东营组、馆陶组和明化镇组^[27]。烃源岩主要位于沙四上亚段、沙三下亚段和沙一段。沙一段泥岩形成于物源供给不充分的咸水一半咸水的沉积环境,其上部以粉砂质泥岩、富方解石、富文石泥岩为主,多种岩相有规律叠覆,中部发育有一定厚度的块状泥岩,下部则以富方解石、富文石泥岩为主,沙一段下部发育多套白云岩夹层,每层白云岩夹层厚度在10 m以内(图1c)。沙一段泥岩整体厚度主要介于50~450 m,现今最大埋深约3 200 m,一般处于2 200~2 800 m,古生产力总体较强,为中一高生产力,物源稳定。埋藏史与热演化史研究表明沙一段现今主要处于低成熟阶段,洼陷带局部地区进入成熟演化阶段^[28-29],是一套富有机质的优质烃源岩。

2 实验样品与方法

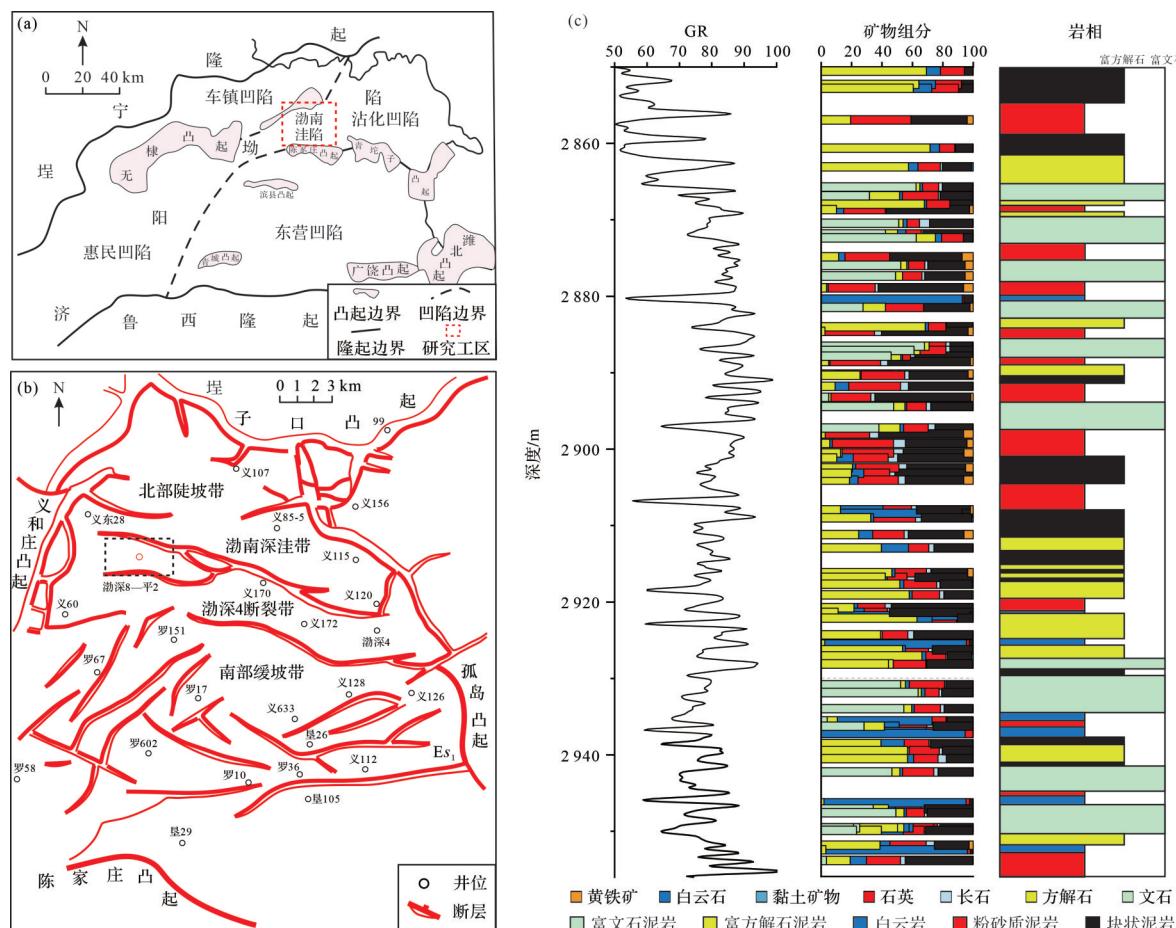
样品来源于渤海湾盆地渤海南洼陷渤海8—平2井沙一段泥岩,对其由顶到底不同层位的62块样品进行岩石薄片鉴定、X射线衍射(XRD)分析、孔隙度测试,确定矿物成分和元素含量,并对其中31块泥岩进行岩石热解实验,确定其有机地化参数。在此基础上,按照其沉积构造、矿物组分与有机质丰度选择9块具有代表性的样品进行荧光显微镜观察、扫描电镜观察、能谱分析以及低温气体吸附实验,开展泥岩纹层特征与储层特征研究,最终确定沙一段泥岩纹层组合特征及其对储层的控制作用。其中薄片观察、XRD、孔隙度测试和岩石热解为常规试验分析。

2.1 场发射环境扫描电镜及能谱分析

利用Quattro S型场发射扫描电镜(FE-SEM)在高真空模式下对9块样品的薄片进行观察,加速电压为30 kV,放大倍数最高可达250万倍,最小可识别100 nm级孔隙。随后,使用Ultim Max 40型能谱探测器在SEM高真空模式下对样品进行元素面扫处理。在元素谱图采集过程中,可以在软件中实时动态显示MinQuant的定量分析结果,以含量、原子或氧化物百分比的形式呈现,利用该功能可以实现对样品观测区域矿物的定性分析与元素的定量分析。

2.2 低温气体吸附实验

低温N₂吸附和CO₂吸附实验的数据可以用来定量表征样品的微孔孔隙结构,低温N₂吸附实验主要用于介孔孔隙结构定量表征,低温CO₂吸附实验主要



(a)渤海湾盆地构造图及渤南洼陷位置(框);(b)渤南洼陷构造图及取心井位置(框);(c)研究区岩相柱状图
Fig.1 Location of study area and stratigraphic column

(a) structural map of Bohai Bay Basin and location of Bonan Sag (box); (b) structural diagram of Bonan Sag and location of core well (box); (c) stratigraphic column of study area

用于微孔隙结构定量表征。实验采用全自动气体吸附仪 ASAP 2460, 按照 GB/T19587—2017 和 GB/T21650.2—2011 的检测标准分别进行 90 °C 加热 1 h、110 °C 加热 10 h 的 N₂ 和 CO₂ 气体吸附实验, 在恒温下提高气体的分压, 测定气体吸附量, 由吸附量对分压作图, 从而得到对应的吸附等温曲线^[30]。低温 N₂ 吸附实验采用 BET 孔隙结构理论模型解释与求取介孔的比表面积, 以及 BJH 孔隙结构理论模型解释并求取介孔的孔隙直径、累计比表面和总孔体积。低温 CO₂ 吸附实验则采用 DFT 孔隙结构理论模型解释与求取微孔的累积比表面和总孔体积。

3 纹层发育特征与储集特征

3.1 泥岩矿物组分与有机地化特征

基于渤深 8—平 2 井的系统取样, 开展 XRD 测试和岩石热解实验。沙一段泥岩的主要矿物组成包括碳酸盐矿物、黏土矿物和石英, 还含少量长石、菱铁矿和黄铁矿(表 1)。其中, 碳酸盐矿物占比最高, 文石、方解石、白云石在目的时段均有发育。泥岩非均质性强, 岩相变化快, 富文石质泥岩、富方解石质泥岩在沙一段交替发育。富文石质泥岩主要发育在沙一段上、下部, 富方解石质泥岩主要发育在沙一段中

表 1 渤南洼陷沙一段全岩矿物组成表

Table 1 Whole-rock mineral composition of Es¹ member, Bonan Sag

文石	石英	钾长石	斜长石	菱铁矿	铁白云石	白云石	方解石	黄铁矿	黏土总量
0~31.9	1.9~39.3	0~6.9	0~22.6	0~22.2	0~94.5	0~94.9	0~71.3	0~7.2	0~73.0
4.6	20.9	1.2	1.6	2.2	12.0	5.0	20.3	1.5	30.8

部(图1c)。富文石质泥岩中碳酸盐矿物以文石为主,含量可达31.9%,含少量方解石与白云石(含量不超过10%)。富方解石质泥岩中碳酸盐矿物以方解石为主,含量可达71.3%,不含文石,含少量白云石(含量不超过15%)。白云石主要以白云岩夹层的形式出现与富方解石质泥岩互层。黏土矿物在沙一段泥岩中占比较大,平均含量约为30.8%。伊/蒙混层和伊利石是主要的黏土矿物类型(表2),前者为27.8%~52.7%,平均为45%;后者为24.7%~51.9%,平均为36.7%。沙一段的古沉积环境盐度较高且钾长石较少,伊利石形成所需的K⁺可以从古水体中获得,而无需钾长石等矿物的溶解,从而缺少高岭石的形成环境,导致研究区高岭石含量较低;同时由于受到机械压实和成岩作用的影响,蒙脱石脱出层间水,大量向伊利石转化,释放硅质沉淀,形成微晶石英^[31-33]。同时,沙一段存在超压现象,地层异常高压抑制了伊/蒙混层的转化^[34]。陆源碎屑主要为石英和长石,石英

表2 渤南洼陷沙一段黏土矿物组成表
Table 2 Clay mineral composition of Es¹ member of Bonan Sag

伊/蒙混层	伊利石	绿泥石
27.8~52.7	24.7~51.9	9.1~31.1
45.0	36.7	18.2

为研究区最常见的陆源碎屑矿物,含量介于1.9%~39.3%,平均为20.9%。

热解实验结果表明渤海洼陷沙一段有机质丰度高,36块岩石样品测试显示TOC介于0.35%~7.6%,平均值为3.56%。有机质类型较好,以I型和II₁型为主。同时有机质的成熟度低,镜质体反射率介于0.34%~0.50%。 T_{max} 主要分布在430℃~445℃,热解产物的残余烃含量S₁主要分布在1~4 mg/g,S₁+S₂主要分布在10~50 mg/g。总体而言,沙一段泥岩具有较强的生烃能力,不同深度的泥岩有机地球化学指标差异较大。

3.2 泥岩纹层单元特征

通过岩心观察、薄片鉴定、场发射扫描电镜观察,根据纹层组分差异,纹层状泥岩可识别出长英质纹层、黏土矿物纹层、文石纹层、泥晶方解石纹层、富有机质纹层5种纹层基本单元。

1) 长英质纹层

该纹层成分复杂,赋存形式多样,矿物垂向分布无明显规律性,厚度一般可达几微米到几百微米。主要成分为陆源碎屑矿物,如石英、长石等(图2a~c),呈不规则粒状,长轴具有定向性;自生矿物多为泥级球粒状石英、方解石,被黏土矿物包裹,同时见少量分散有机质(图2b,d)。

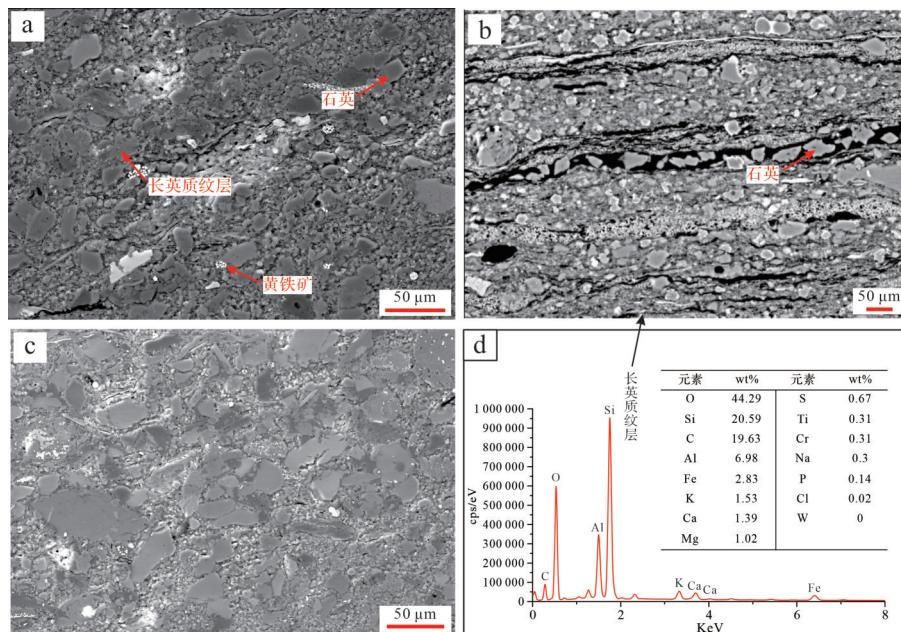


图2 长英质纹层镜下照片
(a~c)长英质纹层电镜照片;(d)长英质纹层能谱曲线及主要元素含量

Fig.2 Feldspar-quartz lamina

(a-c) SEM micrographs; (d) energy spectrum and main element content

2) 黏土矿物纹层

黏土矿物纹层厚度受沉积环境影响差异性大,一般为几微米到几百微米(图3a)。可见大量层状有机质顺层分布;层内陆源碎屑组分含量明显低于长英质纹层,自生泥级矿物含量相对高。该纹层主要成分为黏土矿物,呈水平层状分布,有机质呈条带状,部分有机质旁存在层理缝和生排烃缝(图3b),能谱分析显示(图3c,d),黏土矿物纹层的矿物成分主要为伊利石和伊蒙混层,呈丝缕状,其次还发育少量石英、黄铁矿、钾长石、钠长石、方解石等矿物,常见黄铁矿与有机质共生,平行于层理发育。

3) 文石纹层

文石纹层边界清晰,横向连续、厚度无明显变化,为几微米到几十微米(图4a,b),多呈连续水平状、透镜状分布。主要由泥晶文石,少量泥晶方解石、泥晶石英、黄铁矿等矿物构成(图4c,d),粒径小于6 μm。纹层整体疏松多孔,多为晶间孔和溶蚀孔。文石纹层水平连续的特征反映了相对静水的沉积环境。

4) 泥晶方解石纹层

泥晶方解石纹层主要由泥晶方解石,少量泥晶石英、泥晶长石、黄铁矿等矿物构成(图5c,d),纹层厚度平均厚度为几十微米(图5a)。方解石以泥晶为主、部分颗粒为微晶,主要有3种赋存方式,分别是断

续泥晶方解石纹层、泥晶方解石集合体、连续泥晶方解石纹层,石英粒径小于4 μm,多分布在粒间(图5b),泥晶方解石纹层中晶间孔极为发育。

5) 富有机质纹层

该纹层荧光下呈亮黄色—黄绿色荧光的特点,与其他类型纹层相比,厚度小,大量层状有机质顺层分布(图6a),部分有机质旁存在层理缝和生排烃缝(图6b)。孤立的泥晶自生石英在该类纹层中大量分布,泥晶方解石在富有机质纹层中的含量较长英质纹层更高(图6c,d)。

3.3 纹层组合特征

1) 富有机质纹层+泥晶方解石纹层

该纹层组合分布较广泛,TOC含量多介于3%~6%,平均TOC含量为5.1%,岩心多呈灰黄—深灰色(图7a),具有明暗相间的纹层结构,纹层多水平定向发育,以富有机质纹层和泥晶方解石纹层互层为主,可见顺层微裂缝(图7a')。陆源碎屑为石英和长石等粉砂,方解石含量高,多为泥晶方解石,同时该泥岩广泛发育球粒状黄铁矿以及生物碎屑。该泥岩主要分布在沙一段的中下部(图1c),沉积时期气候较为炎热,水体深度增加,处于贫氧—缺氧的还原环境,此时长英质矿物含量和黏土矿物含量降低,碳酸盐矿物含量增高,TOC含量升高,形成“富有机质+泥晶方解石质”二元纹层组合泥岩。

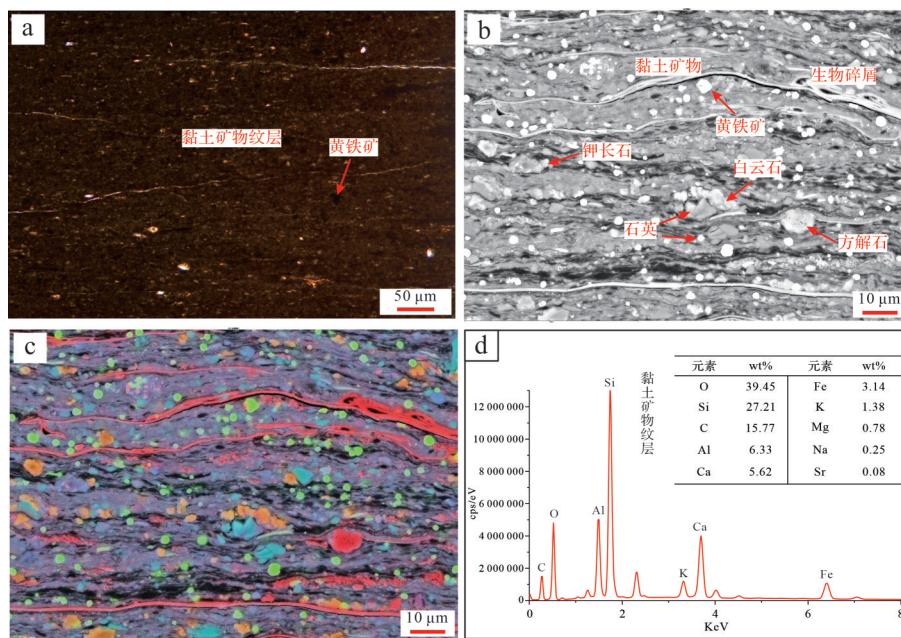


图3 黏土矿物纹层镜下照片

(a)黏土矿物纹层单偏光下镜下照片;(b)黏土矿物纹层电镜照片;(c)黏土矿物纹层能谱照片;(d)黏土矿物纹层能谱曲线及主要元素含量

Fig.3 Clay mineral lamina

(a) single polarizing light micrograph; (b) SEM micrograph; (c) energy spectrum micrograph; (d) energy spectrum and main element content

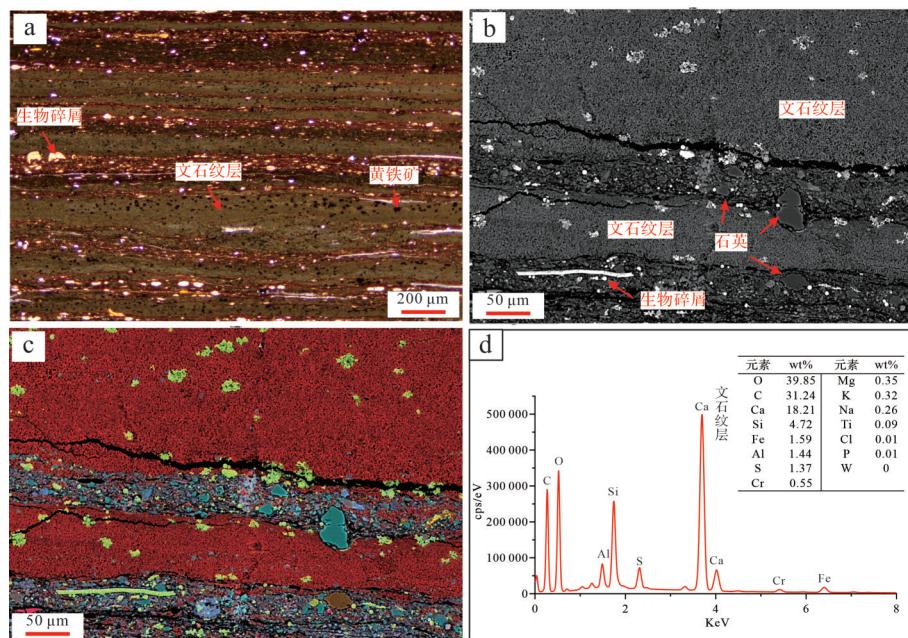


图4 文石纹层微观照片

(a)文石纹层单偏光下镜下照片;(b)文石纹层电镜照片;(c)文石纹层能谱照片;(d)文石纹层能谱曲线及主要元素含量

Fig.4 Photomicrograph of aragonite lamina

(a) single polarizing light micrograph; (b) SEM micrograph; (c) energy spectrum micrograph; (d) energy spectrum and main element content

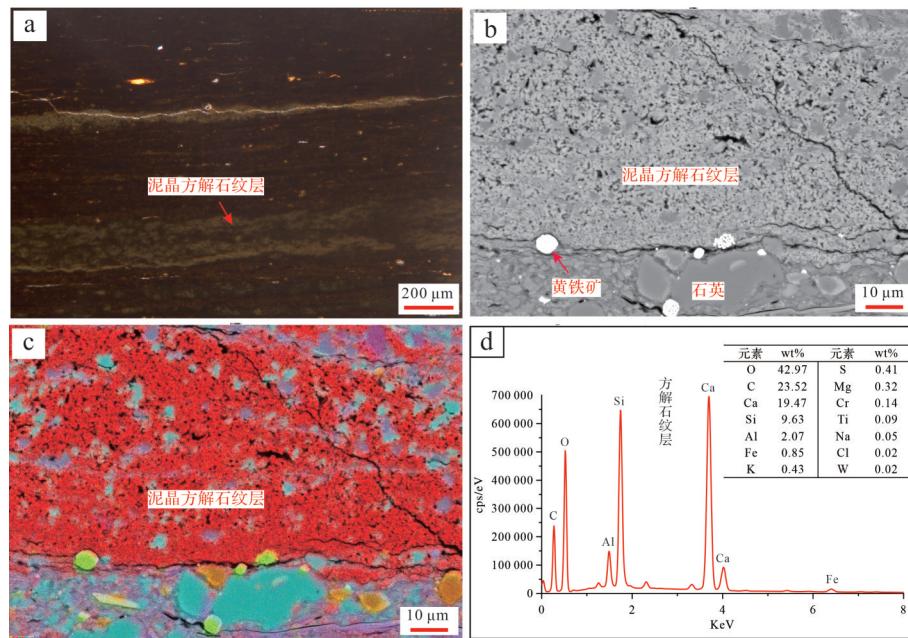


图5 泥晶方解石纹层微观照片

(a)泥晶方解石纹层单偏光下镜下照片;(b)泥晶方解石纹层电镜照片;(c)泥晶方解石纹层能谱照片;(d)泥晶方解石纹层能谱曲线及主要元素含量

Fig.5 Photomicrograph of micrite calcite lamina

(a) single polarizing light micrograph; (b) SEM micrograph; (c) energy spectrum micrograph; (d) energy spectrum and main element content

2) 富有机质纹层+文石纹层

该纹层组合分布最为广泛, TOC含量多大于4%, 平均有机碳含量为5.8%。岩心多呈深灰色—灰白色(图7b), 具有明暗相间的纹层结构, 纹层多数呈连续层状, 发育超压缝。薄片观察发现藻类骨架分布于文

石层中, 层间可见草莓状黄铁矿及有机质碎屑, 陆源碎屑为石英、长石、白云石碎屑等粉砂(图7b'), 该泥岩在沙一段中上处及底部均有发育(图1c), 其沉积时期水体整体盐度较高, 处于贫氧—厌氧的炎热干旱的沉积环境中, 古生产力较高, 藻类勃发, 适宜有机质赋

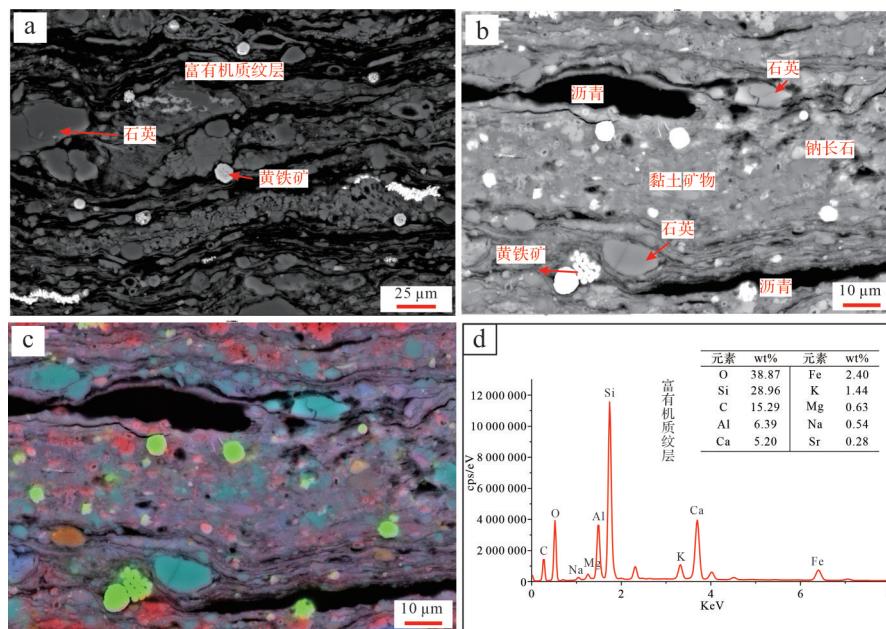


图6 富有机质纹层微观照片
(a,b)富有机质纹层电镜照片;(c)富有机质纹层能谱照片;(d)富有机质纹层能谱曲线及主要元素含量

Fig.6 Photomicrograph of organic-rich lamina

(a, b) SEM micrographs; (c) energy spectrum micrograph; (d) energy spectrum and main element content

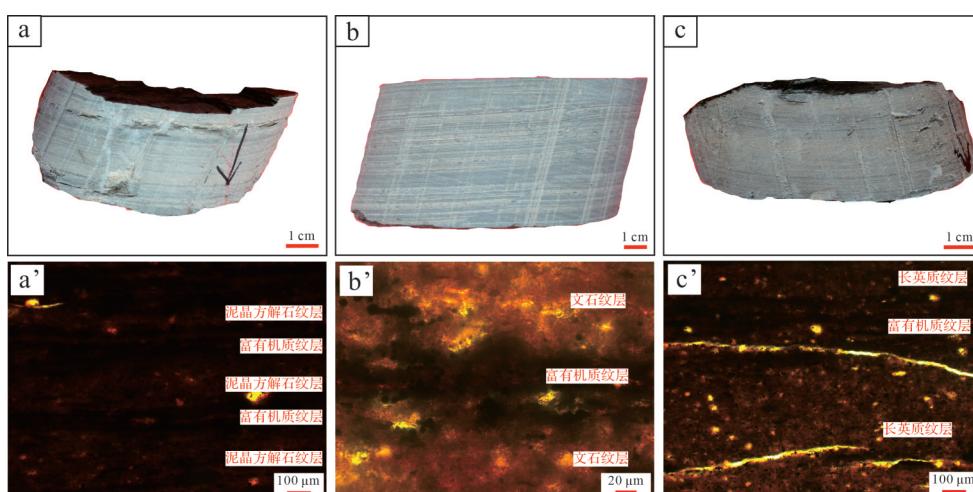


图7 不同纹层组合岩心照片和单偏光镜下照片

(a, a')“富有机质纹层+泥晶方解石纹层”岩心和单偏光镜下照片;(b, b')“富有机质纹层+文石纹层”岩心和单偏光镜下照片;(c, c')“富有机质纹层+长英质纹层”岩心和单偏光镜下照片

Fig.7 Images of different lamina combinations under plane-polarized light (PPL)

(a, a') organic-rich + micrite calcite lamina core photograph and PPL micrograph; (b, b') organic-rich + aragonite lamina core photograph and PPL micrograph; (c, c') organic-rich + feldspar-quartz lamina core photograph and PPL micrograph

存与文石纹层形成。“富有机质+文石质”二元纹层组合泥岩多与“富有机质+泥晶方解石质”二元纹层组合泥岩共同沉积,前者沉积厚度相对较大。

3) 富有机质纹层+长英质纹层

该纹层组合分布较为局限,主要发育在沙一段中部,TOC含量多介于4%~6%,平均有机碳含量为

5.4%。岩心多呈灰色—灰黑色(图7c),为富有机质纹层与长英质纹层互层,具有明暗相间的纹层结构,其中浅色层以石英、长石为主,深色层以有机质与黏土矿物为主,可见交错层理,生物碎屑比较常见(图7c')。矿物组成上以黏土矿物为主,其次为长石和石英,其余为方解石与草莓状黄铁矿。镜下薄片观

察,矿物组分顺层定向排列较明显,方解石结晶程度低,多呈透镜状,混有泥质和粉砂,可见球粒状黄铁矿及有机质碎屑。该泥岩主要发育于沙一段上半段(图1c),沉积时期气候整体相对较为温暖湿润,水体盐度相对较低,水深较深,陆源输入量整体较高,长英质矿物含量和黏土矿物含量升高,碳酸盐矿物含量降低,水体还原性较弱,有机质保存条件较差^[35]。

3.4 储集空间特征

1) “富有机质+泥晶方解石质”二元纹层组合泥岩储集空间特征

该类泥岩微孔类型主要为有机质孔、(铁)白云石晶间孔(图8a)及碳酸盐矿物溶蚀孔(图8b);介孔类型主要为方解石粒(晶)间孔(图8c)和黏土矿物收缩缝;宏孔主要为构造缝和生排烃缝。其微孔平均累计比表面积比例为 $1.35 \text{ m}^2/\text{g}$,体积所占比例较小,平均总孔体积为 $0.0004 \text{ cm}^3/\text{g}$;介孔平均累计比表面积为 $1.13 \text{ m}^2/\text{g}$,平均总孔体积为 $0.003 \text{ cm}^3/\text{g}$ (表3)。该类泥岩有机质富集,镜下构造缝、顺层脉状缝和生排烃缝的内部基本上都被有机质充填,还有部分方解石重结晶晶间孔及黏土矿物收缩缝被有机质

充填,储集性和可流动性较好。

2) “富有机质+文石质”二元纹层组合泥岩储集空间特征

该类泥岩储集空间微孔主要为有机质孔和生物碎屑原生孔(图8e);介孔以文石晶间孔及溶蚀孔为主(图8d);宏孔主要为构造缝和成岩作用缝,其微孔平均累计比表面积比例为 $1.61 \text{ m}^2/\text{g}$,平均总孔体积为 $0.0005 \text{ cm}^3/\text{g}$;介孔平均累计比表面积为 $0.98 \text{ m}^2/\text{g}$,平均总孔体积为 $0.003 \text{ cm}^3/\text{g}$ (表3)。有机质含量高,沥青等有机质在一些缝洞内聚集,含油性较好。

3) “富有机质+长英质”二元纹层组合泥岩储集空间特征

该类泥岩微孔以黄铁矿晶间孔(图8f),有机质孔(图8i)、黏土矿物粒间孔(图8g)和长英质矿物溶蚀孔为主,介孔主要为陆源碎屑粒间孔(图8h)。其微孔平均累计比表面积比例为 $3.77 \text{ m}^2/\text{g}$,平均总孔体积为 $0.0009 \text{ cm}^3/\text{g}$;介孔平均累计比表面积为 $1.32 \text{ m}^2/\text{g}$,平均总孔体积为 $0.004 \text{ cm}^3/\text{g}$ (表3)。特别地,该类岩相样品内生物碎屑较多,出现在富有机质纹层中,钙化生物碎屑首尾沿层理弯曲,周围草莓状有黄铁矿发

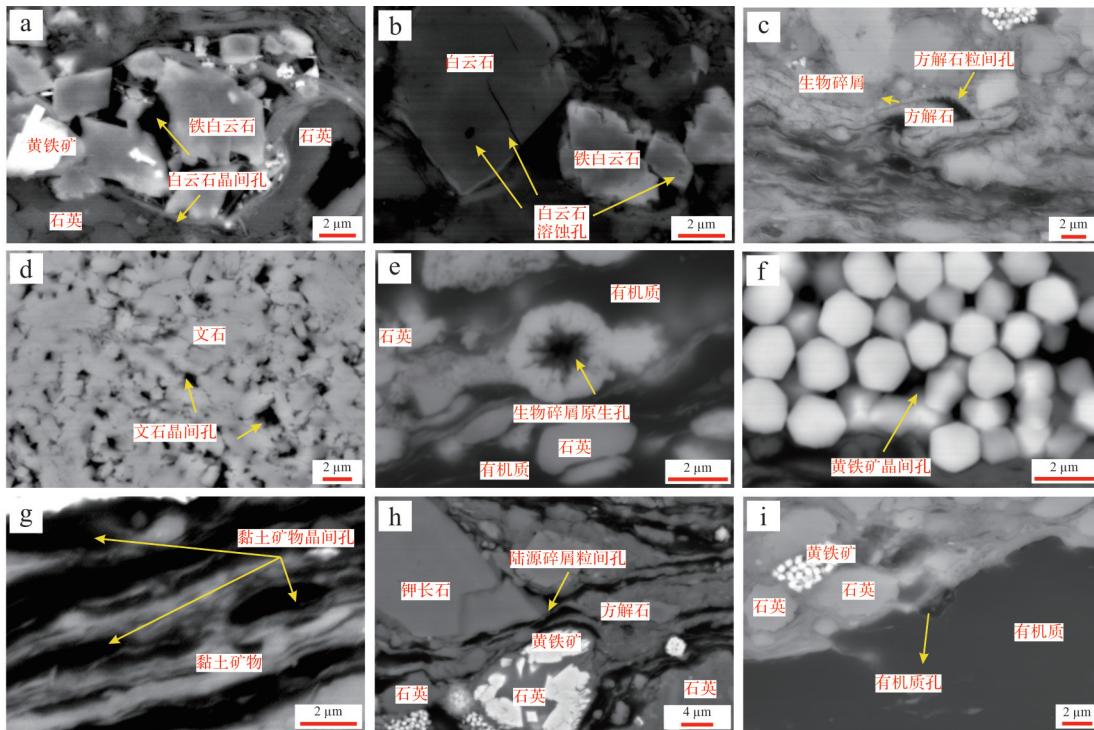


图8 孔隙类型

(a)铁白云石晶间孔;(b)(铁)白云石溶蚀孔;(c)方解石晶间孔;(d)文石层广泛发育晶间孔;(e)生物碎屑原生孔;(f)黄铁矿晶间孔;(g)黏土矿物晶间孔;(h)陆源碎屑粒间孔;(i)有机质孔

Fig.8 Pore types

(a) ferrodolomite intercrystalline; (b) (ferro) dolomite dissolution; (c) calcite intercrystalline; (d) extensive development of intergranular pores in aragonite lamina; (e) bioclastic primary; (f) pyrite intercrystalline; (g) clay mineral intergranular; (h) terrigenous clastic intergranular; (i) organic pores

表3 渤南洼陷沙一段不同纹层组合泥岩孔隙结构特征

Table 3 Pore structures of mudstone with different laminated assemblages, Es¹ member, Bonan Sag

纹层组合	DFT 累积比表面积 (0.367~1.101 nm)	BJH 累积比表面积 (1.7~300 nm)	总孔体积(<1.101 nm)	BJH 总孔体积 (1.7~300 nm)	平均孔直径/nm
富有机质+长英质	2.548 0 m ² /g	1.354 7 m ² /g	0.000 78 cm ³ /g	0.003 965 cm ³ /g	11.708 3 nm
富有机质+长英质	3.561 0 m ² /g	1.399 1 m ² /g	0.001 22 cm ³ /g	0.003 578 cm ³ /g	10.229 2 nm
富有机质+长英质	2.305 4 m ² /g	1.196 4 m ² /g	0.000 75 cm ³ /g	0.004 394 cm ³ /g	14.691 7 nm
富有机质+泥晶方解石质	2.029 7 m ² /g	1.857 8 m ² /g	0.000 61 cm ³ /g	0.004 636 cm ³ /g	9.982 8 nm
富有机质+泥晶方解石质	1.578 2 m ² /g	1.124 0 m ² /g	0.000 44 cm ³ /g	0.003 237 cm ³ /g	11.518 9 nm
富有机质+泥晶方解石质	0.430 4 m ² /g	0.423 1 m ² /g	0.000 13 cm ³ /g	0.002 023 cm ³ /g	19.121 7 nm
富有机质+文石质	0.405 2 m ² /g	0.184 4 m ² /g	0.000 12 cm ³ /g	0.001 112 cm ³ /g	24.117 1 nm
富有机质+文石质	1.899 6 m ² /g	0.953 3 m ² /g	0.000 60 cm ³ /g	0.003 817 cm ³ /g	16.017 2 nm
富有机质+文石质	2.519 6 m ² /g	1.807 5 m ² /g	0.000 78 cm ³ /g	0.003 437 cm ³ /g	7.606 9 nm

育,有机质主要充填于较宽的黏土矿物收缩缝内,含量较少。

4 纹层对储集物性的影响

4.1 纹层组合与孔隙度

在沉积构造相同时,物质组分的差异是影响孔隙类型和大小的主因之一^[36]。由渤海8—平2井多个样品的孔隙度与矿物含量的测试结果、镜下特征的综合分析可知,泥岩孔隙度与长英质矿物含量之间具有明显的正相关性,与黏土矿物之间呈弱正相关性(图9),沙一段的长英质矿物大部分为陆源碎屑输入,颗粒直径大,脆性好,可改造性强,同时石英颗粒较硬,有利于原始孔隙的保存,其含量越高,形成的陆源碎屑粒间孔就越多,而黏土矿物大大提高了储

层的比表面积,在矿物转化过程中体积收缩,形成粒间孔^[37]。其对应的纹层组合,如“富有机质+长英质”二元纹层组合泥岩的平均孔隙度为7.32%。文石由于其多为自形一半自形的晶体形状,使得文石晶间孔极其发育,文石含量与孔隙度同样有一定的正相关性(图9),“富有机质+文石质”二元纹层组合泥岩的平均孔隙度为7.47%,文石纹层对泥岩孔隙度与总孔体积具有良好的贡献。沙一段泥岩孔隙度与方解石含量呈负相关性(图9),泥晶方解石纹层在沉积过程中由于颗粒较小,晶型致密,形成的晶间孔也相对较小。又因为泥岩相对封闭的特性^[38-39],流体更多滞留原地,方解石溶解后,溶解产物不能流动,阻碍进一步溶解,方解石溶蚀孔对泥岩整体孔隙度的贡献相对较小^[40],“富有机质+泥晶方解石质”二元纹层组

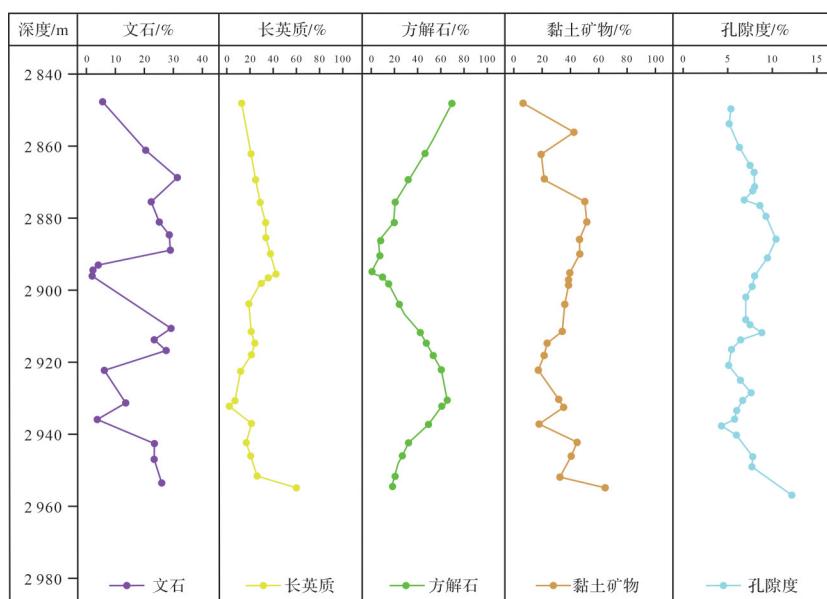


图9 孔隙度与矿物成分对照图

Fig.9 Porosity vs. mineral composition

合泥岩相对应的平均孔隙度也更小,仅为6.34%。三类泥岩中“富有机质+长英质”二元纹层组合泥岩平均孔隙度相对较高,而两种碳酸盐矿物较多的泥岩中,“富有机质+文石质”二元纹层组合泥岩储集物性更好。

4.2 纹层组合与孔隙结构特征

通过对渤海8—平2井不同层段样品的扫描电镜下观察结合孔隙吸附实验结果可知,不同纹层组合泥岩之间无机孔隙结构特征差异明显,“富有机质+长英质”二元纹层组合泥岩在沙一段上部时由于所受成岩作用程度较低,原始孔隙保存完好,介孔和

微孔的最大气体吸附量都远远优于其他纹层组合泥岩(图10a,b),随深度增加受到压实作用的影响,孔隙体积开始减少, N_2 最大吸附体积约 $3\text{ cm}^3/\text{g}$,与其他纹层组合泥岩最高的气体吸附量相似,可见在沙一段“富有机质+长英质”二元纹层组合泥岩的孔隙结构远远优于其他泥岩相,其孔隙类型主要为黏土矿物晶间孔、陆源碎屑粒间孔等无机孔隙类型(图8g,h),孔隙较大,多为微米级,粒间孔隙连通性好,黏土矿物层间微孔隙多被有机质充填。“富有机质+泥晶方解石质”二元纹层组合泥岩同样由于压实作用的影响, N_2 和 CO_2 吸附量随深度增加而减小(图10c,d),

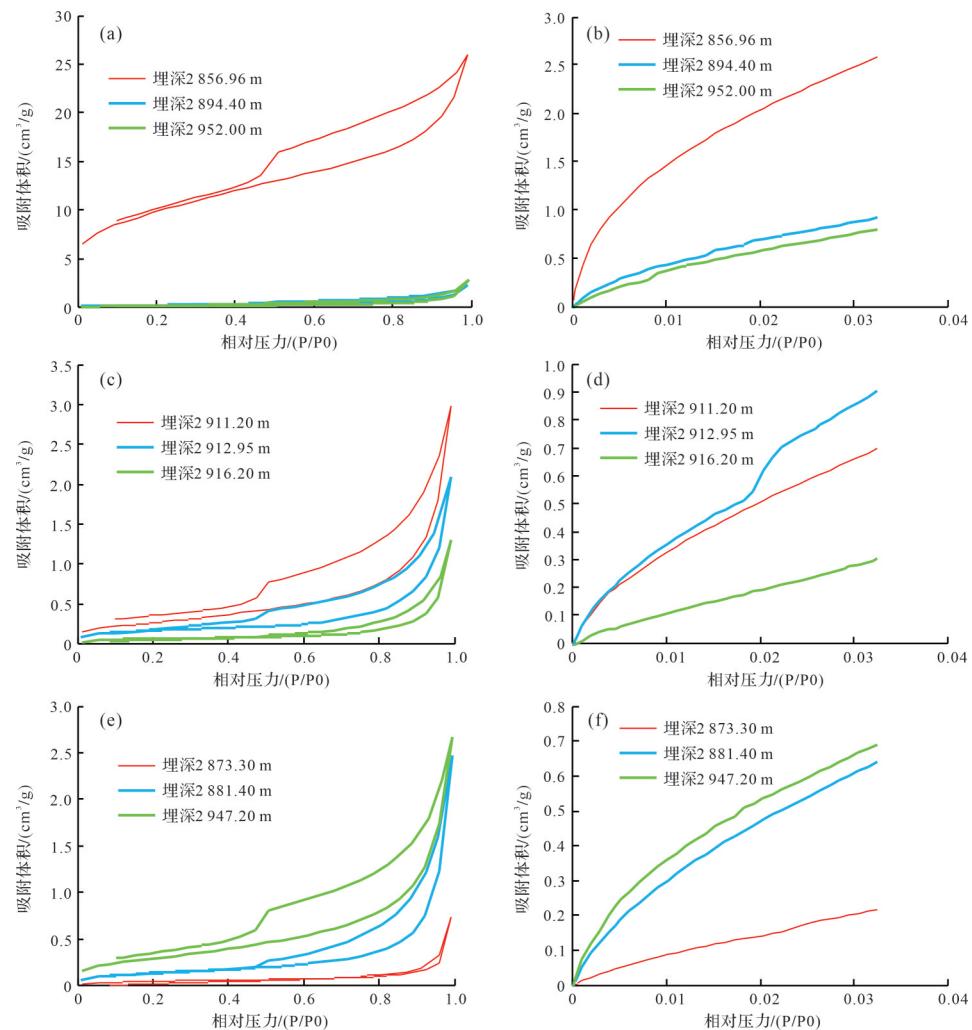


图10 不同纹层组合泥岩低温气体吸附曲线

(a)不同深度“富有机质+长英质”二元纹层组合泥岩低温 N_2 吸附曲线;(b)不同深度“富有机质+长英质”二元纹层组合泥岩低温 CO_2 吸附曲线;(c)不同深度“富有机质+泥晶方解石质”二元纹层组合泥岩低温 N_2 吸附曲线;(d)不同深度“富有机质+泥晶方解石质”二元纹层组合泥岩低温 CO_2 吸附曲线;(e)不同深度“富有机质+文石质”二元纹层组合泥岩低温 N_2 吸附曲线;(f)不同深度“富有机质+文石质”二元纹层组合泥岩低温 CO_2 吸附曲线

Fig.10 Low-temperature gas adsorption curves for binary laminated mudstones with different lamina combinations at different depths

(a) N_2 curves for organic-rich + feldspar-quartz; (b) CO_2 curves for organic-rich + feldspar-quartz; (c) N_2 curves for organic-rich + micrite calcite; (d) CO_2 curves for organic-rich + micrite calcite; (e) N_2 curves for organic-rich + aragonite; (f) CO_2 curves for organic-rich + aragonite

N_2 最大吸附体积为 $2.983\text{ cm}^3/\text{g}$,其孔隙类型主要为自形—半自形泥晶方解石或白云石形成的粒(晶)间孔(图8a),呈长宽比较大的不规则形,孔隙尺度从微米级到纳米级,部分样品由于溶蚀作用的影响,还发育溶蚀孔(图8b)。“富有机质+文石质”二元纹层组合泥岩气体吸附体积则随深度增加体积变大(图10e,f),埋深为2 947.2 m处的“富有机质+文石质”二元纹层组合泥岩介孔和微孔含量都优于浅埋深的同类岩相。由于文石纹层致密的矿物晶粒排列形式,压实作用对其孔隙结构演化影响较小,而较高成岩阶段的溶蚀作用、交代作用等对文石纹层的孔隙结构更加有利,其孔隙形态随埋深增加从以文石晶间孔为主导逐渐向晶间孔、溶蚀孔缝共同为主导演化,介孔和微孔体积都大大增加。有机孔在不同的纹层组合泥岩中均欠发育,仅在部分样品中可见纳米级圆形、椭圆形孔隙。

不同纹层组合泥岩的孔隙结构差异明显,在低成岩阶段“富有机质+长英质”二元纹层组合泥岩介孔和微孔体积远远高于其他泥岩相,在压实作用的影响下,较高成岩阶段的该类泥岩同样有较好的孔隙结构。“富有机质+泥晶方解石质”二元纹层组合泥岩和“富有机质+文石质”二元纹层组合泥岩随深度变化孔隙结构演化形式相反,前者随深度增加孔隙体积降低,后者则有所升高,因此在浅埋深时“富有机质+泥晶方解石质”二元纹层组合泥岩孔隙结构相对较好,而随深度增加,“富有机质+文石质”二元纹层组合泥岩储集性更优。

4.3 不同纹层组合的页岩油赋存状态与可动性

页岩油在泥岩中的赋存状态有游离、溶解和吸附三种状态,其中游离油和吸附油的体积占比与孔径有一定的关联(图11)^[41],结合岩石热解数据、荧光显微镜和环境扫描电镜(ESEM)在低真空条件下的样品观察,确定“富有机质+文石质”二元纹层组合泥岩和“富有机质+泥晶方解石质”二元纹层组合泥岩页岩油主要呈游离态富集(图12a),由于脆性矿物对气体的吸附能力较弱,使得烃类流动性更好,因此以孔缝作为超压油气的释放空间^[42],泥晶碳酸盐矿物纹层易与富有机质纹层伴生或紧邻,生成的烃类可直接进入碳酸盐纹层且沿顺层缝分布;亮晶碳酸盐纹层内部的晶间孔、残留粒间孔、粒间沥青质发育的有机质孔均可被游离油所充填^[43],因此“富有机质+文石质”二元纹层组合泥岩中页岩油集中在富有机质纹

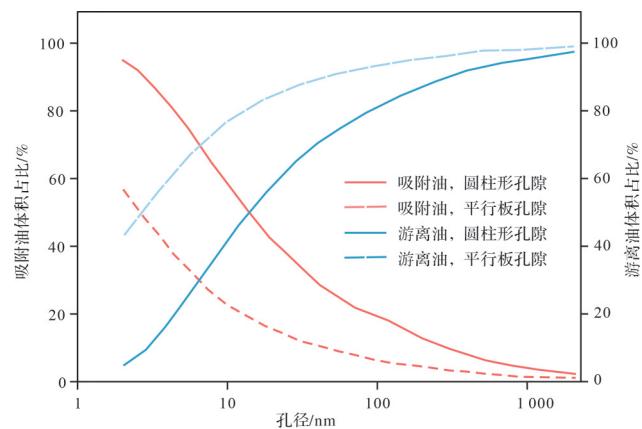


图11 不同形状孔隙中吸附油、游离油的体积占比随孔径的变化^[41]

Fig.11 Variation in volume fraction of adsorbed oil and free oil with pore diameter in different shaped pores^[41]

层与文石纹层的层间缝和黏土矿物晶间孔中,而在文石纹层晶间孔中同样存在较弱的荧光显示,表明其中也有一定的吸附态页岩油存在(图13a,b),“富有机质+泥晶方解石质”二元纹层组合泥岩与前者类似(图12b),游离油与吸附油集中在层间缝中(图13c)。“富有机质+长英质”二元纹层组合泥岩平均孔径为12.2 nm,比另外两类泥岩孔径更小(表3),其页岩油以吸附态和游离态并存的形式存在(图12c,d),吸附油分布在有机质孔、陆源碎屑晶(粒)间孔以及黏土矿物晶间孔中(图13d),游离油在一些大的粒间孔、层间缝以及生排烃缝中赋存。

地层含油饱和度指数(Oil Saturation Index, OSI),即游离烃与总有机碳之比($S_i * 100 / \text{TOC}$, mg/g),是泥岩可流动性进行评价的重要参数。泥岩中的裂隙作为富有机质纹层状岩相贡献占比可达40%~50%的有利储集空间^[18],对于页岩油的富集与运移具有重要意义。“富有机质+泥晶方解石质(文石质)”二元纹层组合泥岩由于碳酸盐矿物不稳定,因此在富有机质纹层和文石纹层(泥晶方解石纹层)之间更容易因受到溶蚀作用的影响形成层间缝,所以明显看出“富有机质+泥晶方解石质(文石质)”二元纹层组合泥岩在可动性方面优于“富有机质+长英质”二元纹层组合泥岩(图14)。

4.4 页岩油赋存模式

页岩油在不同纹层组合泥岩中的赋存模式不同,“富有机质+文石质”二元纹层组合泥岩由于文石矿物不稳定的特性,且多为自形—半自形的晶体形状,使得文石晶间孔及溶蚀孔极其发育,同时裂缝也

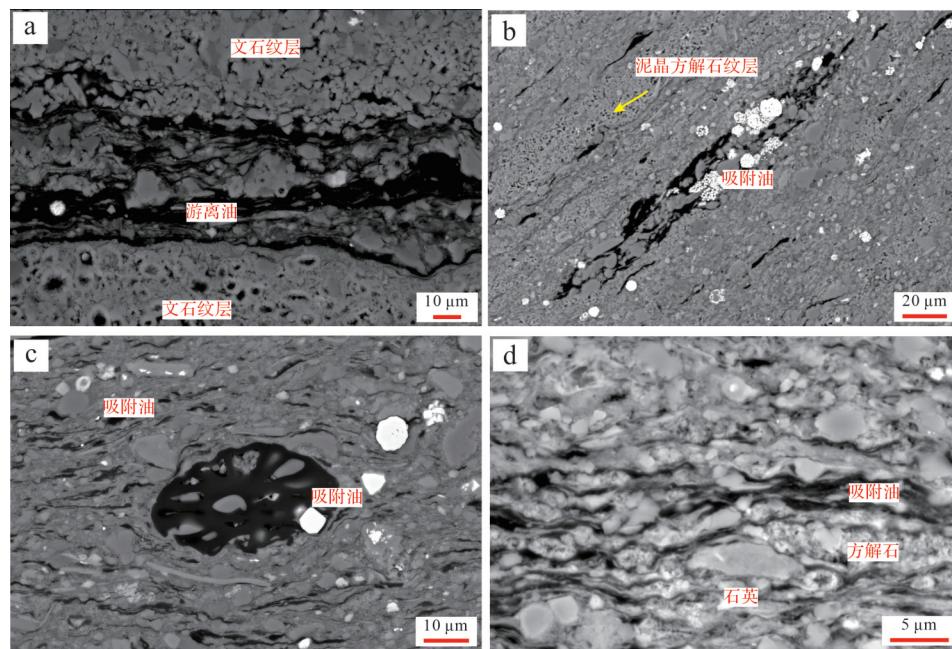


图 12 有机质赋存状态

(a)游离油富集于层间缝;(b)页岩油吸附于矿物孔缝;(c)页岩油吸附于陆源碎屑粒间孔和黏土矿物晶间孔;(d)页岩油吸附于黏土矿物晶间孔

Fig.12 Presence of organic matter

(a) free oil enriched in interlayer fractures; (b) shale oil adsorbed in mineral pores; (c) shale oil adsorbed in the intergranular pores of terrigenous clastics and clay minerals; (d) shale oil adsorbed in clay mineral intercristalline pores

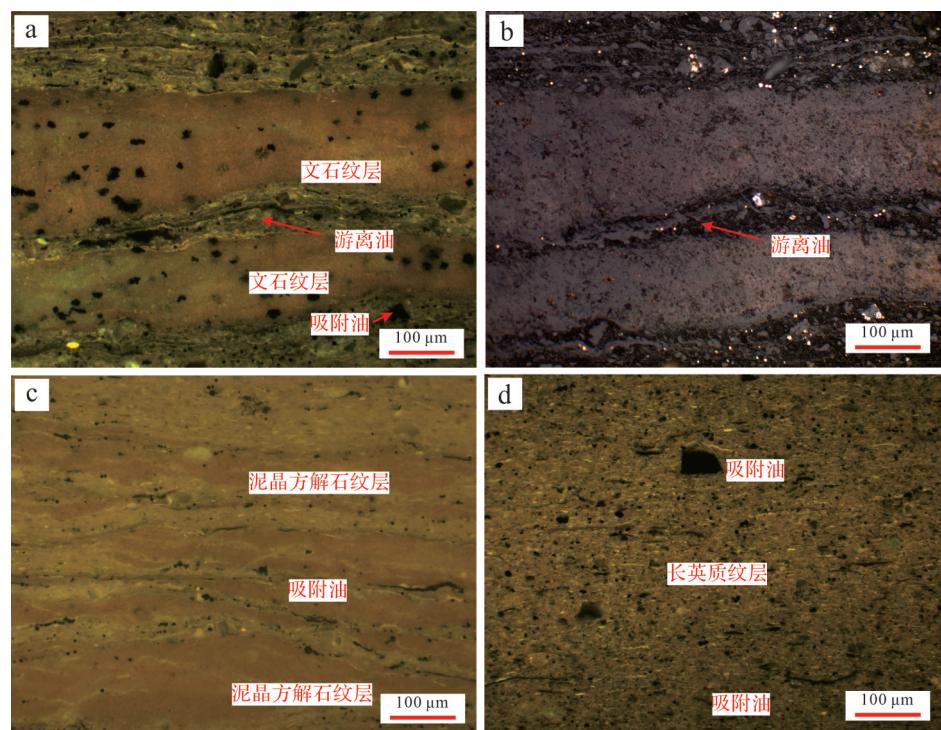


图 13 不同纹层组合荧光显示

(a)“富有机质+文石质”二元纹层组合泥岩页岩油在富有机质纹层中呈游离态形式赋存;(b)“富有机质+文石质”二元纹层组合泥岩同一位置反射光照片;(c)“富有机质+泥晶方解石质”二元纹层组合泥岩页岩油在富有机质纹层中呈吸附态形式赋存(d)“富有机质+长英质”二元纹层组合泥岩页岩油呈吸附态赋存

Fig.13 Fluorescence displayed by different lamina combinations

(a) isolated shale oil in organic-rich + aragonite binary lamina in organic-rich stratified mudstone; (b) reflected light micrographs of organic-rich + aragonite mudstone assemblage at (b) location; (c) shale oil in organic-rich + micrite calcite lamina adsorbed in organic-rich stratum; (d) shale oil adsorbed in organic-rich + feldspar-quartz lamina

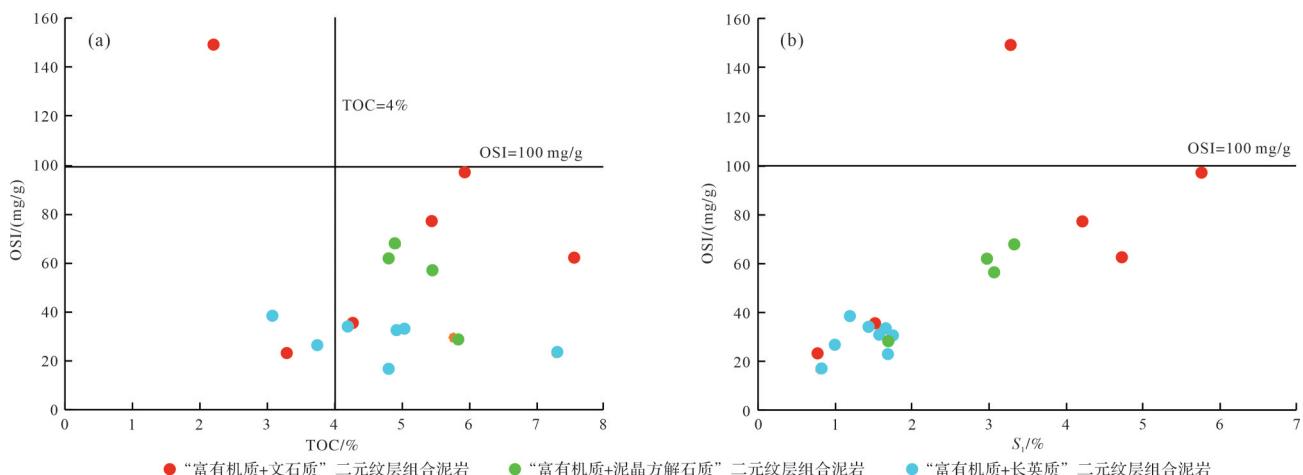


图 14 不同纹层组合泥岩可动性特征

(a)不同纹层组合泥岩OSI-TOC关系图;(b)不同纹层组合泥岩OSI-热解S₁关系图

Fig.14 Mobility diagrams for mudstone with different lamina combinations

(a) OSI-TOC; (b) OSI-pyrolysis S₁

相对发育,以层间缝为主,这有效沟通了不同纹层之间的孔缝,页岩油在层间缝及其周围的孔隙之间以游离态的形式富集(图15a),可动性最好。“富有机质+泥晶方解石质”二元纹层组合泥岩页岩油赋存模式与“富有机质+文石质”二元纹层组合泥岩类似,由于其平均孔隙度相对较小,并且随深度增加孔隙体积减小,所以其吸附油相对较多,游离油相对减少(图

15b),可动性较弱。“富有机质+长石质”二元纹层组合泥岩黏土矿物相对更多,前人研究表明长英质纹层具有原地滞留微运移富集的特征,富有机质纹层中的有机质生烃后,会经微距运移至相邻叠覆的长英质纹层中^[44-46],因此“富有机质+长石质”二元纹层组合泥岩中页岩油以吸附态和游离态并存的形式赋存,且吸附油相对较多(图15c),可动性最差,不利于页岩油开采。

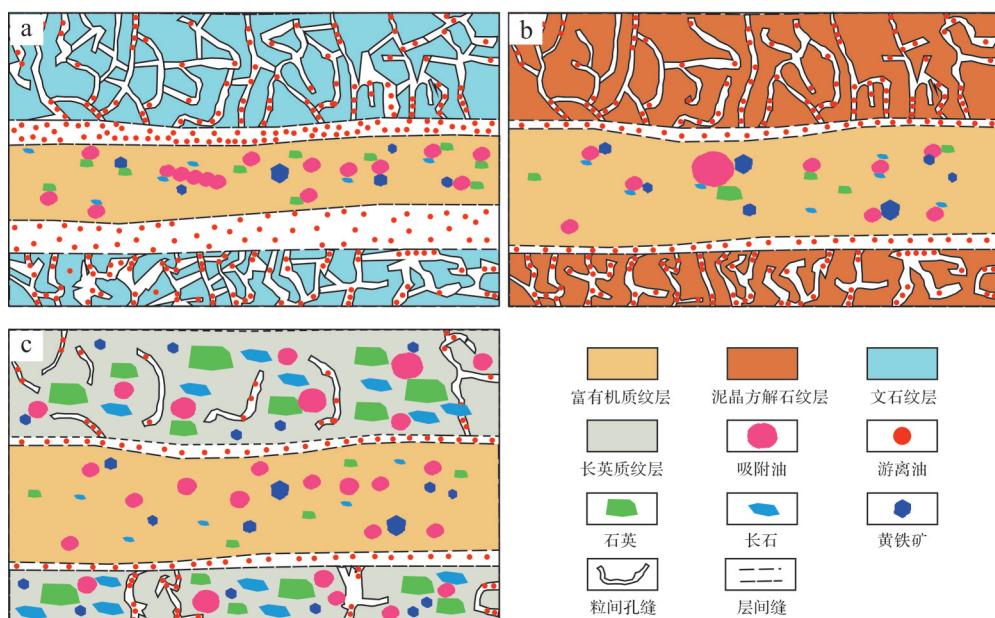


图 15 不同纹层组合泥岩页岩油赋存模式

(a)“富有机质+文石质”二元纹层组合泥岩页岩油赋存模式;(b)“富有机质+泥晶方解石质”二元纹层组合泥岩页岩油赋存模式;(c)“富有机质+长英质”二元纹层组合泥岩页岩油赋存模式

Fig.15 Occurrence patterns of shale oil in different lamina combinations

(a) organic-rich + aragonite combination; (b) organic-rich + micrite calcite combination; (c) organic-rich + feldspar-quartz combination

5 结论

(1) 沙一段泥岩分为长英质纹层、黏土矿物纹层、文石纹层、泥晶方解石纹层以及富有机质纹层五种纹层类型,不同纹层又可组合为“富有机质+泥晶方解石质”“富有机质+文石质”和“富有机质+长英质”三种二元纹层组合泥岩,不同泥岩形成于不同的沉积环境。

(2) “富有机质+长英质”二元纹层组合泥岩孔隙度和孔隙结构最好,“富有机质+文石质”二元纹层组合泥岩次之,“富有机质+泥晶方解石质”二元纹层组合泥岩的孔隙度和孔隙结构最差。

(3) “富有机质+长英质”二元纹层组合泥岩页岩油吸附态和游离态并存,吸附油相对较多,可动性最差;“富有机质+泥晶方解石质”二元纹层组合泥岩游离油相对较多,可动性较好;“富有机质+文石质”二元纹层组合泥岩页岩油以游离态为主,可动性最好。

(4) 建立了三类不同泥岩的页岩油赋存模式,“富有机质+文石质”二元纹层组合泥岩是三种纹层组合泥岩中最有利的开发岩相。

参考文献(References)

- [1] 侯明扬,杨国丰. 美国页岩油气资源开发现状及未来展望[J]. 国际石油经济, 2014, 22 (8) : 63-68. [Hou Mingyang, Yang Guofeng. Review and prospects for US shale oil & gas resources development[J]. International Petroleum Economics, 2014, 22(8): 63-68.]
- [2] Montgomery S L, Jarvie D M, Bowker K A, et al. Mississippian Barnett shale, Fort Worth Basin, north-central Texas: Gas-shale play with multi-trillion cubic foot potential[J]. AAPG Bulletin, 2005, 89(2): 155-175.
- [3] 张抗,张葵叶. 美国页岩油气产量增长态势及其启示[J]. 石油科技论坛, 2013, 32(5): 30-35. [Zhang Kang, Zhang Kuiye. Momentum of US shale oil and gas production growth[J]. Petroleum Science and Technology Forum, 2013, 32(5): 30-35.]
- [4] 张林晔,李钜源,李政,等. 北美页岩油气研究进展及对中国陆相页岩油气勘探的思考[J]. 地球科学进展, 2014, 29(6): 700-711. [Zhang Linye, Li Juyuan, Li Zheng, et al. Advances in shale oil/gas research in North America and considerations on exploration for continental shale oil/gas in China[J]. Advances in Earth Science, 2014, 29(6): 700-711.]
- [5] 邹才能,杨智,崔景伟,等. 页岩油形成机制、地质特征及发展对策[J]. 石油勘探与开发, 2013, 40(1): 14-26. [Zou Caineng, Yang Zhi, Cui Jingwei, et al. Formation mechanism, geological characteristics and development strategy of nonmarine shale oil in China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2013, 40(1): 14-26.]
- [6] 杜金虎,胡素云,庞正炼,等. 中国陆相页岩油类型、潜力及前景[J]. 中国石油勘探, 2019, 24 (5) : 560-568. [Du Jinhu, Hu Suyun, Pang Zhenglian, et al. The types, potentials and prospects of continental shale oil in China[J]. China Petroleum Exploration, 2019, 24(5): 560-568.]
- [7] 赵文智,胡素云,侯连华,等. 中国陆相页岩油类型、资源潜力及与致密油的边界[J]. 石油勘探与开发, 2020, 47(1) : 1-10. [Zhao Wenzhi, Hu Suyun, Hou Lianhua, et al. Types and resource potential of continental shale oil in China and its boundary with tight oil[J]. Petroleum Exploration and Development, 2020, 47(1): 1-10.]
- [8] 杨智,邹才能.“进源找油”:源岩油气内涵与前景[J]. 石油勘探与开发, 2019, 46(1) : 173-184. [Yang Zhi, Zou Caineng. "Exploring petroleum inside source kitchen": Connotation and prospects of source rock oil and gas[J]. Petroleum Exploration and Development, 2019, 46(1): 173-184.]
- [9] 张文正,杨华,杨伟伟,等. 鄂尔多斯盆地延长组长7湖相页岩油地质特征评价[J]. 地球化学, 2015, 44(5) : 505-515. [Zhang Wenzheng, Yang Hua, Yang Weiwei, et al. Assessment of geological characteristics of lacustrine shale oil reservoir in Chang7 member of Yanchang Formation, Ordos Basin[J]. Geochimica, 2015, 44(5): 505-515.]
- [10] 何涛华,李文浩,谭昭昭,等. 南襄盆地泌阳凹陷核桃园组页岩油富集机制[J]. 石油与天然气地质, 2019, 40 (6) : 1259-1269. [He Taohua, Li Wenhao, Tan Zhaozhao, et al. Mechanism of shale oil accumulation in the Hetaoyuan Formation from the Biyang Depression, Nanxiang Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2019, 40(6): 1259-1269.]
- [11] 赵贤正,周立宏,蒲秀刚,等. 断陷湖盆湖相页岩油形成有利条件及富集特征:以渤海湾盆地沧东凹陷孔店组二段为例[J]. 石油学报, 2019, 40(9): 1013-1029. [Zhao Xianzheng, Zhou Lihong, Pu Xiugang, et al. Favorable formation conditions and enrichment characteristics of lacustrine facies shale oil in faulted lake basin: A case study of member 2 of Kongdian Formation in Cangdong Sag, Bohai Bay Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2019, 40(9): 1013-1029.]
- [12] 林森虎,袁选俊,杨智,等. 陆相页岩与泥岩特征对比及其意义:以鄂尔多斯盆地延长组7段为例[J]. 石油与天然气地质, 2017, 38 (3) : 517-523. [Lin Senhu, Yuan Xuanjun, Yang Zhi, et al. Comparative study on lacustrine shale and mudstone and its significance: A case from the 7th member of Yanchang Formation in the Ordos Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2017, 38(3): 517-523.]
- [13] 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.]
- [14] 宋国奇,张林晔,卢双舫,等. 页岩油资源评价技术方法及其应用[J]. 地学前缘, 2013, 20(4) : 221-228. [Song Guoqi, Zhang Linye, Lu Shuangfang, et al. Evaluation methods and applications of shale oil resources[J]. Tectonic Sciences and Frontiers of Earth Sciences, 2013, 20(4) : 221-228.]

- Linye, Lu Shuangfang, et al. Resource evaluation method for shale oil and its application[J]. *Earth Science Frontiers*, 2013, 20(4): 221-228.]
- [15] 盛湘,陈祥,章新文,等.中国陆相页岩油开发前景与挑战[J].石油实验地质,2015,37(3):267-271. [Sheng Xiang, Chen Xiang, Zhang Xinwen, et al. Prospects and challenges of continental shale oil development in China[J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2015, 37(3): 267-271.]
- [16] 邹才能,赵群,丛连铸,等.中国页岩气开发进展、潜力及前景[J].天然气工业,2021,41(1):1-14. [Zou Caineng, Zhao Qun, Cong Lianzhu, et al. Development progress, potential and prospect of shale gas in China[J]. *Natural Gas Industry*, 2021, 41(1): 1-14.]
- [17] 董春梅,马存飞,林承焰,等.一种泥页岩层系岩相划分方法[J].中国石油大学学报(自然科学版),2015,39(3):1-7. [Dong Chunmei, Ma Cunfei, Lin Chengyan, et al. A method of classification of shale set[J]. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)*, 2015, 39(3): 1-7.]
- [18] 王学军,宁方兴,郝雪峰,等.古近系页岩油赋存特征:以济阳坳陷为例[J].科学技术与工程,2017,17(29):39-48. [Wang Xuejun, Ning Fangxing, Hao Xuefeng, et al. Paleogene shale oil occurrence features: A case of Jiyang Depression[J]. *Science Technology and Engineering*, 2017, 17(29): 39-48.]
- [19] 宁方兴,王学军,郝雪峰,等.济阳坳陷不同岩相页岩油赋存机理[J].石油学报,2017,38(2):185-195. [Ning Fangxing, Wang Xuejun, Hao Xuefeng, et al. Occurrence mechanism of shale oil with different lithofacies in Jiyang Depression[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2017, 38(2): 185-195.]
- [20] 施振生,董大忠,王红岩,等.含气页岩不同纹层及组合储集层特征差异性及其成因:以四川盆地下志留统龙马溪组一段典型井为例[J].石油勘探与开发,2020,47(4):829-840. [Shi Zhensheng, Dong Dazhong, Wang Hongyan, et al. Reservoir characteristics and genetic mechanisms of gas-bearing shales with different laminae and laminae combinations: A case study of member 1 of the Lower Silurian Longmaxi shale in Sichuan Basin, SW China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2020, 47(4): 829-840.]
- [21] 施振生,邱振,董大忠,等.四川盆地巫溪2井龙马溪组含气页岩细粒沉积纹层特征[J].石油勘探与开发,2018,45(2):339-348. [Shi Zhensheng, Qiu Zhen, Dong Dazhong, et al. Laminae characteristics of gas-bearing shale fine-grained sediment of the Silurian Longmaxi Formation of well Wuxi 2 in Sichuan Basin, SW China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2018, 45(2): 339-348.]
- [22] 蔚克来,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.]
- [23] 陈扬,胡钦红,赵建华,等.渤海湾盆地东营凹陷湖相富有机质页岩纹层特征和储集性能[J].石油与天然气地质,2022,43(2):307-324. [Chen Yang, Hu Qinhong, Zhao Jianhua, et al. Lamina characteristics and their influence on reservoir property of lacustrine organic-rich shale in the Dongying Sag, Bohai Bay Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2022, 43(2): 307-324.]
- [24] 马宝军,漆家福,刘阳,等.渤海地区新生代构造演化与油气成藏[J].石油勘探与开发,2006,33(5):572-575. [Ma Baojun, Qi Jiafu, Liu Yang, et al. Cenozoic tectonic evolution and hydrocarbon accumulation in Bonan region[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2006, 33(5): 572-575.]
- [25] 刘华,蒋有录,谷国翠,等.沾化凹陷渤海洼陷古近系压力特征及成因机制[J].中国石油大学学报(自然科学版),2013,37(4):46-51, 70. [Liu Hua, Jiang Youlu, Gu Guocui, et al. Pressure characteristics and formation mechanisms of Paleogene in Bonan Sag, Zhanhua Depression[J]. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)*, 2013, 37(4): 46-51, 70.]
- [26] 宋国奇,刘华,蒋有录,等.沾化凹陷渤海洼陷沙河街组原油成因类型及分布特征[J].石油实验地质,2014,36(1):33-38. [Song Guoqi, Liu Hua, Jiang Youlu, et al. Genetic types and distribution characteristics of crude oils from Shahejie Formation in Bonan subsag, Zhanhua Sag, Jiyang Depression[J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2014, 36(1): 33-38.]
- [27] 朱德燕,王勇,银燕,等.断陷湖盆咸化环境沉积与页岩油气关系:以东营凹陷、渤海地区为例[J].油气地质与采收率,2015,22(6):7-13. [Zhu Deyan, Wang Yong, Yin Yan, et al. Study on the relationship between saline environmental deposition and shale oil-gas in faulted basin: A case study of areas of Dongying Sag and Bonan subsag[J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2015, 22(6): 7-13.]
- [28] 王永诗,李政,巩建强,等.济阳坳陷页岩油气评价方法:以沾化凹陷罗家地区为例[J].石油学报,2013,34(1):83-91. [Wang Yongshi, Li Zheng, Gong Jianqiang, et al. Discussion on an evaluation method of shale oil and gas in Jiyang Depression: A case study on Luojia area in Zhanhua Sag[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2013, 34(1): 83-91.]
- [29] 李志明,张隽,鲍云杰,等.沾化凹陷渤海洼陷沙一段湖相富有机质烃源岩岩石学与孔隙结构特征:以罗63井和义21井取心段为例[J].吉林大学学报(地球科学版),2018,48(1):39-52. [Li Zhiming, Zhang Jun, Bao Yunjie, et al. Characteristics of petrology and pore configuration of lacustrine source rock rich in organic matter from the First member of Shahejie Formation in Bonan Sag, Zhanhua Depression: A case study on well Luo 63 and Yi 21 cored interval[J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2018, 48(1): 39-52.]
- [30] 柳少波,田华,马行陟,等.非常规油气地质实验技术与应用[M].北京:科学出版社,2016. [Liu Shaobo, Tian Hua, Ma Hangzhi, et al. *Laboratory analytical techniques for unconventional oil and gas research and their application*[M]. Beijing:

- Science Press, 2016.]
- [31] Peltonen C, Marcussen Ø, Bjørlykke K, et al. Clay mineral diagenesis and quartz cementation in mudstones: The effects of smectite to illite reaction on rock properties[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2009, 26(6): 887-898.
- [32] Metwally Y M, Chesnokov E M. Clay mineral transformation as a major source for authigenic quartz in thermo-mature gas shale [J]. *Applied Clay Science*, 2012, 55: 138-150.
- [33] Mastalerz M, Schimmelmann A, Drobniak A, et al. Porosity of Devonian and Mississippian New Albany shale across a maturation gradient: Insights from organic petrology, gas adsorption, and mercury intrusion[J]. *AAPG Bulletin*, 2013, 97(10): 1621-1643.
- [34] 陈鑫, 钟建华, 袁静, 等. 澄南洼陷深层碎屑岩储集层中的黏土矿物特征及油气意义[J]. *石油学报*, 2009, 30(2): 201-207. [Chen Xin, Zhong Jianhua, Yuan Jing, et al. Characteristics of clay mineral and its hydrocarbon significance in Paleogene clastic reservoir of Bonan Sag[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2009, 30(2): 201-207.]
- [35] Liu X Y, Chen H H, Mu X S, et al. Organic matter preservation conditions in the Third member of the Shahejie Formation (Dongpu Depression, China) [J]. *International Journal of Coal Geology*, 2023, 277: 104334.
- [36] 滕建彬, 刘惠民, 邱隆伟, 等. 东营凹陷古近系页岩油储层储集空间发育特点与控制因素[J/OL]. *地球科学*, <http://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1874.p.20220531.0951.012.html>. [Teng Jianbin, Liu Huimin, Qiu Longwei, et al. Characteristics and influencing factors of shale oil reservoir space in Paleogene shale of Dongying Sag[J/OL]. *Earth Science*, <http://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1874.p.20220531.0951.012.html>.]
- [37] Liu H M, Zhang S, Song G Q, et al. Effect of shale diagenesis on pores and storage capacity in the Paleogene Shahejie Formation, Dongying Depression, Bohai Bay Basin, East China[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2019, 103: 738-752.
- [38] 郭秋麟, 陈晓明, 宋焕琪, 等. 泥页岩埋藏过程孔隙度演化与预测模型探讨[J]. *天然气地球科学*, 2013, 24(3): 439-449. [Guo Qiulin, Chen Xiaoming, Song Huanqi, et al. Evolution and models of shale porosity during burial process[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2013, 24(3): 439-449.]
- [39] 张顺, 刘惠民, 王敏, 等. 东营凹陷页岩油储层孔隙演化[J]. *石油学报*, 2019, 39(8): 754-766. [Zhang Shun, Liu Huimin, Wang Min. Pore evolution of shale oil reservoirs in Dongying Sag[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2018, 39(7): 754-766.]
- [40] 吴林钢, 李秀生, 郭小波, 等. 马朗凹陷芦草沟组页岩油储层成岩演化与溶蚀孔隙形成机制[J]. *中国石油大学学报(自然科*
- 学版), 2012, 36(3): 38-43. [Wu Lingang, Li Xiusheng, Guo Xiaobo, et al. Diagenetic evolution and formation mechanism of dissolved pore of shale oil reservoirs of Lucaogou Formation in Malang Sag[J]. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)*, 2012, 36(3): 38-43.]
- [41] 党伟, 张金川, 聂海宽, 等. 页岩油微观赋存特征及其主控因素: 以鄂尔多斯盆地延安地区延长组7段3亚段陆相页岩为例[J]. *石油学报*, 2022, 43(4): 507-523. [Dang Wei, Zhang Jinchuan, Nie Haikuan, et al. Microscopic occurrence characteristics of shale oil and their main controlling factors: A case study of the 3rd submember continental shale of member 7 of Yanchang Formation in Yan'an area, Ordos Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2022, 43(4): 507-523.]
- [42] 王超, 张柏桥, 舒志国, 等. 焦石坝地区五峰组—龙马溪组页岩纹层发育特征及其储集意义[J]. *地球科学*, 2019, 44(3): 972-982. [Wang Chao, Zhang Boqiao, Shu Zhiguo, et al. Shale lamination and its influence on shale reservoir quality of Wufeng Formation-Longmaxi Formation in Jiaoshiba area[J]. *Earth Science*, 2019, 44(3): 972-982.]
- [43] 白静, 徐兴友, 张君峰, 等. 陆相页岩碳酸盐矿物成因及其页岩气富集作用: 以松辽盆地梨树断陷沙河子组页岩为例[J]. *中国矿业大学学报*, 2022, 51(4): 742-756. [Bai Jing, Xu Xingyou, Zhang Junfeng, et al. Genesis of carbonate minerals in continental shale and their roles in shale gas enrichment: A case study of the shale of Shahezi Formation in Lishu Fault Depression, Songliao Basin, NE China[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2022, 51(4): 742-756.]
- [44] Liu B, Sun J H, Zhang Y Q, et al. Reservoir space and enrichment model of shale oil in the First member of Cretaceous Qingshankou Formation in the Changling Sag, southern Songliao Basin, NE China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2021, 48(3): 608-624.
- [45] 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.
- [46] 吴科睿, 孙雨, 闫百泉, 等. 纹层状湖盆细粒沉积岩储集物性及油气富集特征研究进展[J]. *沉积学报*, 2025, 43(1): 20-38. [Wu Kerui, Sun Yu, Yan Baiquan, et al. Progress on the features of physical property and hydrocarbon accumulation of laminated lacustrine fine-grained sedimentary rocks[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2025, 43(1): 20-38.]

Lacustrine Organic-rich Black Mudstone Laminated Facies and Its Reservoir Significance: A case study of the Shahejie Formation mudstone in the Jiyang Depression

DONG JiKai^{1,2}, DONG ChunMei^{1,2}, LIN ChengYan^{1,2}, ZHAO ZiRu^{1,2}, ZHENG XinRu¹, LIU LianQi³, NIE Cong³, LIU Bin³

1. School of Geosciences and Technology, China University of Petroleum (East China), Qingdao, Shandong 266580, China

2. National Key Laboratory of Deep Oil and Gas, China University of Petroleum (East China), Qingdao, Shandong 266580, China

3. Oil Production Plant, Shengli Oilfield Company, SINOPEC, Dongying, Shandong 257200, China

Abstract: [Objective] China possesses abundant terrestrial shale oil resources with significant potential for exploration. Now, substantial breakthroughs have been made in the exploration and development of shale oil in the Shahejie Formation (E_s^1) in Jiyang Depression, but there are still some problems to be solved in the differences of reservoir properties among black mudstones of different lithofacies. [Methods] This study focused on the black mudstone of the Shahejie Formation in the Jiyang Depression, southern Bohai Bay Basin. The laminated strata types and combinations, pore types and structures were examined by X-ray diffraction (XRD), rock pyrolysis, fluorescence analysis, scanning electron microscopy (SEM) and low-temperature gas adsorption. [Results] Five distinctive categories of mineral types were identified: feldspar-quartz lamina, clay mineral-rich lamina, aragonite lamina, micritic calcite-dominated lamina, and organic-rich lamina. Their vertical stacking occurs in three binary layer combinations: organic-rich + micritic calcite, organic-rich + aragonite, and organic-rich + feldspar-quartz. The porosities of the organic-rich + aragonite and organic-rich + feldspar-quartz binary lamina combination mudstones are higher than the other combinations, and possess better pore structure and connectivity. In the organic-rich + aragonite combination, shale oil is present in a free state within interlayer spaces, and is the most mobile. The mobility of the free oil and adsorbed oil in the organic-rich + aragonite mudstone is poorer. The lowest-mobility oil occurs mainly as adsorbed material in the organic-rich + feldspar-quartz combination mudstone. [Conclusions] The different strata combinations in the mudstone structure influence the porosity, pore structure and hydrocarbon storage capacity of these black mudstones. Based on the findings of this study, shale oil reservoir storage models were developed for each combination to provide a rational foundation for the future extraction of shale oil and gas in the region.

Key words: mudstone; lamina type and combination; reservoir properties; occurrence pattern; Bohai Bay Basin