

文章编号: 0253-2697(2024)11-1621-17 DOI:10.7623/syxb202411005

济阳坳陷富碳酸盐页岩纹层结构的差异性 及其对储层品质的影响

——以东营凹陷沙河街组页岩为例

倪良田 杜玉山 蒋龙 孙红霞 程紫燕 任敏华 孙宁 杨依庆 彭先国

(中国石油化工股份有限公司胜利油田分公司勘探开发研究院 山东东营 257015)

摘要:济阳坳陷页岩油资源量大,多洼陷、多口水平井的峰值产油量超过100 t/d,初步实现了页岩油革命的良好开端。济阳坳陷页岩具有咸化富碳酸盐组分的特征,且页岩层系中广泛发育特色的纹层结构。纹层结构是页岩岩相划分的重要依据,可为页岩储集特征的分析提供基础信息。页岩纹层结构的差异是造成页岩孔隙结构差异,进而影响储层品质的重要因素。通过开展岩心精细描述、全岩X射线衍射分析、岩石薄片鉴定、场发射扫描电镜分析、核磁共振实验等,明确了济阳坳陷富碳酸盐页岩纹层的发育类型及特征。①纹层特征控制页岩的孔隙类型和孔径分布。灰质纹层发育中孔—大孔,是页岩连通孔隙的主要载体,也是页岩主要的有效储集单元,且随着方解石重结晶程度增加,晶间缝更发育,孔隙连通性越好;泥质纹层以发育中孔—小孔为主,孔隙连通性差,但富集有机质,是主要的生油单元。②层理缝是济阳坳陷页岩重要的基质微缝类型,在高有机质连续亮晶灰质纹层页岩和低沉积速率、较高演化程度、高频互层的连续隐晶灰质纹层页岩中普遍发育。③薄互层的灰质-泥质“层偶”结构是济阳坳陷富碳酸盐页岩的优质纹层结构,纹层的密度和横向连续性越好,多尺度、多类型孔隙网络越发育,储层品质越好。纹层结构在储层中起到了“高速通道”的作用。富有机质连续纹层页岩是济阳坳陷页岩油的优选开发对象,这一研究认识为现阶段页岩油“甜点”和黄金靶体开发目标的优选提供了地质理论基础。

关键词:济阳坳陷;页岩纹层;连通性;孔缝模式;层理缝;储层品质

中图分类号:TE122.1

文献标识码:A

Difference in laminated structure of carbonate-rich shale and its effects on reservoir quality in Jiyang depression: a case study of Shahejie Formation shale in Dongying sag

Ni Liangtian Du Yushan Jiang Long Sun Hongxia Cheng Ziyang Ren Minhua
Sun Ning Yang Yiqing Peng Xianguo

(Research Institute of Exploration and Development, Sinopec Shengli Oilfield Company, Shandong Dongying 257015, China)

Abstract: Jiyang depression boasts large shale oil resources, with peak oil production exceeding 100 t/d in multiple subsags and horizontal wells, making a good beginning for the shale oil revolution. The shale in Jiyang depression is characterized by saline and carbonate-rich components, with widely developed laminated structure. Laminated structure can provide an important basis for lithofacies classification, and basic information for reservoir characteristic analysis. The variations in laminated structure are important factors that cause differences in shale pore structures and thus affect reservoir quality. Through detailed description of cores, whole rock X-ray diffraction analysis, thin section identification, field emission scanning electron microscopy analysis, and nuclear magnetic resonance experiments, the development types and characteristics of carbonate-rich shale laminae in Jiyang depression have been clarified as below. (1) Lamina features control the type and pore size distribution of shale pores. The medium to large pores are mainly developed in calcareous lamina which are the main carriers of connected pores and effective reservoir units in shale. With the increase of calcite recrystallization, intergranular fractures are more developed and pore connectivity is better. The argillaceous laminae are dominated by medium to small pores with poor connectivity, but rich in organic matters, playing a role as the main oil generating unit. (2) Bedding fracture, as an important matrix micro-fracture type of shale in Jiyang depression, are commonly developed in the continuous sparry calcareous laminated shale with high organic matters and the continuous cryptocrystalline calcareous laminated

基金项目:中国石油化工股份有限公司重点科技攻关项目“深洼带及复杂断裂带页岩油综合评价关键技术”(P22035)、“东营凹陷页岩油立体开发优化设计关键技术”(P23026)和中国石油化工股份有限公司胜利油田博士后项目“牛庄洼陷沙四上基质型页岩有利岩相评价”(YKB2103)资助。

第一作者及通信作者:倪良田,男,1985年12月生,2020年获中国石油大学(华东)博士学位,现为中国石油化工股份有限公司胜利油田分公司勘探开发研究院页岩油开发室副研究员,主要从事页岩油开发地质研究工作。Email:382938098@qq.com

shale with low sedimentation rate, high evolution degree and frequency interbedding. (3) The thin interbedded calcareous-argillaceous pair structure is a high-quality laminated structure of carbonate-rich shale in Jiyang depression. The better the lamina density and lateral continuity, the more developed the multi-scale and multi-type pore network, and the better the reservoir quality. The laminated structure plays a role as the "high-speed channel" in controlling reservoir quality. The organic-rich continuous laminated shale is the optimal development target for shale oil in Jiyang depression, which provides the geological theoretical basis for optimization of sweet spots and golden development targets of shale oil at present.

Key words: Jiyang depression; shale lamina; connectivity; pore-fracture pattern; bedding fracture; reservoir quality

引用:倪良田,杜玉山,蒋龙,孙红霞,程紫燕,任敏华,孙宁,杨依庆,彭先国. 济阳拗陷富碳酸盐页岩纹层结构的差异性及其对储层品质的影响——以东营凹陷沙河街组页岩为例[J]. 石油学报, 2024, 45(11): 1621-1637.

Cite: NI Liangtian, DU Yushan, JIANG Long, SUN Hongxia, CHENG Ziyuan, REN Minhua, SUN Ning, YANG Yiqing, PENG Xian-guo. Difference in laminated structure of carbonate-rich shale and its effects on reservoir quality in Jiyang depression: a case study of Shahejie Formation shale in Dongying sag[J]. Acta Petrolei Sinica, 2024, 45(11): 1621-1637.

济阳拗陷页岩沉积厚度大、分布面积广,多洼陷、多层位均取得页岩油产能突破^[1-2],展现出良好的勘探前景,初步实现了页岩油革命的良好开端。2022年,中国石油对外依存度高达70%^[3],远超50%的安全警戒线。把能源安全的主动权掌握在自己手中是当今国情下的重中之重,页岩油是解决中国能源紧张的压舱石,济阳拗陷页岩油是保障胜利油田油气当量增长的现实接替阵地,加快页岩油勘探开发是重要能源接替领域^[4-5]。富有机质纹层状页岩作为基质型页岩油的有利岩相类型,具有含油性好、物性高、渗透率高、可压性好的优质页岩品质的“四性”特点。勘探开发实践表明,富有机质纹层状页岩岩相是济阳拗陷页岩油产油井的主要贡献段^[6],各洼陷页岩油水平井开发目标也多以富有机质纹层状页岩发育中段为开发“甜点”,多口水平井实现了累产超过 1×10^4 t,峰值产油量超过100 t/d,开辟了济阳拗陷页岩油勘探开发的新篇章^[1-2]。

纹层是沉积物中肉眼可见的最小或最薄的原始沉积层,成分和结构较为均一,岩心和岩石薄片观察结果显示,其厚度一般为几百微米到几毫米。早期的研究^[7]认为纹层为湖泊季节性沉积,具有年代指示意义^[8-9]。中国早期的纹层研究集中在湖泊纹层的沉积机理及年代学方面^[10-14],沉积物纹层提供的高精度年代学标尺对分析事件型沉积、古地磁重建、气候变化、太阳活动周期等具有重要意义^[15-18]。随着细粒沉积岩的研究热度及非常规油气在石油增储上产中地位的提高,页岩纹层结构研究越来越受到重视,不同学者在纹层类型划分、内部结构微观特征、成因、差异性以及纹层对页岩油“甜点”影响等方面做了大量研究^[19-24]。济阳拗陷的页岩研究多集中在沉积环境、岩相类型及展布特征^[25-30]、孔缝类型、孔隙结构二维定性或定量表征^[31]等方面。灰质-泥质纹层结构是济阳拗陷页岩的特色纹层结构类型。不同纹层及纹层

组合中孔隙结构的差异,以及纹层状页岩储集物性的定性定量表征,特别是不同纹层框架下的孔缝组合模式等亟待研究。

笔者以渤海湾盆地济阳拗陷东营凹陷沙河街组页岩为研究对象,基于电子显微镜、扫描电镜、场发射扫描电镜(FESEM)、核磁共振(NMR)以及X射线衍射(XRD)等技术开展了多方法、多尺度的观察与测试,对济阳拗陷页岩的纹层类型进行了划分,刻画了不同纹层的结构、组分及组合,定性、定量分析了不同纹层结构组合类型的孔缝发育特征,特别是层理缝对济阳拗陷纹层状页岩储集性和渗透性的影响,建立了不同纹层岩相的孔缝组合模式,分析了济阳拗陷页岩纹层发育的差异及纹层对页岩储层品质的影响。研究对济阳拗陷优质页岩“甜点”评价及规模开发具有重要的借鉴意义。

1 济阳页岩纹层类型及垂向纹层组合差异性特征

1.1 纹层结构差异性

东营凹陷位于济阳拗陷东南部,发育古近系沙河街组四段(沙四段)上亚段(包括纯上次亚段和纯下次亚段)和沙河街组三段(沙三段)下亚段2套页岩油层系,埋藏深度在3000~5500 m,是目前胜利油田页岩油开发的主力区^[2]。高碳酸盐组分含量是东营凹陷页岩的主要岩性特征之一。XRD分析表明,碳酸盐组分含量多集中在40%~70%。由于页岩沉积区远离物源,其长英质矿物含量低(一般小于30%),颗粒粒径小(一般小于30 μm,为泥级颗粒)。

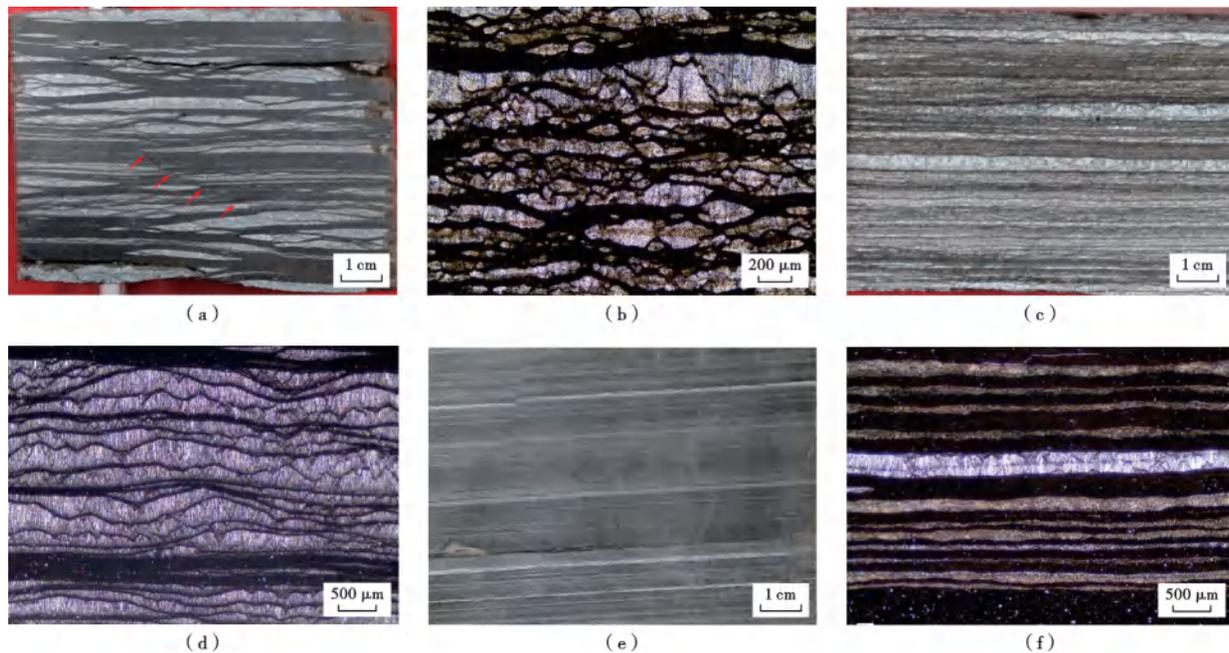
济阳拗陷的页岩层系广泛发育由多尺度、多类型灰质纹层与泥质纹层互层构成的“层偶”结构,可为分析岩石学特征提供基础信息。纹层类型的多样性是造成页岩储层强非均质性,进而影响页岩油储层品质的重要因素。笔者根据纹层在矿物组分、结构、产状、形

态等方面的差异,将济阳拗陷页岩的纹层类型划分为灰质纹层、泥质纹层和混积纹层 3 大类。灰质纹层可细分为亮晶灰质纹层(包括断续亮晶灰质纹层和连续亮晶灰质纹层 2 种类型)和隐晶灰质纹层(包括连续隐晶灰质纹层和断续隐晶灰质纹层 2 种类型);泥质纹层可分为富有机质泥质纹层[其总有机碳(TOC)含量 $>2\%$]和贫有机质泥质纹层(TOC $<2\%$) 2 种类型;混积纹层发育于靠物源陡坡带,其组分以长英质矿物为主,碳酸盐矿物含量一般小于 30%。以下重点分析灰质纹层和泥质纹层。

1.1.1 灰质纹层

亮晶灰质纹层与隐晶灰质纹层的组分以碳酸盐矿物颗粒为主,二者最大的差别在于亮晶灰质纹层中的方解石由重结晶作用形成^[32]。亮晶灰质纹层仅在济阳拗陷页岩层段局部层位发育。XRD 和氩离子抛光及场发射扫描电镜(AIP-FESEM)分析表明,亮晶灰质

纹层中的方解石含量更高,且 95% 以上的矿物颗粒为晶型较好的方解石,因此在肉眼或显微镜下具有明亮的光学特征。断续亮晶灰质纹层中的方解石呈短柱状[图 1(a)、图 1(b)]、粒径大、粗晶,粒径一般大于 $100\ \mu\text{m}$,多呈透镜状顺层分布,透镜体大小不一,厚度在 $1\sim 5\ \text{mm}$,具有多期垂向生长的特征[图 1(a)]。连续亮晶灰质纹层中,方解石的粒径范围大,除粗晶外[图 1(c)、图 1(d)],同时发育微晶—中晶[图 1(e)、图 1(f)],显微镜下多呈晶粒状[图 1(f)],粒径多在 $4\sim 100\ \mu\text{m}$ 。连续亮晶灰质纹层的厚度均匀,厚度在 $0.5\sim 2.0\ \text{mm}$,横向连续性好,镜下可见多期纹层叠置,纹层与富有机质泥质纹层界面清晰,中间被波浪状、锯齿状中心线分割。连续微晶—中晶灰质纹层在沙四段上亚段纯上次亚段 4 层组尤为发育。亮晶纹层发育段具有明显的高有机质含量(颜色更深)和高含油性(油味明显)特征。



(a) 断续亮晶灰质纹层,灰质纹层呈透镜状断续顺层分布,透镜体厚度在 $1\sim 5\ \text{mm}$,长宽比为 $8:1$ 到 $15:1$,发育高角度微断层(红色箭头),N55-X2 井 3509.40 m,岩心;(b) 断续亮晶灰质纹层,透镜状粗晶体与富有机质泥质纹层界面清晰,透镜体中可见垂向节理结构,表示方解石沿层面垂向上生长过程,N55-X2 井 3509.40 m,正交偏光;(c) 连续亮晶灰质纹层,灰质纹层厚度均匀,主要为 $1\sim 2\ \text{mm}$,横向连续性强,N55-X2 井 3765.30 m,岩心;(d) 连续亮晶灰质纹层,粗晶方解石显多期生长特征,纹层内一般发育多个中间面,呈波浪状—锯齿状,宽 $1\sim 2\ \mu\text{m}$,显示不同的纹层生长期次特征,N55-X2 井 3765.30 m,正交偏光;(e) 连续亮晶灰质纹层,纹层厚度薄,横向连续性好,岩心上不显晶体结构,N55-X2 井 3767.20 m,岩心;(f) 连续亮晶灰质纹层,灰质纹层呈晶粒结构,粒径范围大,微晶—中晶,N55-X2 井 3767.20 m,正交偏光。

图 1 济阳拗陷亮晶灰质纹层页岩的岩心及岩石薄片特征

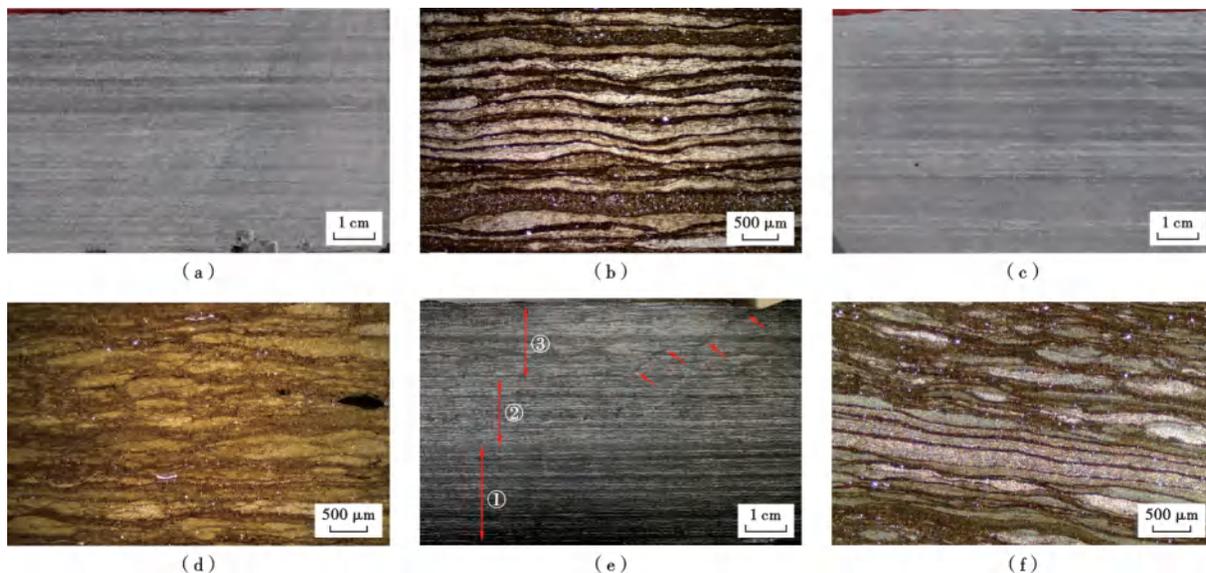
Fig. 1 Core and thin section characteristics of sparry calcareous laminated shale in Jiyang depression

隐晶灰质纹层在济阳拗陷页岩中的发育规模最大,是咸化湖盆中碳酸盐矿物的主要赋存形式,其中的隐晶方解石颗粒是藻类勃发引起的季节性碳酸盐生物化学沉积^[26],以泥晶方解石颗粒为主,混杂少量同沉

积黏土矿物,在透射光下呈灰白色。连续隐晶灰质纹层的厚度多小于 $1\ \text{mm}$,介于 $100\sim 400\ \mu\text{m}$,与富有机质泥质纹层的界面表现为清晰—渐变式接触[图 2(a)、图 2(b)];断续隐晶灰质纹层呈微透镜状[图 2(c)、

图 2(d)], 透镜体长 200~3 000 μm , 厚 200~800 μm , 顺层排列, 与泥质纹层的界面清晰, 呈渐变式接触。连续隐晶灰质纹层与断续隐晶灰质纹层在局部层段可共生[图 2(e)、图 2(f)]。在图 2(e)中, 由底到顶的特征依次表现为: 层①中, 灰质纹层呈连续脉状, 纹层连续, 厚度不均匀(0.1~0.5 mm), 而泥质纹层较厚(0.1~1.0 mm), 总体表现为“泥多灰少”; 层②中, 灰质纹层呈

连续微波状, 纹层厚度较均匀(从<0.1 mm 至 0.5 mm), 而泥质纹层较薄(0.1~0.3 mm), 总体表现为“灰多泥少”; 层③中, 灰质纹层呈断续—连续透镜状, 透镜体的长宽比约为 5:1, 总体表现为“灰多泥少”。不同纹层特征表征了不同的水动力条件: 从层①到层③, 反映水体深度由深变浅, 呈现出由垂向加积的静水环境变化到微动荡的不稳定水体环境。



(a)连续隐晶灰质纹层, 纹层呈连续顺层分布, 厚度多小于 1 mm, 纹层发育的密集程度在剖面上略有差异, N55-X4 井 3 844.80 m, 岩心; (b)连续隐晶灰质纹层, 灰质纹层与富有机质泥质纹层界面清晰, 灰质纹层面的顶、底界面呈波浪形或锯齿状, 灰质纹层内夹顺层分布的泥质条带, N55-X4 井 3 844.80 m, 单偏光; (c)断续隐晶灰质纹层, 灰质纹层不连续, 呈透镜状断续顺层分布, N55-X4 井 3 805.40 m, 岩心; (d)断续隐晶灰质纹层, 灰质纹层与泥质纹层界面较清晰, 灰质透镜体呈细小晶粒集合体, 泥质纹层中见生物碎屑、有机质团块, 黄铁矿集合体等, N55-X4 井 3 805.40 m, 单偏光; (e)多类型隐晶灰质纹层叠置, 纵向上根据纹层的变化特征可分为 3 期(双向箭头), 发育穿层生/排烃缝(单向箭头), N55-X4 井 3 816.40 m, 岩心; (f)多类型纹层, 灰质纹层与泥质纹层界面清晰, 灰质纹层中由细小碳酸盐晶体构成, N55-X4 井 3 844.80 m, 正交偏光。

图 2 济阳拗陷隐晶灰质纹层页岩的岩心及岩石薄片特征

Fig. 2 Core and thin section characteristics of cryptocrystalline calcareous laminated shale in Jiyang depression

1.1.2 泥质纹层

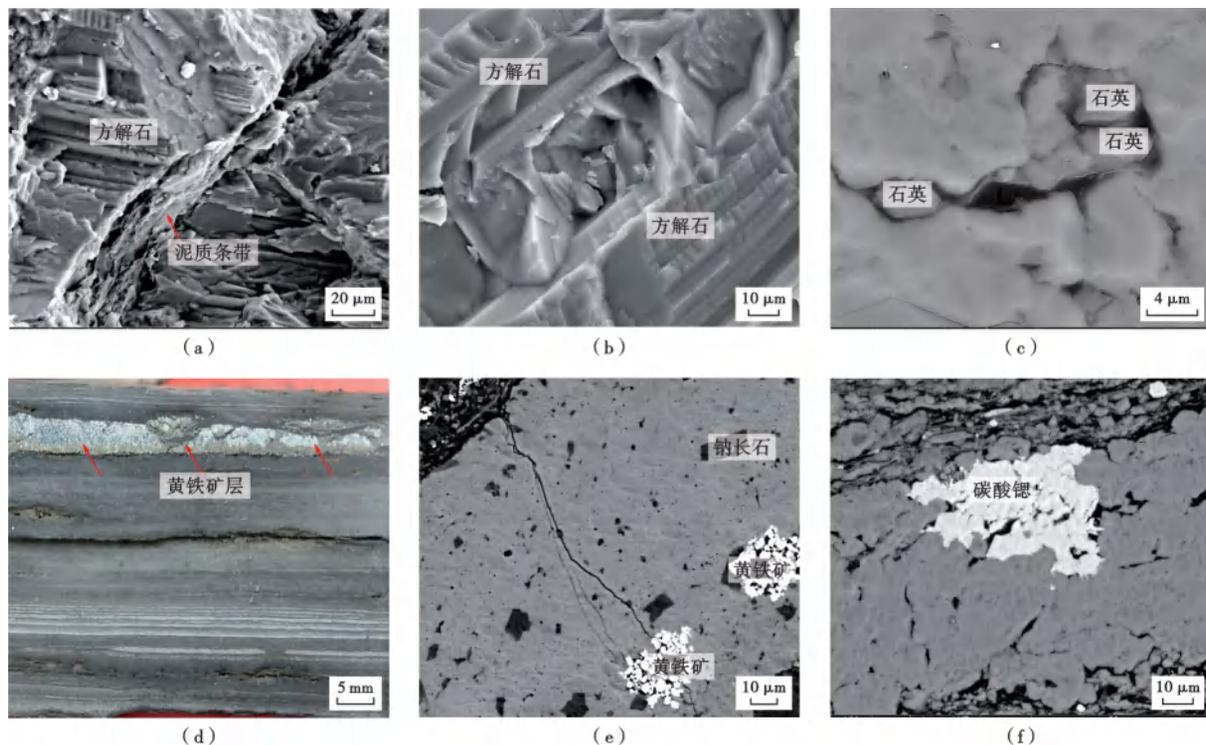
泥质纹层多由黏土矿物、长英质碎屑颗粒和藻类碎片组成, 为絮凝作用沉积^[26]。富有机质泥质纹层多与亮晶灰质纹层(图 1)、连续隐晶灰质纹层(图 2)呈频繁互层, 这种结构在水动力较弱、覆水程度较深的还原条件下可得到有效保存。结合单纹层的 XRD 和 AIP-FESEM 分析, 泥质纹层具有高黏土矿物含量、低碎屑矿物含量的特征[图 2(b)], 碎屑矿物以石英为主, 颗粒粒度小, 粒径多为 2~10 μm , 属于泥级颗粒, 难以通过肉眼和普通显微镜与黏土矿物区分。贫有机质泥质纹层多发育在外源影响大的斜坡带, 由于沉积速度快, 呈现出长英质碎屑含量高, 有机质含量低的特征[图 2(d)]。

1.2 纹层矿物组分的差异性

不同纹层类型具有明显的矿物组分差异, 纹层中矿物的类型、大小及组合特征是影响储集性的重要因

素。泥质纹层作为有机质的主要载体, 是“生油”的基础, 其有机地球化学参数是确定是否有效生烃的重要指标。笔者基于岩石薄片观察、AIP-FESEM 分析、微钻取样、TOC 和岩石热解测试等方法, 厘清了不同纹层的矿物组分及地球化学参数特征。

亮晶灰质纹层的矿物组分由重结晶方解石构成(图 3), 多期结晶的方解石纹层中常夹杂残余泥质层或条带[图 3(a)], 方解石具有明显的定向生长特征[图 3(b)]。纹层中可见少量其他矿物, 一般为共生矿物或交代矿物, 如在粗晶方解石的晶间缝(重结晶方解石晶体间残留的狭长孔隙^[33])中多见自生石英和有机质[图 3(c)], 灰质纹层中常见黄铁矿层或黄铁矿集合体[图 3(d)、图 3(e)]以及菱锆矿集合体[图 3(f)]。亮晶灰质纹层中, 交代作用形成的黄铁矿多形成于成岩期^[32], 黄铁矿作为脆性矿物对储集空间具有保护作用, 同时对储层压裂改造具有增脆作用。



(a)亮晶灰质纹层中的泥质条带可与泥质纹层连接或充填于晶间缝中;(b)亮晶灰质纹层中方解石具有明显定向生长特征,结晶方向相同;(c)晶间缝中常见自生石英,石英晶体具有柱状晶型,粒径在 $2\sim 3\mu\text{m}$,同时晶间缝中常见有机质充填;(d)黄铁矿发育在粗晶方解石与泥质纹层间,部分黄铁矿充填于晶间缝中;(e)亮晶灰质纹层内(靠纹层边缘)团块状黄铁矿,在纹层的内部暗色部分为自生钠长石;(f)亮晶灰质纹层边缘交代作用形成的碳酸锶。

图 3 济阳拗陷亮晶灰质纹层页岩的内部结构(NX55 井 3783.70 m)

Fig. 3 Internal fabrics of sparry calcareous laminated shale in Jiyang depression

隐晶灰质纹层中的矿物组分多为泥晶方解石[图 4(a)—图 4(c)]。灰质、泥质纹层的界面清晰。灰质纹层顶、底部的矿物组分差异明显,顶部方解石含量多于黏土矿物,中下部方解石颗粒整体上排列紧密,成分单一,粒径多在 $1\sim 4\mu\text{m}$,呈不规则排列[图 4(a)],晶间孔缝发育,晶间缝中见油迹[图 4(b)]。大视域面孔率图像识别分析显示,晶间孔缝占总面孔的 $60\%\sim 85\%$,晶间孔中多充填黏土矿物[图 4(c)],黏土矿物呈片状结构,片间孔发育。灰质纹层中黄铁矿多呈草莓状,粒径为 $2\sim 5\mu\text{m}$ 。

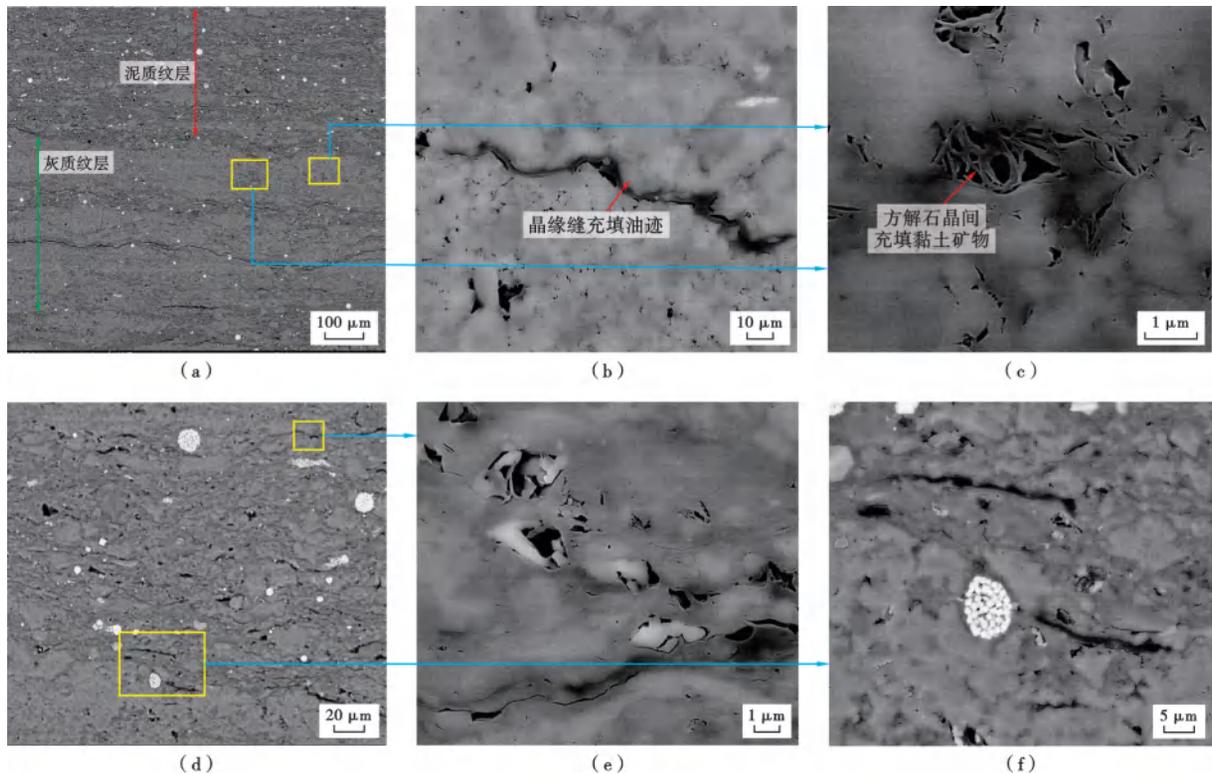
泥质纹层的矿物组分复杂[图 4(d)],是有机质的主要载体,TOC 含量较高,介于 $2\%\sim 6\%$ 。结合单纹层的 XRD 和 AIP-FESEM 分析,泥质纹层中的无机矿物以黏土矿物和长英质碎屑为主[图 4(e)],占比为 $75\%\sim 90\%$ 。黏土矿物呈片状结构,以伊利石和伊/蒙混层为主。在牛庄地区,长英质矿物颗粒多为泥级颗粒[图 4(e)],粒径小,粒度在 $1\sim 10\mu\text{m}$,呈散点状分散在黏土矿物层中,长英质颗粒与黏土矿物为同期沉积。泥质纹层中局部可见草莓状黄铁矿富集[图 4(d)、图 4(f)],并常见有机质条带呈顺层分布[图 4(e)]。济

阳拗陷民丰洼陷为北断南超的箕状断陷,其陡坡深洼带受物源影响大,泥质纹层多为混积层,普遍见大量长英质矿物碎屑,粒径多为 $30\sim 60\mu\text{m}$,在靠近砂砾岩体外缘可见不同粒度、不同尺度的砂质条带。

1.3 纹层组合特征及垂向差异性

不同岩相具有不同的层偶结构特征,纹层组合的差异影响源-储匹配关系,决定了页岩岩相的“生烃-成储-成藏”特征。纹层的组合主要有 5 种类型:①连续亮晶灰质纹层+富有机质纹层[图 1(c)、图 1(b)];②断续亮晶灰质纹层+富有机质泥质纹层[图 1(a)、图 1(b)];③连续隐晶灰质纹层+富有机质泥质纹层[图 2(a)、图 2(b)];④断续隐晶灰质纹层+富有机质泥质纹层[图 2(c)、图 2(d)];⑤断续隐晶灰质纹层+贫有机质泥质纹层。

济阳拗陷页岩纹层的组合类型在垂向上差异显著(图 5)。以牛庄洼陷为例,沙四段上亚段纯下次亚段以含膏泥岩为主,其底部为膏岩和盐岩,上部发育隐晶灰质纹层+富有机质泥质纹层组合,夹连续亮晶灰质纹层+富有机质泥质纹层组合。该次亚段沉积期气候炎热干旱,物源供给少,蒸发量大,以蒸发盐类沉积



(a) 隐晶灰质纹层与泥质纹层互层, 灰质纹层波状起伏, 与泥质纹层突变接触, 草莓状黄铁矿在灰质纹层中极少发育, 多见于泥质纹层中; (b) 灰质纹层多由不规则泥晶方解石构成, 晶间缝中常见有油迹充填; (c) 泥晶方解石间常见有黏土矿物充填, 黏土矿物发育片间孔; (d) 泥质纹层由黏土矿物和泥级长英质碎屑矿物构成, 长英质颗粒的粒径小于 $10\ \mu\text{m}$, 草莓状黄铁矿局部富集; (e) 黏土矿物层中见有机质条带; (f) 泥质纹层中方解石晶体, 粒径约为 $5\ \mu\text{m}$, 草莓状黄铁矿直径约为 $10\ \mu\text{m}$ 。

图4 济阳拗陷页岩中隐晶灰质纹层与泥质纹层的内部结构(N55-X4井3800.20 m)

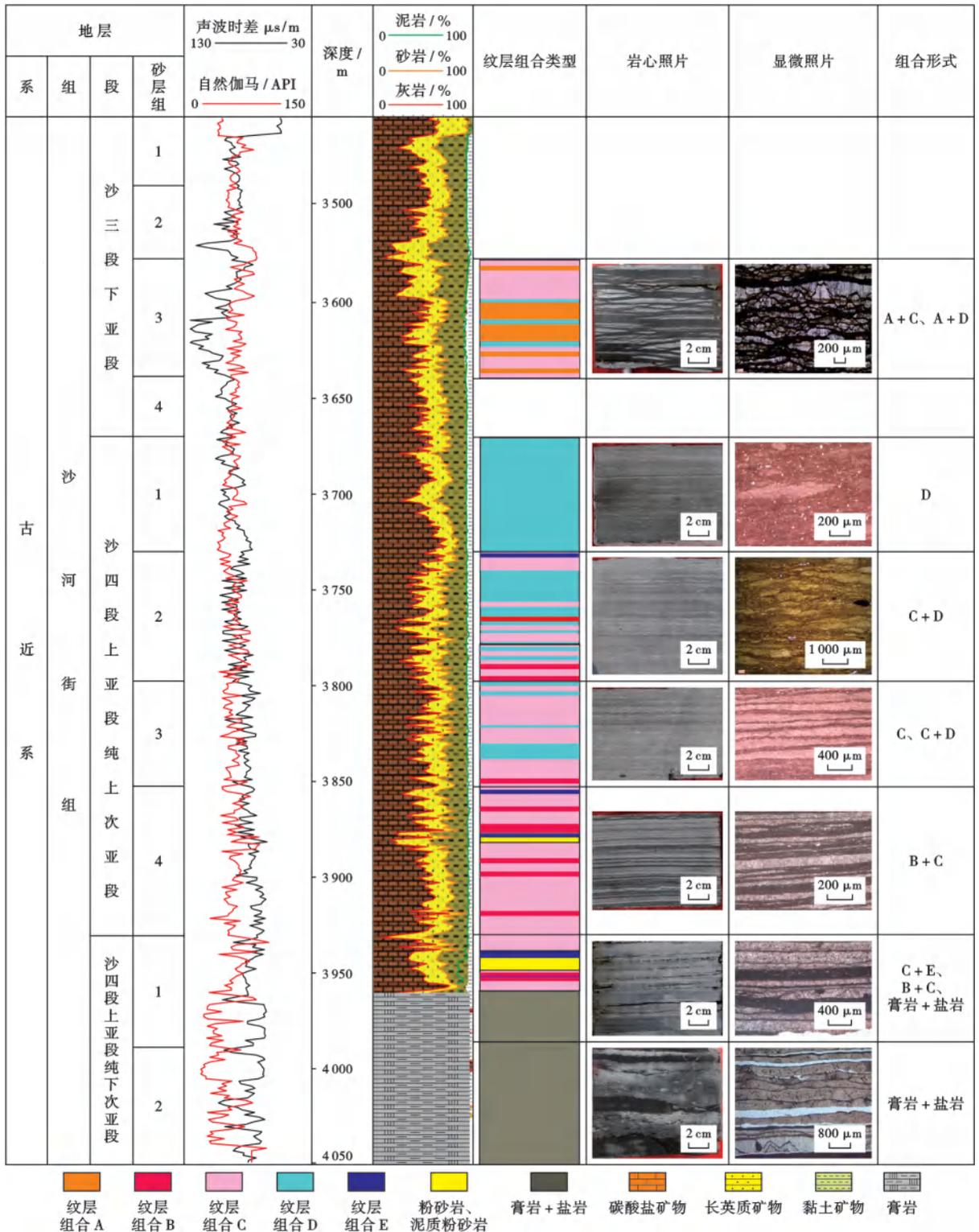
Fig. 4 Internal fabrics of cryptocrystalline calcareous laminae and argillaceous laminae in shale of Jiyang depression

为主; 沉积末期, 随着降水量增加, 水体盐度降低, 沉积了隐晶灰质纹层, 并在突发洪水期形成浊积砂岩和断续隐晶灰质纹层+贫有机质泥质纹层组合。沙四段上亚段纯上次亚段1层组以连续亮晶灰质纹层+富有机质泥质纹层组合和连续隐晶灰质纹层+富有机质泥质纹层组合为主, 该层组为亮晶灰质纹层最集中发育段, 并伴有多期浊积沉积; 2层组以隐晶灰质纹层+富有机质泥质纹层组合为主, 局部夹断续隐晶灰质纹层+富有机质泥质纹层组合; 3层组以连续亮晶灰质纹层+富有机质泥质纹层组合、连续隐晶灰质纹层+富有机质泥质纹层组合和断续隐晶灰质纹层+富有机质泥质纹层组合为主; 4层组以断续隐晶灰质纹层+富有机质泥质纹层组合为主, 沙四段上亚段纯上次亚段沉积期气候湿润, 湖水深度大, 水体盐度明显降低, 物源供给较强, 沉积物的沉积速率较快, 泥晶方解石纹层的成层性差。沙三段下亚段3层组以断续亮晶灰质纹层+富有机质泥质纹层组合和断续隐晶灰质纹层+富有机质泥质纹层组合为主, 该沉积期气候出现短期干旱, 湖水深度降低, 沉积物的沉积速率降低。

2 储集特征的差异性

2.1 不同纹层类型的孔缝结构特征

不同纹层类型中, 矿物颗粒的大小及赋存形式直接影响着孔隙类型及孔隙大小, 进而影响页岩的孔隙结构及物性特征。纹层组合的差异也是影响渗透性的主要因素^[34-35]。在济阳拗陷页岩的不同纹层类型中, 层理缝、成岩缝、超压缝等微裂缝的发育特征不同。页岩的微缝体系是影响渗透率的重要因素, 是连接水平井压裂体积缝网, 形成基质孔-微缝-体积缝网和页岩油渗流通道的重要桥梁。亮晶灰质纹层中发育多尺度微缝, 其纹层内孔缝网络的连通性好; 富有机质泥质纹层中的有机质可生烃, 轻烃组分直接排烃可进入到邻近灰质纹层的孔缝网络中。亮晶灰质纹层中发育的残余富有机质泥质纹层会使得亮晶灰质纹层本身具有一定的自生自储能力。亮晶灰质纹层中, 当亮晶方解石呈对向生长时, 残余的水平晶间缝部分会被富有机质黏土矿物充填[图6(a)中红色箭头所示为半充填缝, 绿色箭头所示为未充填缝], 残余晶间缝的缝宽为 $0.5\sim 2.0\ \mu\text{m}$ [图6(b)]; 当方解



注: A—断续亮晶灰质纹层+富有机质泥质纹层; B—连续亮晶灰质纹层+富有机质泥质纹层; C—连续隐晶灰质纹层+富有机质泥质纹层; D—断续隐晶灰质纹层+富有机质泥质纹层; E—断续隐晶灰质纹层+贫有机质泥质纹层。

图 5 济阳坳陷牛庄地区沙河街组页岩纹层组合的垂向差异性

Fig. 5 Vertical differences of lamina assemblages in Shahejie Formation shale in Niuzhuang area of Jiyang depression

石呈同向生长时, 晶体间发育晶间微缝[图 6(c)紫色箭头所示], 其缝宽小, 多在 50~200 nm, 未充填的晶间孔[图 6(d)]的孔径大(>100 nm)中可见游离油。亮晶灰质纹层中的方解石均为重结晶颗粒, 组分单一,

晶体颗粒大, 晶间孔缝发育。微晶方解石纹层厚度小, 方解石颗粒小, 主要发育晶间孔[图 6(e)], 孔隙大小为 0.1~1.5 μm 且连通性较好。随着方解石重结晶程度增加, 颗粒间呈紧密排列, 方解石纹层内部难以被有

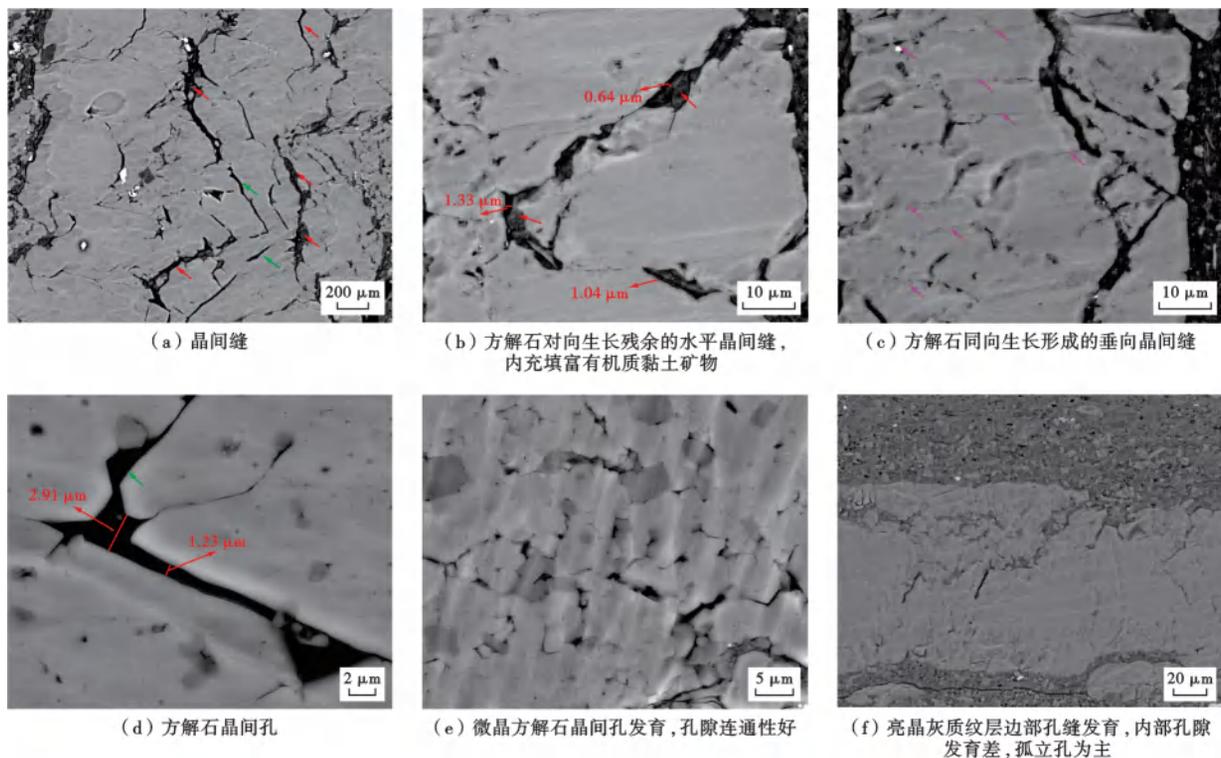


图6 济阳拗陷页岩亮晶灰质纹层的孔缝结构(N55-X1井3784.60m)

Fig. 6 Pore and fracture structures of sparry calcareous laminae in shale of Jiyang depression

机酸溶蚀[图6(f)],从而导致整体的孔缝发育程度变差,连通性变差。

灰质纹层与泥质纹层在一定的厚度比例下可构成优质的生-储配置。基于AIP-FESEM分析,当灰质纹层与泥质纹层的厚度比为(2:1)~(1:3)且纹层厚度均为毫米级时,源-储配置关系较佳。泥质纹层可提供充足的生烃母质,其TOC含量一般大于3%,是有效的生烃单元;灰质纹层中发育连通孔缝,是有效的储集单元。若泥质纹层过厚,灰质纹层过薄,则生烃母质充足,但有效储集空间少,更多的烃类会滞留在泥质纹层中,导致可动性降低;若灰质纹层过厚,泥质纹层过薄,则有效储集空间减少,孔缝的连通性变差,而薄层的泥质纹层不能提供足够的生烃量。

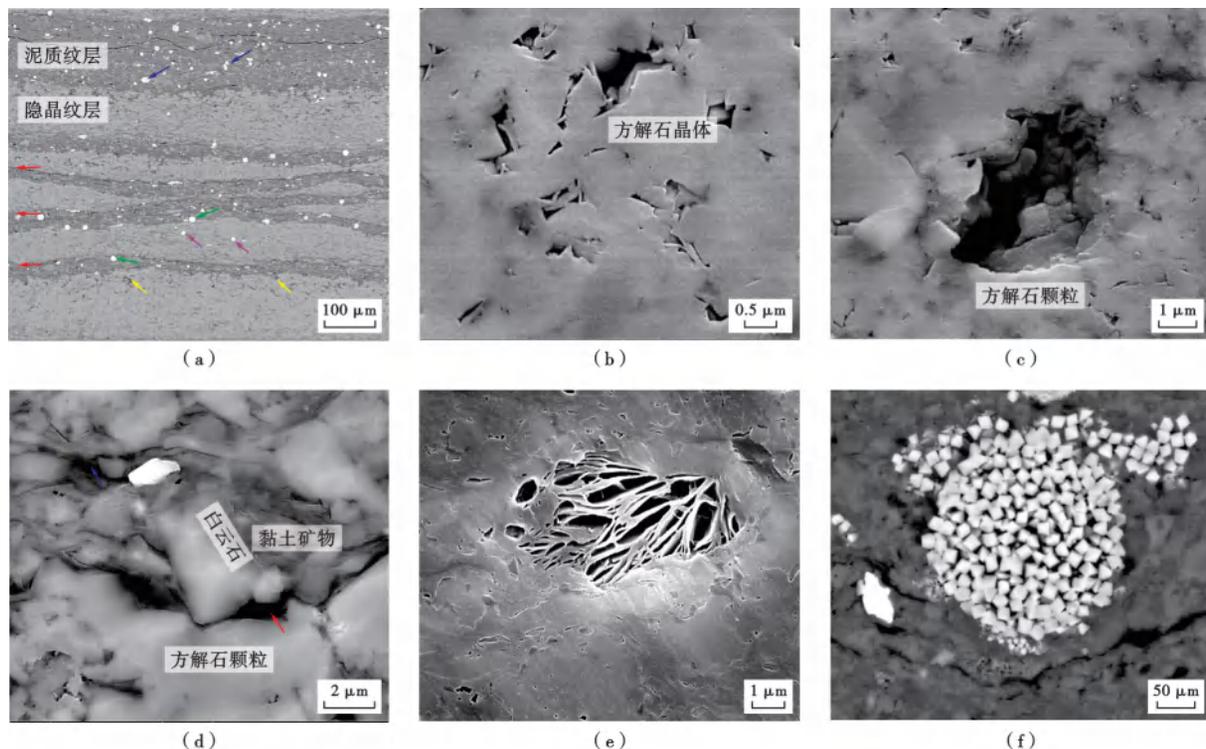
隐晶灰质纹层组合也有相同的源-储配置规律。隐晶灰质纹层的矿物组分多为1~4 μm的方解石[图7(a)],孔隙类型多为晶间孔[图7(b)],孔径大小为20 nm~0.5 μm,纹层顶部多为混积黏土矿物[图7(a)黄色箭头处],发育溶蚀孔隙[图7(c)],孔径大(可达2 μm)、连通性好。灰质、泥质纹层底界面处的矿物组分差异明显,多发育层理缝[图7(a)红色箭头处]。

泥质纹层的矿物组分复杂,粒间孔发育,包括在长英质矿物颗粒间[图7(d)红色箭头处]和黏土矿物颗粒间[图7(d)蓝色箭头处],粒间孔的孔径为10 nm~

2 μm,黏土矿物颗粒内多发育黏土矿物片间孔,孔径一般较小(2~300 nm)。黄铁矿在济阳拗陷页岩中含量较多,多呈集合体形式局部富集,也可见条带状,一般发育在泥质纹层中[图7(a)蓝色箭头处],部分发育于纹层界面处[图7(a)绿色箭头处],少量发育在灰质纹层中[图7(a)紫色箭头处]。草莓状黄铁矿中发育晶间孔,孔径为2~500 nm,一般饱含油。泥质纹层中也可见碳酸盐颗粒(以方解石为主,部分为白云石),多发育方解石粒内溶蚀孔。泥质纹层中孔隙类型多,但多以中孔—小孔为主,连通性较差。

济阳拗陷页岩中微裂缝发育是页岩油富集高产的关键,多尺度、多类型裂缝是页岩油气重要的储集空间,复杂原始孔缝网络与压裂缝网的空间耦合可提高页岩基质的渗流能力。微缝体系中富含页岩油轻质组分^[4],其中,大孔中的烃类在微裂缝短距离连通下能快速流动到渗流通道中,从而形成页岩油水平井在体积压裂后见油早(2~10 d)、初产高的开发特点。

济阳拗陷作为典型的断陷湖盆,其构造缝发育,同时发育超压缝、层理缝、晶间缝和粒缘缝4种非构造微缝类型。多期构造活动形成了多类型、多角度的构造缝,常见张裂缝[图8(a)]和剪切缝[图8(b)],缝宽一般大于1 mm,多被方解石半充填,缝面上油迹明显[图8(c)]。超压缝在隐晶灰质纹层岩相中常见,呈高角度蛇曲穿



(a) 隐晶灰质纹层, 灰质、泥质纹层的界面清晰, 层理缝发育, 黄铁矿多发育在泥质纹层中; (b) 灰质纹层中的方解石晶间孔, 棱角状, 孔径为 $20\text{ nm} \sim 0.5\text{ }\mu\text{m}$; (c) 灰质纹层中方解石颗粒粒间溶孔, 孔隙大, 连通性好, 孔径为 $100\text{ nm} \sim 2\text{ }\mu\text{m}$; (d) 泥质纹层中多类型粒间孔, 孔径为 $10\text{ nm} \sim 2\text{ }\mu\text{m}$; (e) 泥质纹层中的黏土矿物片间孔, 孔径一般较小, 在 $2 \sim 300\text{ nm}$; (f) 草莓状黄铁矿晶间孔, 孔径为 $2 \sim 500\text{ nm}$ 。

图 7 济阳拗陷页岩隐晶灰质纹层与泥质纹层的孔缝结构 (N55-X2 井 3 507.40 m)

Fig. 7 Pore and fracture structures of cryptocrystalline calcareous laminae and argillaceous laminae in shale of Jiyang depression

层分布[图 8(d)], 缝宽一般大于 $0.1\text{ }\mu\text{m}$, 多被沥青质充填; 晶间缝为粗晶方解石垂向生长的晶间孔隙[图 8(e)]; 粒缘缝一般为泥质纹层中由发育在长英质大颗粒或碳酸盐矿物颗粒边缘处的黏土矿物转化收缩而形成的顺层微缝[图 8(f)]。

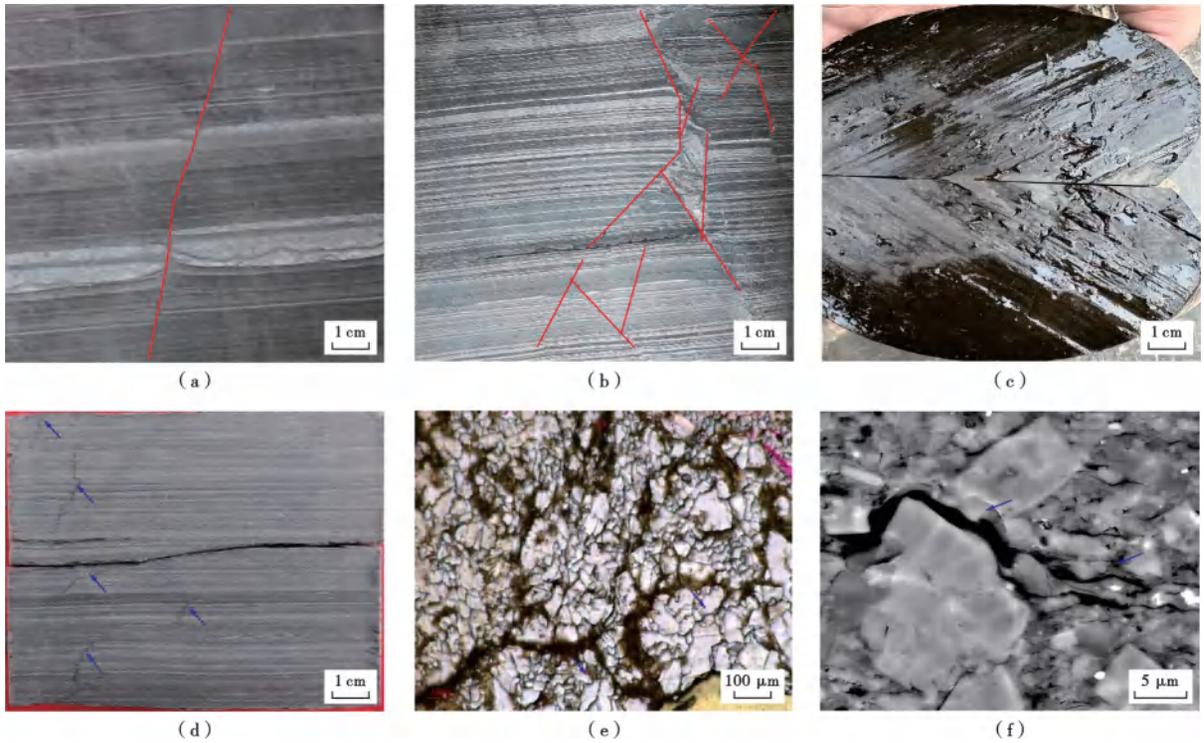
不同类型的微缝具有不同的连通作用。晶间缝和粒缘缝一般在纹层内部起到连通作用, 其中, 晶间缝可垂向连通粗晶灰质纹层内部的孔隙, 粒缘缝可横向连通泥质纹层中的微米—纳米孔隙; 构造缝和超压缝可垂向连通多纹层的孔缝系统; 层理缝在亮晶灰质纹层岩相中较常见[图 9(a)], 在隐晶灰质纹层岩相中局部发育[图 9(b)], 并且随着热演化程度、方解石重结晶程度及纹层密集程度的增加而更加发育。

作为济阳拗陷页岩中广泛发育的微缝类型, 层理缝是烃类运移的“高速通道”。泥质纹层中排出的烃类通过层理缝运移, 储集在灰质纹层的孔缝网络中。层理缝并不是简单的平面结构, 层理面中发育微凸起或沟槽结构[图 9(c)、图 9(d)], 这些刚性点可作为层理缝的开启面, 对层理缝具有支撑作用, 增加了油气的横向沟通; 此外, 沿层理缝纵向上派生的更小的微缝能

“渗透”到泥质纹层和灰质纹层中[图 9(e)], 极大地提高泥质纹层中微米—纳米孔隙的连通性, 并有效沟通灰质纹层的孔缝网络。因此, 层理缝的发育是济阳拗陷页岩形成有效生-储配置的重要桥梁。

2.2 不同纹层组合的储集特征

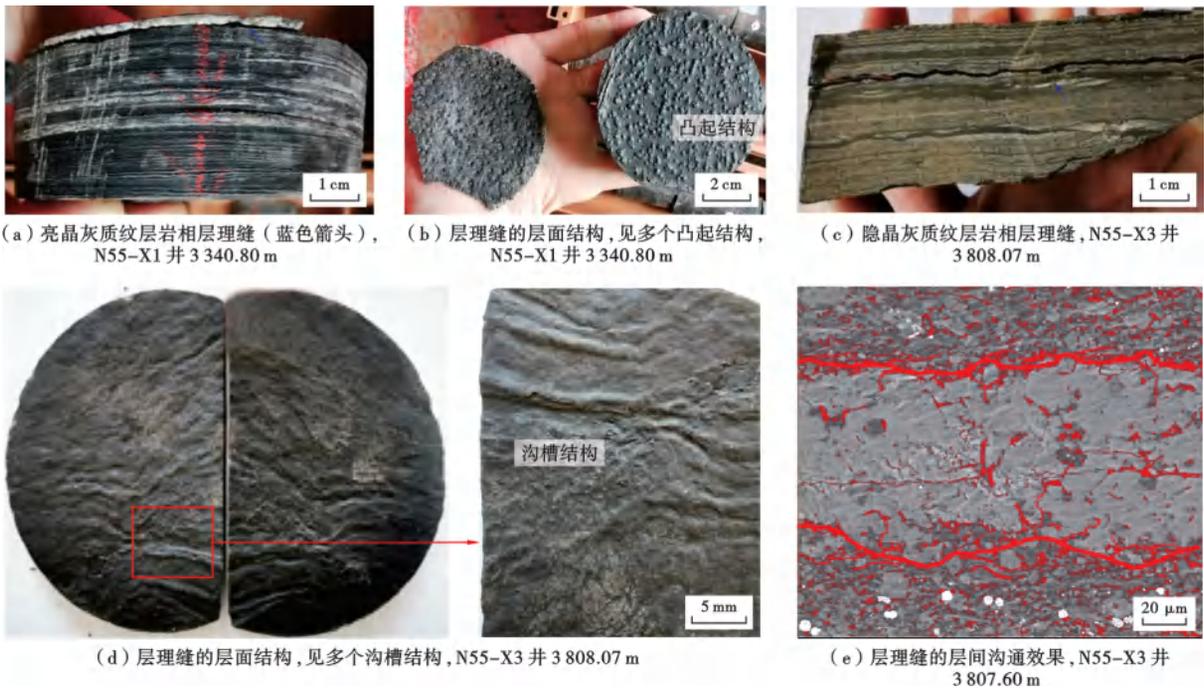
不同纹层组合的矿物组分、“层偶”结构、有机质含量、沉积成岩、生/排烃等有机-无机协同演化会影响孔隙类型、孔隙结构、层理缝发育、孔缝连通性和孔渗参数等储集特征。前人提出了针对页岩油储集空间的分类依据及标准^[36-37]。笔者根据济阳拗陷页岩孔隙结构复杂、孔径分布跨度大的特点, 为了更好地细分孔隙的分布特征, 同时考虑济阳拗陷页岩油油性稠、流动下限高的特点, 采用了微孔($<25\text{ nm}$)、小孔($25 \sim 100\text{ nm}$)、中孔($100\text{ nm} \sim 1\text{ }\mu\text{m}$)、大孔($>1\text{ }\mu\text{m}$)的孔隙孔径分类方案。在宏观的纹层组合中, 微晶—中晶灰质纹层常与粗晶灰质纹层共生, 因此统称为亮晶灰质纹层组合。对纹层的连续性进行划分, 有连续亮晶灰质纹层、断续亮晶灰质纹层、连续隐晶灰质纹层和断续隐晶灰质纹层 4 类主要页岩岩相。笔者通过核磁共振法孔隙度测试、氦气法孔隙度测试、压力降落法覆压孔隙度渗透率



(a)张裂缝,可见明显的正向错段,N55-X3井3799.10m,岩心;(b)多组共轭剪切缝,N55-X2井3805.60m,岩心;(c)裂缝面油迹明显,N55-X4井3765.20m,岩心;(d)高角度的超压缝,多在隐晶灰质纹层岩相中发育,N55-X4井3796.00m,岩心;(e)亮晶灰质纹层横向截面,见多条晶间缝,油迹充填,N55-X1井3339.30m,单偏光;(f)顺层的粒缘缝,N55-X2井3610.70m,扫描电镜。

图 8 济阳拗陷页岩中常见的微缝类型

Fig. 8 Common microfracture types of shale in Jiyang depression



(a)亮晶灰质纹层岩相层理缝(蓝色箭头), N55-X1井3340.80m

(b)层理缝的层面结构,见多个凸起结构, N55-X1井3340.80m

(c)隐晶灰质纹层岩相层理缝, N55-X3井3808.07m

(d)层理缝的层面结构,见多个沟槽结构, N55-X3井3808.07m

(e)层理缝的层间沟通效果, N55-X3井3807.60m

图 9 济阳拗陷页岩的层理缝特征

Fig. 9 Characteristics of bedding fractures in shale of Jiyang depression

测试,对页岩的储集性进行了定量表征。测试样品为牛庄洼陷沙三段下亚段和沙四段上亚段纯上次亚段页岩,样品数为 139 块。核磁共振法通过测试页岩全孔隙中的含氢流体(基质氢、水、甲烷)在外磁场的弛豫过程,反演流体含量、分布特征及孔隙大小等信息,具有无损样品、快速、准确的特点^[38]。实验测试流程如下:首先,对 2.5 cm × 2.5 cm 规格的岩心柱塞样品进行“蒸汽—冷凝—抽厘”洗油 20 d;其次,烘干后测试干岩心的核磁共振横向弛豫时间(T_2);然后在饱和油 1 d 后,测试饱和油岩心的 T_2 谱,用饱和油岩心的 T_2 谱值减去干岩心的 T_2 谱值;最后,通过氮气吸附曲线和高压压汞曲线,将 T_2 谱分布转换为孔径分布^[39],从而表征页岩孔喉的分布规律。

连续亮晶灰质纹层页岩的核磁共振图谱具有典型的“高—低”双峰特征(图 10)。饱和油曲线显示微孔和小孔的占比高,是主要的储集空间类型。在连通孔隙曲线中,双峰的幅度基本等同,孔径占比的分布差异性

小。通过分析洗油前后的核磁共振信号,该类页岩的连通孔隙占比多为 60%~70%,中孔和大孔的连通性好。连续亮晶灰质纹层页岩中发育层理缝,取样过程中有少量开裂。无开裂样品的核磁共振连通孔隙度为 4%~7%,空气渗透率为 0.4~4.5 mD,具有较低的连通孔隙度和高渗透率的特征;少许开裂样品的核磁共振连通孔隙度为 6%~11%,空气渗透率为 10~50 mD,具有较高孔隙度和较高渗透率的特征。

断续亮晶灰质纹层页岩的核磁共振图谱具有典型的“低—高”双峰特征(图 10)。洗油前后的核磁共振信号分析表明,饱和油曲线中,中孔和大孔的占比高,是主要的储集空间类型。连通孔隙曲线显示在微孔和小孔中孤立孔的占比高、连通孔少,连通孔隙以中孔和大孔为主,该类页岩的连通孔隙占比多在 20%~40%。由于粗晶方解石纹层的单层厚度大,层理间的薄弱面胶结弱,不规则层理缝发育,多数岩心柱塞样品在钻样及实验过程中均有不同程度的开裂,实验数据偏差较

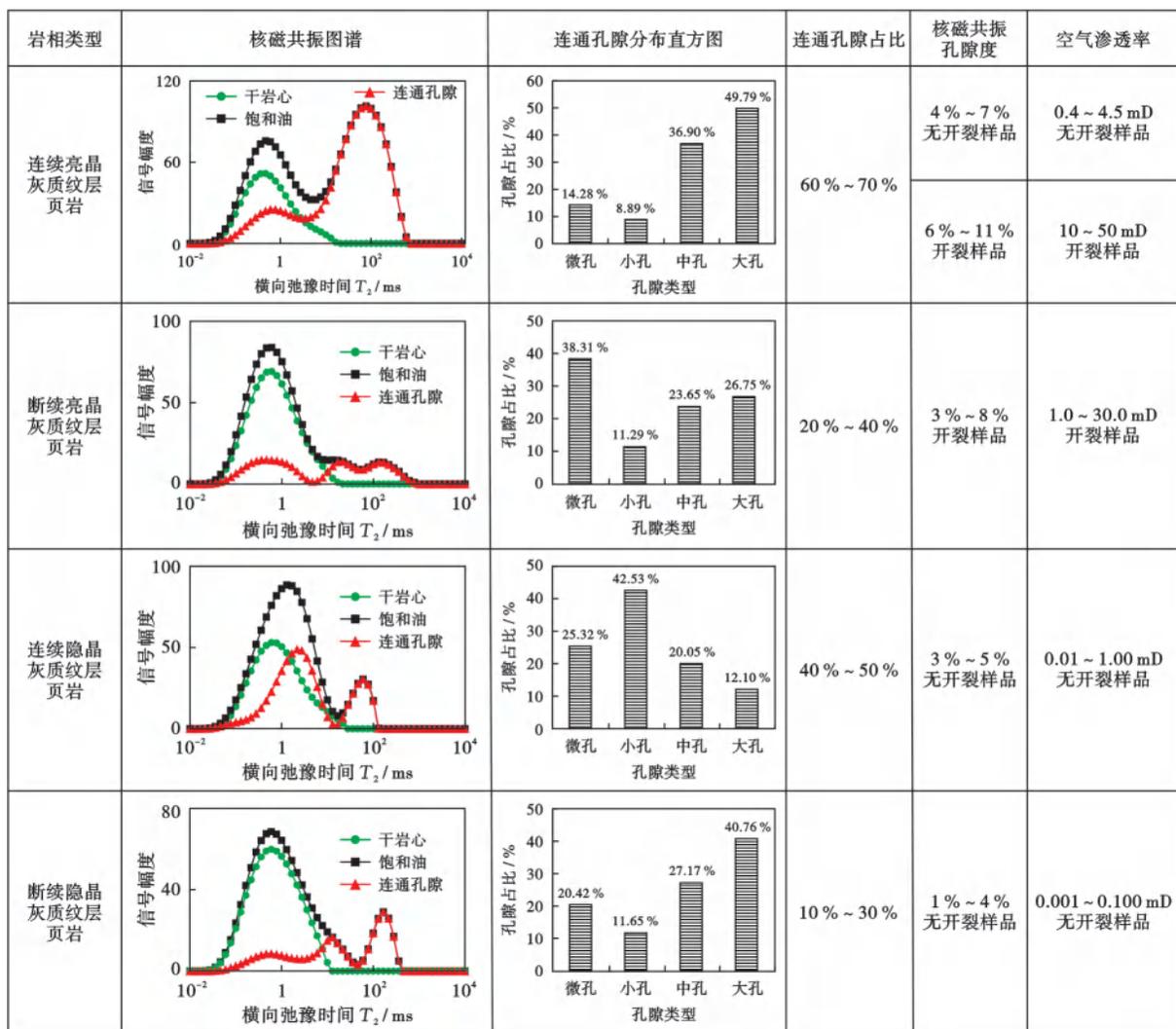


图 10 济阳坳陷不同纹层结构页岩的物性分析结果

Fig. 10 Physical property analytical results of different laminated shale in Jiyang depression

大,核磁共振的连通孔隙度为3%~8%,空气渗透率为1.0~30.0 mD,具有较高孔隙度和高渗的特征。虽然空气渗透率值并不能代表地层条件下的真实渗透率,但该类岩相层理缝发育,取心过程中层理缝的新鲜裂开面油迹明显,因此此类页岩的层理缝在地层条件下具有一定的开启性,页岩的水平渗透率高。

连续隐晶灰质纹层页岩的核磁共振图谱具有典型的“高-较低”双峰特征(图10)。洗油前后的核磁共振信号分析表明,饱和油曲线中,双峰极值差异大,显示出较高的微孔和小孔占比,是主要的储集空间类型。连通孔隙曲线中,双峰极值的差异性明显减小,连通孔隙类型仍以微孔—小孔为主。该类页岩的连通孔隙占比多在40%~50%,中孔和大孔的连通性较好,核磁共振连通孔隙度在3%~8%,空气渗透率在0.01~1.0 mD,具有低孔隙度和较高渗透率的特征。

断续隐晶灰质纹层页岩的核磁共振图谱具有典型的“高-特低”双峰特征(图10)。洗油前后的核磁共振信号分析表明,在饱和油曲线中,双峰极值的差异极大,显示出极高的微孔和小孔占比,是主要的储集空间类型。连通孔隙曲线中,双峰基本持平,处于极低的峰值区,连通孔隙类型以极少数的微孔—小孔和多数数的中孔—大孔为主。该类页岩的连通孔隙占比多为10%~30%,核磁共振连通孔隙度为1%~4%,空气渗透率为0.001~0.100 mD,具有特低孔隙度和特低渗透率的特征。

3 讨论

3.1 纹层特征是控制页岩储集性的关键因素

不同纹层组合页岩具有明显的物性差异(图11)。笔者除利用柱塞样品开展核磁共振实验测试,获得页

岩物性参数外,同时开展了柱塞样品的氮气孔隙度测试和地层压力条件下覆压渗透率测试。测试样品为东营凹陷沙三段下亚段—沙四段上亚段页岩,样品数为139块。统计结果表明,连续纹层页岩一般具有较好的连通孔隙度和覆压渗透率。连续亮晶灰质纹层页岩的连通孔隙度为6.0%~11.0%(平均为8.5%),覆压渗透率为0.05~2.00 mD(平均为1.00 mD);断续亮晶灰质纹层页岩的连通孔隙度为4.0%~7.0%(平均为5.0%),覆压渗透率为0.001~0.100 mD(平均为0.030 mD);连续隐晶灰质纹层页岩的连通孔隙度为5.0%~9.0%(平均为6.7%),覆压渗透率为0.001~1.000 mD(平均为0.200 mD);断续隐晶灰质纹层页岩的连通孔隙度为2.0%~5.0%(平均为3.6%),覆压渗透率为0.0001~0.1000 mD(平均为0.0300 mD)。纹层中的亮晶方解石由泥晶方解石重结晶形成,颗粒形态一般为晶粒状、短柱状(图6),晶体间残留的晶间孔隙大、晶间缝发育,孔缝连通性好;隐晶方解石粒径小,方解石纹层中多数为细小的泥晶方解石,同时混有充填在方解石晶体间的同沉积黏土矿物,晶间孔径较亮晶方解石小,且孔隙部分被泥质充填,从而导致连通性变差,连通孔隙度和渗透率相对低。

在断续隐晶灰质纹层页岩中,由于方解石纹层占比低、纹层连续性差,因而晶间孔占比低,孔隙连通性差。而泥质纹层中发育纳米级、微米—纳米级的黏土矿物片间孔、粒间孔等,以孤立孔隙为主,孔隙连通性差,因此连通孔隙度和渗透率最低。

连续亮晶灰质纹层页岩的单纹层厚度一般较透镜状断续亮晶灰质纹层页岩的单层厚度薄。亮晶灰质纹层页岩随成岩—生烃演化,方解石颗粒大小依次发生泥晶→微晶→中晶→粗晶转化,晶体的排列方式由粒

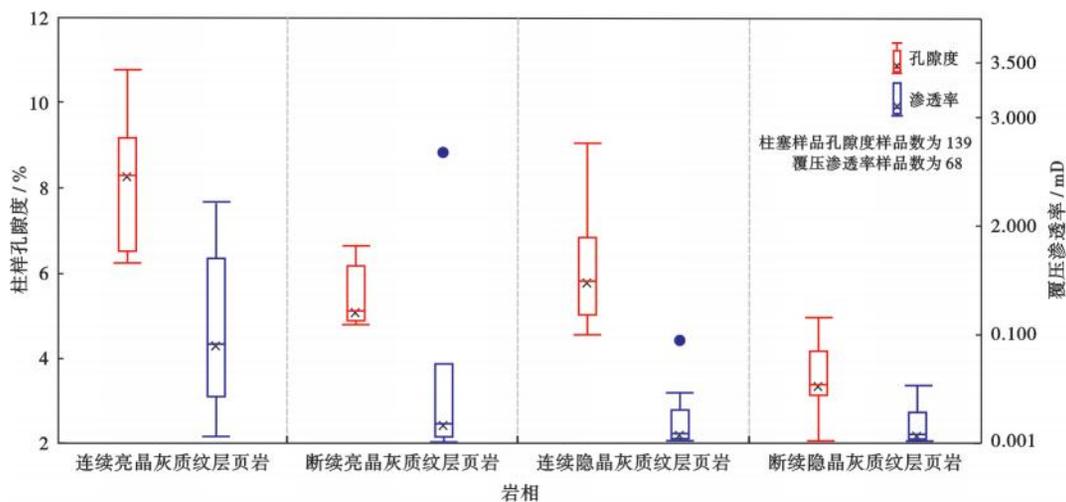


图11 济阳坳陷不同纹层结构页岩的孔渗特征

Fig. 11 Porosity and permeability characteristics of different laminated shale in Jiyang depression

状向柱状、栉状转化。随着灰质纹层厚度增加,方解石的晶间孔隙被逐渐压缩,在柱状方解石生长末端甚至不发育连续性的晶间孔,仅在靠近泥质纹层一侧发育溶蚀孔和由晶间缝连通的晶间孔,为有效孔隙。亮晶灰质纹层页岩的岩心中多见顺层理缝的开裂,随着方解石的结晶程度增加,灰质纹层的横向连续变好,层理缝的发育程度和开启度会更高。而在制样及实验过程中,由于层理缝受力,缝的开启度变大,导致岩心渗透率骤增,测值会异常高(图 11)。

连续亮晶灰质纹层页岩(纹层厚度一般较薄)的孔隙度高于断续亮晶灰质纹层页岩(纹层厚度一般呈较厚)。亮晶灰质纹层页岩具有层理缝发育的结构基础,而层理缝具有大幅提高泥质纹层中孔—小孔连通性及横向渗透性的作用,因此,亮晶灰质纹层页岩具有优势的大孔占比、更高的连通孔隙占比和更高的微孔—小孔连通占比。总体而言,亮晶灰质纹层页岩的渗透性好于隐晶灰质纹层页岩。

济阳拗陷页岩的岩相类型复杂,整体成化富碳酸盐^[1],纹层结构控制着无机质宏孔的尺度和孔径分布,并影响页岩的孔隙结构和层理缝的形成。灰质纹层主要提供连通性较好的方解石晶间孔和溶蚀孔,是大孔及微缝的主要载体;纹层越发育、连续性越好,有效孔隙的占比越大。泥质纹层主要提供少数连通的粒间孔、黏土矿物片间孔和黄铁矿晶间孔。灰质纹层作为生物化学沉积层,具有一定的抗压实作用,且早期固结的灰质纹层“刚性骨架”对塑性的泥质纹层具有保孔作用。

单纹层的厚度及灰质-泥质“层偶”的比例影响着页岩的储集物性。当“层偶”结构中灰质纹层厚度之和的占比远超泥质纹层时,反映当时的沉积水体较浅、古生产力低、有机质的生成和保存条件较差、含油性降低。随着灰质纹层的厚度增加,方解石颗粒间的排列更紧密,晶间孔的连通性变差,储集物性变差,连通孔隙度降低 2%~4%。当泥质纹层厚度之和的占比远超灰质纹层时,反映当时的沉积水体深或沉积速率快、泥质纹层中微孔隙占比高、整体连通性差、储集物性差。AIP-FESEM 分析表明,灰质-泥质“层偶”结构作为初级“源-储”单元,其连通孔隙主要发育在纹层界面及邻近纹层界面的灰质、泥质纹层边部,而在纹层中间,孔隙的连通程度明显变差。因此在合适的灰质-泥质纹层比例下,随纹层发育程度增加(隐晶→亮晶,极少纹层→稀疏纹层→断续纹层→密集纹层),单位体积内优质初级“源-储”单元越多,大孔的占比越高,微孔—小孔的连通性越强,页岩的储层品质逐级提高。

在济阳拗陷的湖盆边缘,如在受砂砾岩沉积影响大的北部陡坡带,由于泥质纹层中长英质颗粒的粒径

和占比增加,长英质颗粒不再作为泥级颗粒考虑,其刚性大颗粒的抗压实作用可保护泥质中的残留孔隙。在成岩过程中,当黏土矿物转化并发生体积收缩时,在长英质颗粒边缘多形成粒缘缝,而在弱成层的长英质矿物层中则形成层理缝,这将极大地改善初级“源-储”单元,页岩油在初级“源-储”单元内部可运移、聚集成藏。这是济阳拗陷民丰洼陷富有机质混积相带页岩油富集高产的重要地质因素。

3.2 层理缝是济阳拗陷页岩重要的基质微缝类型

泥页岩渗透率的各向异性(垂直渗透率与水平渗透率的比值)是数值建模参数,也是表征页岩油藏驱替特征、储量及产能的重要变量^[40]。济阳拗陷页岩灰质-泥质结构的差异性导致渗透率具有复杂的各向异性。对 68 组不同纹层组合的柱塞样品开展水平渗透率和垂直渗透率测试的结果表明,水平渗透率为 0.042~12.800 mD,垂直渗透率为 0.003 2~0.170 0 mD。层理缝的发育程度是决定页岩水平渗透率的重要因素。在层理缝发育的页岩岩相,水平渗透率普遍高于 1.0 mD,水平渗透率可高于垂直渗透率 4 个数量级,以亮晶灰质纹层页岩为主。在层理缝不发育的页岩岩相,水平渗透率普遍低于 1.0 mD,水平渗透率是垂直渗透率的 1~50 倍。具体表现为,连续隐晶灰质纹层页岩,其渗透率各向异性相对较大,各向异性一般为 10~50;断续隐晶灰质纹层页岩的各向异性相对较小,一般为 5~20。造成这种差异的原因是含断续纹层或纹层不发育的页岩,其各向均质程度高、岩相较致密、渗透率各向异性小。在连续纹层页岩中,灰质纹层的孔隙连通性好,特别是在靠近泥质纹层一侧,溶蚀作用强,孔隙连通程度高,水平渗透率高;纵向上,灰质、泥质纹层的孔隙结构存在差异,特别是泥质纹层的纵向连通性低、垂向渗透率低,这造成此类页岩的渗透率各向异性大。

层理缝作为济阳拗陷页岩内重要的微缝类型,其形成主要受纹层结构类型、含油性、生/排烃强度、地层倾角、构造活动等因素影响。通过岩心、岩石薄片、扫描电镜等宏观和微观观察,结合测试数据分析表明,在外源影响较弱的湖盆中心区,四季分明的气候条件下,低沉积速率可形成好的灰质-泥质“层偶”结构,高古生产力造成泥页岩中有机质丰度高。湖盆中心水体深度大,有机质保存条件好,有机质呈条带状富集或成层性富集,且多发育在灰质-泥质“层偶”结构界面。有机质在生烃演化过程中会排出大量烃类组分,而纹层间的力学薄弱面是水平方向排烃缝开启的优势点;加之在构造活动或地层倾角大的构造部位,泥页岩中频发顺层滑移,层间滑动将进一步促进层理缝的形成和开启,

因此,在含有高 TOC 含量段和层间力学薄弱面的亮晶灰质纹层页岩中,层理缝广泛发育[图 9(a)、图 9(b)]。沙四段上亚段纯上次亚段在湖侵初期处于气候极度干旱环境,水体咸度大、沉积速率慢、灰质-泥质“层偶”结构厚度薄、结构稳定,在深埋藏条件下,有机质演化程度高,生/排烃强度大,加之湖盆断陷初期地层倾角大,泥页岩的顺层滑移造成大量层间错动,层理缝在连续隐晶灰质纹层页岩中呈密集发育,岩心剖切后多呈页理状[图 9(c)、图 9(d)],层面可见滑移微褶皱。沙四段上亚段纯上次亚段底部的层理缝发育程度高,因而储层品质好。

济阳拗陷页岩的层理缝受多因素控制,层理缝沟通了页岩油横向运移的通道,大幅提高了中-低成熟、高流体黏度页岩油的可流动性。层理缝发育层段在平面上具有一定连续性,流体在横向上连通,可作为一套压力封存箱,这会使得压裂过程中压力横向传导快,但纵向穿层能力减弱。因此,在对层理缝发育段进行开发时,需优化井网井距和压裂设计等,防压窜,提高储层的有效改造体积。建议将层理缝发育段作为压裂沟通段而非压裂箱体,尽量在改造人工缝网的同时有效沟通层理缝。

3.3 多孔多缝的孔缝组合模式是优质页岩岩相形成储层的条件

通过 AIP-FESEM 分析和图像数值分析定量表征,结合岩心、岩石薄片观察的纹层结构及不同纹层组合的物性特征,笔者总结了不同纹层组合的孔缝类型及展布特征,建立了不同纹层结构的孔缝网络模式(图 12)。

连续亮晶灰质纹层页岩具有优生、优储的纹层结构[图 12(a)],其中,灰质-泥质“层偶”结构的脆性差异大,在差异压实作用或构造活动作用下易发育构造缝,是重要的层间纵向沟通渠道。连续亮晶灰质纹层页岩发育多尺度、多类型基质微缝的孔缝模式,是优质岩相类型,其在济阳拗陷页岩油层系中的累计厚度较小,分布具有等时性,是重要的标志层,也是根据纵向“甜点段”划分的优势“甜点区”。

连续隐晶灰质纹层页岩的灰质-泥质“层偶”结构厚度小。其中,灰质纹层内发育晶间孔和溶蚀孔,纹层内部及边缘发育溶蚀缝,部分灰质、泥质纹层间可见断续层理缝发育,是有效的储层;泥质纹层中发育多尺度微孔隙,部分微孔在一定尺度范围内具有连通性。隐晶灰质纹层页岩的层间排烃效率低,在大量生/排烃期多形成垂向蛇曲状撕裂微缝,这些微缝也具有一定的

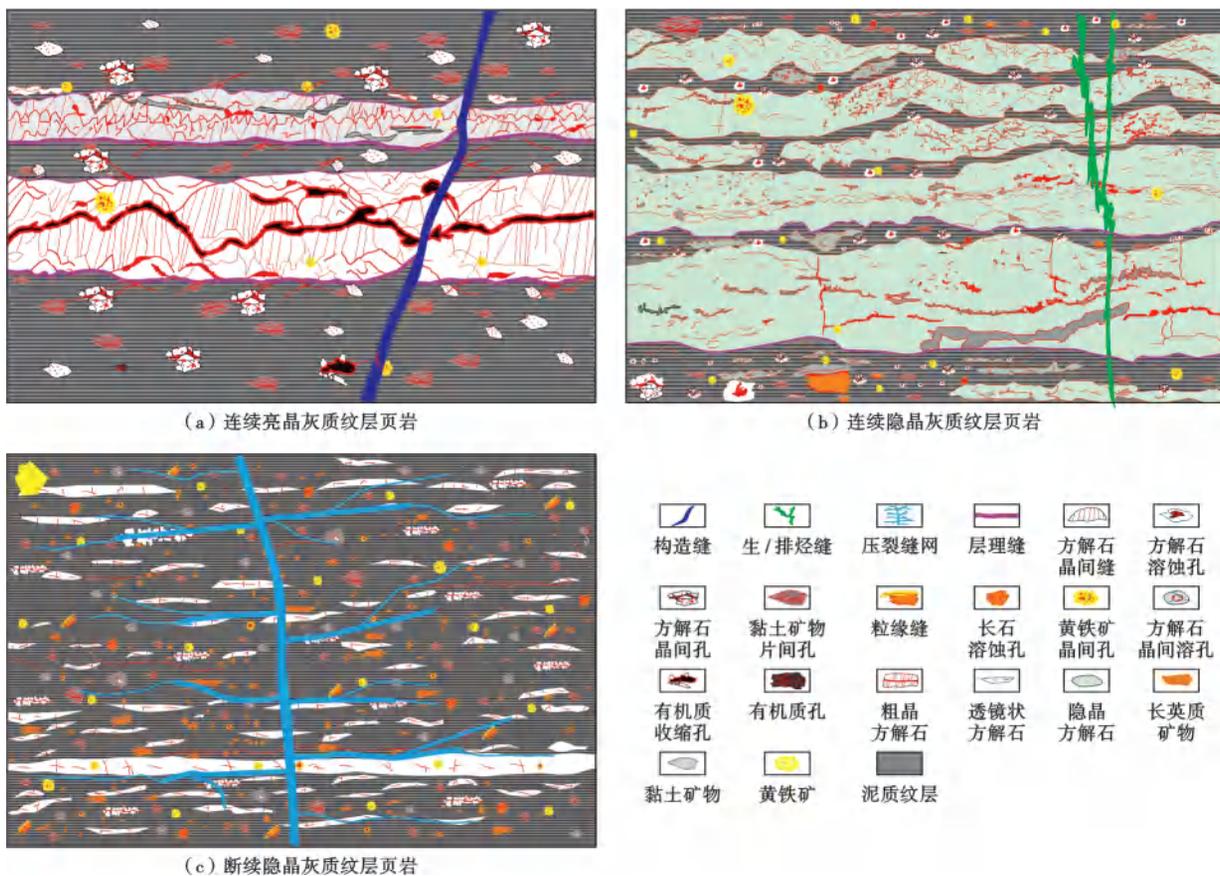


图 12 不同纹层结构页岩的孔缝模式

Fig. 12 Pore-fracture patterns of different laminated shale

垂向连通作用[图 12(b)]。连续隐晶灰质纹层页岩在洼陷中心厚度大,纵向连续型好,是“甜点段”的主要优选区。

对于断续隐晶灰质纹层页岩,灰质纹层的横向连续性差,多表现为顺层分布的透镜体,其孔隙连通性较差;泥质纹层占比大,有机质含量高,具有很好的生油条件,但页岩油的流动性差,大规模压裂缝网改造可增强页岩油的流动性[图 12(c)]。

综上所述,呈薄互层状的灰质-泥质“层偶”结构构成了济阳拗陷富碳酸盐页岩的优质纹层结构类型,纹层结构越好,多尺度、多类型的孔缝网络越发育,页岩的储层品质参数越好。纹层结构在储层品质中起到了“高速通道”的作用。

4 结 论

(1) 济阳拗陷富碳酸盐页岩中,灰质纹层的孔隙类型以中孔一大孔为主,连通孔隙是主要储集单元,孔隙的连通性随方解石重结晶程度的增加和晶间缝、层理缝发育而变好。泥质纹层的孔隙连通性差,纹层中富集的有机质是生烃母质,即生油单元;泥质纹层中,分布在大粒径长英质碎屑边缘的粒缘缝可有效改善中孔一小孔的连通性;连续密集的灰质纹层形成的刚性骨架对泥质纹层中的孔隙具有保孔作用。

(2) 层理缝是烃类在层内水平方向运移的“高速通道”,纹层的横向连续程度和密集程度越好,方解石的重结晶程度越高,层理缝越发育。泥质纹层中,长英质颗粒的弱成层性使得其粒缘缝横向串通,可形成纹层内层理缝,层理缝的水平连通作用和垂向近距离渗透可激活相邻纹层的微米—纳米孔隙,极大地提高孔隙的连通性。济阳拗陷页岩层系中的层理缝发育段具有等时性,可作为一套压力封存箱。

(3) 纹层结构下的良好源-储配置关系是影响页岩储层品质、“甜点”评价的重要因素。连续亮晶灰质页岩和连续隐晶灰质页岩具有优生、优储的灰质-泥质“层偶”结构,其孔缝网络越发育,页岩油的流动能力越强。在此基础上优选的富有机质连续纹层页岩有望成为济阳拗陷现阶段页岩油开发的“甜点”目标。

参 考 文 献

[1] 杨勇,张世明,吕琦,等. 中国东部陆相断陷盆地中—低成熟度页岩油立体开发技术——以济阳拗陷古近系沙河街组为例[J]. 石油学报,2024,45(4):672-682.
YANG Yong,ZHANG Shiming,LÜ Qi,et al. Stereoscopic development techniques for shale oil with low-medium maturity in continental faulted basins in eastern China:a case study of the Paleogene Shahejie Formation in Jiyang depression[J]. Acta Pe-

trolei Sinica,2024,45(4):672-682.
[2] 杨勇. 济阳页岩油开发“三元”储渗理论技术与实践[J]. 石油勘探与开发,2024,51(2):337-347.
YANG Yong. Shale oil development techniques and application based on ternary-element storage and flow concept in Jiyang depression,Bohai Bay Basin,East China[J]. Petroleum Exploration and Development,2024,51(2):337-347.
[3] 贾承造. 中国石油工业上游前景与未来理论技术五大挑战[J]. 石油学报,2024,45(1):1-14.
JIA Chengzao. Prospects and five future theoretical and technical challenges of the upstream petroleum industry in China[J]. Acta Petrolei Sinica,2024,45(1):1-14.
[4] 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.
[5] 刘惠民,李军亮,刘鹏,等. 济阳拗陷古近系页岩油富集条件与勘探战略方向[J]. 石油学报,2020,43(12):1717-1729.
LIU Huimin,LI Junliang,LIU Peng,et al. Enrichment conditions and strategic exploration direction of Paleogene shale oil in Jiyang depression[J]. Acta Petrolei Sinica,2020,43(12):1717-1729.
[6] 张顺. 东营凹陷页岩储层成岩作用及增孔和减孔机制[J]. 中国矿业大学学报,2018,47(3):562-578.
ZHANG Shun. Diagenesis and mechanism of shale reservoir pore increase and reduction in Dongying sag[J]. Journal of China University of Mining & Technology,2018,47(3):562-578.
[7] NIPKOW F. Vorläufige mitteilungen über untersuchungen des schlammabsatzes im Zürichsee[J]. Zeitschrift Für Hydrologie, 1920,1(1-2):100-122.
[8] O'SULLIVAN P E. Annually-laminated lake sediments and the study of Quaternary environmental changes—a review[J]. Quaternary Science Reviews,1983,1(4):245-313.
[9] STILLER A,KIRSHENBAUM M. A stable carbon isotope study of dissolved inorganic carbon in hardwater Lake Kinneret (Sea of Galilee)[J]. South African Journal of Science,1999,95(4):166-170.
[10] 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.
[11] 王飞宇,何萍,秦匡宗,等. 中国湖相生油岩和油页岩无定形有机质中的超细纹层[J]. 科学通报,1994,39(17):1587-1587.
WANG Feiyu,HE Ping,QIN Kuangzong,et al. Ultra-fine striated layer in the amorphous organic form of lacustrine source rocks and oil shales in China[J]. Chinese Science Bulletin,1994,39(17):1587-1587.
[12] 刘东生,刘嘉麒,吕厚远. 玛珥湖高分辨率古环境研究的新进展[J]. 第四纪研究,1998,18(4):289-296.
LIU Dongsheng,LIU Jiaqi,LÜ Houyuan. Progress in high-resolution paleoenvironment research from maar lake[J]. Quaternary

- Sciences, 1998, 18(4): 289-296.
- [13] 储国强, 刘嘉麒, 刘东生. 中国玛珥湖中两种沉积纹层的辨识及意义[J]. 科学通报, 2000, 45(14): 1553-1556.
CHU Guoqiang, LIU Jiaqi, LIU Dongsheng. Discrimination of two kinds of sedimentary laminae in maar lakes of China[J]. Chinese Science Bulletin, 2000, 45(24): 2292-2295.
- [14] 王冠民, 钟建华, 马在平. 湖泊纹层的同生化学变化对古环境恢复的影响[J]. 地学前缘, 2003, 10(4): 340.
WANG Guanmin, ZHONG Jianhua, MA Zaiping. A review and the prospects of the researches on sedimentary mechanism of lacustrine laminae[J]. Earth Science Frontiers, 2003, 10(4): 340.
- [15] 张科. 西部地区纹层湖泊高分辨率孢粉记录的晚全新世环境变化[D]. 兰州: 兰州大学, 2010.
ZHANG Ke. Late holocene environment change based on high-resolution pollen records from varved lake sediments in West China[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2010.
- [16] 赵元杰, 李雪峰, 夏训诚, 等. 罗布泊红柳沙包沉积纹层有机质碳氮含量与气候变化[J]. 干旱区资源与环境, 2011, 25(4): 149-154.
ZHAO Yuanjie, Li Xuefeng, XIA Xuncheng, et al. C and N contents in organic matter of Tamarix dune sedimentary veins and environmental change in Lop Nur region [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2011, 25(4): 149-154.
- [17] 陈钰, 刘兴起, 何利, 等. 青藏高原北部可可西里库赛湖年纹层微区分析及形成机理[J]. 地质学报, 2016, 90(5): 1006-1015.
CHEN Yu, LIU Xingqi, HE Li, et al. Micro-area analysis and mechanism of varves from Lake Kusai in the Hoh Xil area, northern Tibetan Plateau[J]. Acta Geologica Sinica, 2016, 90(5): 1006-1015.
- [18] 李凯, 游海涛, 刘兴起. 中国湖泊沉积物纹层年代学研究进展[J]. 湖泊科学, 2017, 29(2): 266-275.
LI Kai, YOU Haitao, LIU Xingqi. Review on lake sediment varve chronology in China[J]. Journal of Lake Sciences, 2017, 29(2): 266-275.
- [19] XU Shang, GOU Qiyang. The importance of laminae for China lacustrine shale oil enrichment: a review[J]. Energies, 2023, 16(4): 1661.
- [20] LI Yaohua, SONG Yan, JIANG Zhenxue, et al. Major factors controlling lamina induced fractures in the Upper Triassic Yanchang Formation tight oil reservoir, Ordos Basin, China[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2018, 166: 107-119.
- [21] 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): 888-900.
- [22] LIANG Chao, CAO Yingchang, LIU Keyu, et al. Diagenetic variation at the lamina scale in lacustrine organic-rich shales: implications for hydrocarbon migration and accumulation[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2018, 229: 112-128.
- [23] 何文渊, 张金友, 钟建华, 等. 大庆油田古龙凹陷青山口组页岩油储层方解石脉中发现藻生物层[J]. 地质论评, 2023, 69(6): 2081-2084.
HE Wenyuan, ZHANG Jinyou, ZHONG Jianhua, et al. The discovery of algae biosphere and its significance of the bedding-parallel calcite veins of the shale oil reservoir of Qingshankou Formation in Gulong sag[J]. Geological Review, 2023, 69(6): 2081-2084.
- [24] 杨勇, 曹小鹏, 温志峰, 等. 济阳坳陷古近纪沙河街组页岩油储层中的藻纹层和藻生物层的发现及其意义[J]. 地质论评, 2023, 69(4): 1364-1367.
YANG Yong, CAO Xiaopeng, WEN Zhifeng, et al. The discovery and significance of algal lamina and algal biosphere in the shale oil reservoir of Shahejie Formation in Paleogene, Jiyang depression[J]. Geological Review, 2023, 69(4): 1364-1367.
- [25] 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.
- [26] 赵珂. 渤海湾盆地东营凹陷沙四上一沙三下亚段碳酸盐纹层特征及成因分析[D]. 武汉: 中国地质大学, 2019.
ZHAO Ke. Characteristics and genesis analysis of carbonate lamina in the upper fourth Member and the lower third Member of Shahejie Formation in Dongying depression, Bohai Bay Basin [D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2019.
- [27] 王勇, 王学军, 宋国奇, 等. 渤海湾盆地济阳坳陷泥页岩岩相与页岩油富集关系[J]. 石油勘探与开发, 2016, 43(5): 696-704.
WANG Yong, WANG Xuejun, SONG Guoqi, et al. 2016. Genetic connection between mud shale lithofacies and shale oil enrichment in Jiyang depression, Bohai Bay Basin[J]. Petroleum Exploration and Development, 2016, 43(5): 696-704.
- [28] 王勇, 刘惠民, 宋国奇, 等. 济阳坳陷泥页岩细粒沉积体系[J]. 石油学报, 2019, 40(4): 395-410.
WANG Yong, LIU Huimin, SONG Guoqi, et al. Lacustrine shale fine-grained sedimentary system in Jiyang depression [J]. Acta Petroli Sinica, 2019, 40(4): 395-410.
- [29] 刘惠民, 王勇, 杨永红, 等. 东营凹陷细粒混积岩发育环境及其岩相组合: 以沙四上亚段泥页岩细粒沉积为例[J]. 地球科学, 2020, 45(10): 3543-3555.
LIU Huimin, WANG Yong, YANG Yonghong, et al. Sedimentary environment and lithofacies of fine-grained hybrid sedimentary in Dongying sag: a case of fine-grained sedimentary system of the Es₄[J]. Earth Science, 2020, 45(10): 3543-3555.
- [30] 刘惠民, 王勇, 李军亮, 等. 济阳坳陷始新统页岩岩相发育主控因素及分布特征[J]. 古地理学报, 2023, 25(4): 752-767.
LIU Huimin, WANG Yong, LI Junliang, et al. Main controlling factors and distribution characteristics of shale lithofacies in the Eocene of Jiyang depression [J]. Journal of Palaeogeography, 2023, 25(4): 752-767.
- [31] 张顺, 刘惠民, 宋国奇, 等. 东营凹陷页岩油储集空间成因及控制因素[J]. 石油学报, 2016, 37(12): 1495-1507.
ZHANG Shun, LIU Huimin, SONG Guoqi, et al. Genesis and control factors of shale oil reserving space in Dongying sag[J].

- Acta Petrolei Sinica, 2016, 37(12): 1495-1507.
- [32] 蒋龙, 杜玉山, 张云蛟, 等. 牛庄洼陷沙河街组四段上亚段—沙河街组三段下亚段细粒沉积岩纹层状亮晶方解石脉的发育机理与模式[J]. 石油学报, 2023, 44(10): 1637-1649.
JIANG Long, DU Yushan, ZHANG Yunjiao, et al. Development mechanism and model of lamellar calcite veins of fine-grained sedimentary rocks from the upper submember of Member 4 to the lower submember of Member 3 of Shahejie Formation in Niuzhuang subsag [J]. Acta Petrolei Sinica, 2023, 44(10): 1637-1649.
- [33] 钟建华, 苏飞飞, 倪良田, 等. 柯坪硫磺沟奥陶系(纹层状)古钙华的特征及石油地质意义[J]. 中国岩溶, 2017, 36(1): 1-14.
ZHONG Jianhua, SU Feifei, NI Liangtian, et al. Palaeo-tufa from the Liuhuanguo cave 2 in the Ordovician carbonate, north Tarim Basin, China: features and petroleum-geologic significances [J]. Carsologica Sinica, 2017, 36(1): 1-14.
- [34] 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.
- [35] 武瑾, 李海, 杨学锋, 等. 深层海相页岩纹层类型、组合及其对储层品质的影响——以四川盆地南部泸州区块龙马溪组一段一亚段为例[J]. 石油学报, 2023, 44(9): 1517-1531.
WU Jin, LI Hai, YANG Xuefeng, et al. Types and combinations of deep marine shale laminae and their effects on reservoir quality: a case study of the first submember of Member 1 of Longmaxi Formation in Luzhou block, south Sichuan Basin [J]. Acta Petrolei Sinica, 2023, 44(9): 1517-1531.
- [36] 邹才能, 董大忠, 王社教, 等. 中国页岩气形成机理、地质特征及资源潜力[J]. 石油勘探与开发, 2010, 37(6): 641-653.
ZOU Caineng, DONG Dazhong, WANG Shejiao, et al. Geological characteristics, formation mechanism and resource potential of shale gas in China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2010, 37(6): 641-653.
- [37] 张廷山, 杨洋, 龚其森, 等. 四川盆地南部早古生代海相页岩微孔隙特征及发育控制因素[J]. 地质学报, 2014, 88(9): 1728-1740.
ZHANG Tingshan, YANG Yang, GONG Qisen, et al. Characteristics and mechanisms of the micro-pores in the Early Palaeozoic marine shale, southern Sichuan Basin [J]. Acta Geologica Sinica, 2014, 88(9): 1728-1740.
- [38] 王民, 李明, 李进步, 等. 页岩含油率多种测试方法对比[J]. 石油学报, 2022, 43(12): 1758-1769.
WANG Min, LI Ming, LI Jinbu, et al. Comparative analysis of test methods for shale oil content [J]. Acta Petrolei Sinica, 2022, 43(12): 1758-1769.
- [39] 吴连波. 页岩核磁共振横向弛豫时间与孔径分布量化关系及应用[J]. 油气地质与采收率, 2024, 31(1): 36-43.
WU Lianbo. Quantitative relationship between shale NMR transverse relaxation time and pore size distribution and its application [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2024, 31(1): 36-43.
- [40] GALE J F W, HOLDER J. Natural fractures in some US shales and their importance for gas production [M] // VINING B A, PICKERING S C. Petroleum geology: from mature basins to new frontiers. London: The Geological Society of London, 2010: 1131-1140.
(收稿日期 2023-10-30 改回日期 2024-05-22 编辑 雷永良)
-
- (上接第 1620 页)
- [20] 林畅松, 潘元林, 肖建新, 等. “构造坡折带”——断陷盆地层序分析和油气预测的重要概念[J]. 地球科学, 2000, 25(3): 260-266.
LIN Changsong, PAN Yuanlin, XIAO Jianxin, et al. Structural slope-break zone: key concept for stratigraphic sequence analysis and petroleum forecasting in fault subsidence basins [J]. Earth Science, 2000, 25(3): 260-266.
- [21] 宋国奇, 郝雪峰, 刘克奇. 箕状断陷盆地形成机制、沉积体系与成藏规律——以济阳拗陷为例[J]. 石油与天然气地质, 2014, 35(3): 303-310.
SONG Guoqi, HAO Xuefeng, LIU Keqi. Tectonic evolution, sedimentary system and petroleum distribution patterns in dustpan-shaped rift basin: a case study from Jiyang depression, Bohai Bay Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2014, 35(3): 303-310.
- [22] 谭先锋, 黄建红, 李洁, 等. 深部埋藏条件下砂岩中碳酸盐胶结物的成因及储层改造——以济阳拗陷始新统孔店组为例[J]. 地质论评, 2015, 61(5): 1107-1120.
TAN Xianfeng, HUANG Jianhong, LI Jie, et al. Origin of carbonate cements and the transformation of the reservoir in sandstone under the deep burial condition: a case study on Eocene Kongdian Formation in Jiyang depression, Bohai Bay Basin [J]. Geological Review, 2015, 61(5): 1107-1120.
- [23] 魏浩元, 朱宗良, 韦德强, 等. 河西走廊及其邻区非常规油气成藏条件及勘探潜力[J]. 石油学报, 2023, 44(12): 2231-2249.
WEI Haoyuan, ZHU Zongliang, WEI Deqiang, et al. Unconventional oil-gas accumulation conditions and exploration potentials in Hexi Corridor and its adjacent areas [J]. Acta Petrolei Sinica, 2023, 44(12): 2231-2249.
- [24] 陈振岩, 吴文柱. 辽河盆地东部凹陷幕式成藏特征[J]. 石油与天然气地质, 2003, 24(1): 32-35.
CHEN Zhenyan, WU Wenzhu. Episodic reservoiring features of eastern sag in Liaohe Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2003, 24(1): 32-35.
- [25] 杨超, 朱红涛, 牛成民, 等. 陆相盆地浅水背景河湖交互特征及其模式[J]. 地球科学, 2021, 46(5): 1771-1782.
YANG Chao, ZHU Hongtao, NIU Chengmin, et al. Characteristics and models of shallow-water environment river-lake interaction in continental basins [J]. Earth Science, 2021, 46(5): 1771-1782.
(收稿日期 2024-05-31 改回日期 2024-06-20 编辑 雷永良)