

文章编号: 1671-1505(2019)03-0479-11 DOI: 10.7605/gdxb.2019.03.030

## 渤海湾盆地东营凹陷古近系 细粒沉积岩特征及沉积环境\*

刘姝君<sup>1</sup> 操应长<sup>1,2</sup> 梁超<sup>1,2</sup>

1 中国石油大学(华东)地球科学与技术学院, 山东青岛 266580

2 海洋国家实验室海洋矿产资源评价与探测技术功能实验室, 山东青岛 266071

**摘 要** 随着泥页岩油气勘探的深入, 详细解剖细粒沉积岩的岩石类型和组成, 对后续储集层研究中优势岩石组合的确立有重要意义。通过岩心观察、全岩 X 射线衍射等分析手段, 以矿物含量和沉积构造作为主要依据, 将渤海湾盆地东营凹陷古近系沙三下—沙四上亚段细粒沉积岩划分为 9 种岩石类型, 其以纹层状混合细粒沉积岩、块状混合细粒沉积岩、纹层状灰岩、纹层状粉砂质灰岩、纹层状黏土质粉砂岩为主。由特征元素比值  $Ca/Mg$ 、 $Na/Al$ 、 $Fe/Mn$ 、 $Sr/Ba$ 、 $V/(V+Ni)$  值及  $Ti$ 、 $Al$  含量的垂向变化, 可知东营凹陷细粒沉积岩在古气候、古水深、古盐度及水体氧化还原性、陆源输入程度等方面的演化具有明显阶段性, 其气候在沙四上亚段沉积时期表现为由干冷变暖湿, 在沙三下亚段沉积时期呈现暖湿—相对湿冷—暖湿—相对湿热的演化; 且在不同的演化阶段, 岩石组合及特征均有差异。因此, 温暖湿润的气候和陆源输入量的增加有助于纹层状混合细粒沉积岩大量沉积, 而较为寒冷干燥的气候和相对低的陆源输入易于沉积纹层状粉砂质灰岩。这一结论有利于深化断陷湖盆细粒沉积岩岩石学的基础研究, 可为后续油气勘探开发奠定坚实的基础。

**关键词** 细粒沉积岩 岩石学特征 沉积演化 沙河街组 东营凹陷

**第一作者简介** 刘姝君, 女, 1993 年生, 硕士研究生, 主要从事细粒沉积学研究。E-mail: 494275775@qq.com。

**通讯作者简介** 操应长, 男, 1969 年生, 教授, 博士生导师, 主要从事沉积学、层序地层学及储层地质学的教学和科研工作。E-mail: caoych@upc.edu.cn。

中图分类号: P588.21, TE121.3<sup>+</sup>1 文献标志码: A

## Lithologic characteristics and sedimentary environment of fine-grained sedimentary rocks of the Paleogene in Dongying sag, Bohai Bay Basin

Liu Shu-Jun<sup>1</sup> Cao Ying-Chang<sup>1,2</sup> Liang Chao<sup>1,2</sup>

1 School of Geosciences, China University of Petroleum, Shandong Qingdao 266580, China

2 Laboratory for Marine Mineral Resources, Pilot National Laboratory for Marine Science and Technology (Qingdao), Shandong Qingdao 266071, China

**Abstract** With the development of shale oil and gas exploration, it is necessary to dissect the type and composition of fine-grained sedimentary rocks in detail, which is of great significance for the establishment of

\* 国家自然科学基金项目(编号: U1762217, 41602142, 41821002)资助。[Financially supported by the National Natural Science Foundation of China (Nos. U1762217, 41602142, 41821002)]

收稿日期: 2018-03-07 改回日期: 2018-06-25

dominant rock assemblage in subsequent reservoir studies. Fine-grained sedimentary rocks are well developed in Dongying sag, Bohai Bay Basin. By means of core observation, X-ray diffraction of whole rock and analysis methods, the carbonate minerals, clay minerals and silty minerals are considered to be the main mineral components of fine-grained sedimentary rocks in Dongying sag. According to mineral content and sedimentary structure, the fine-grained sedimentary rocks of the lower submember of Es3 member and the upper submember of Es4 member can be divided into 9 kinds of rock types, in which the laminar mixed fine-grained sedimentary rocks, the massive mixed fine-grained sedimentary rocks, the laminar limestone, the laminar silty limestone and the laminar argillaceous siltstone are relatively well developed. Based on the vertical variation of the characteristic element ratio of  $Ca/Mg$ ,  $Na/Al$ ,  $Fe/Mn$ ,  $Sr/Ba$ ,  $V/(V+Ni)$ , and the element content of  $Ti$  and  $Al$ , it is deduced that there are some obvious evolution stages of fine-grained sedimentary rocks in palaeoclimate, palaeowater depth, palaeosalinity, oxidative or reductive properties of the water, and the content of terrigenous clastics input. The palaeoclimate changed from dry and cold to warm and humid in the depositional period of upper submember of Es4, and developed from warm and humid to relatively cold and humid to warm and humid to relatively hot and humid in the depositional period of the lower submember of Es3. In conclusion, warm and humid climate together with the increase of terrigenous clastics contributed to deposit large amounts of laminar mixed fine-grained sedimentary rocks, whereas the laminar silty limestone tended to deposit in relatively cold and dry climate as well as less terrigenous clastics input. This conclusion is conducive to deepen the basic research of fine-grained sedimentary rocks in the faulted lacustrine basin, and can lay a solid foundation for future exploration and development of oil and gas.

**Key words** fine-grained sedimentary rocks, lithologic characteristics, sedimentary evolution, Shahejie Formation, Dongying sag

**About the first author** Liu Shu-Jun, born in 1993, is a master degree candidate. She is engaged in research of fine grain sedimentology. E-mail: 494275775@qq.com.

**About the corresponding author** Cao Ying-Chang, born in 1969, is a professor and Ph.D. supervisor. He is engaged in researches of sedimentology, sequence stratigraphy and reservoir geology. E-mail: caoych@upc.edu.cn.

细粒沉积物是指粒径小于  $62\ \mu\text{m}$  的黏土级和粉砂级沉积物。细粒沉积岩（也称泥页岩）由细粒沉积物构成，在全球范围内分布广泛，约占沉积岩的三分之二（Schieber *et al.*, 1998）。目前，泥页岩油气资源的工业性开采已在诸多国家开展，中国细粒沉积岩十分发育，且油气资源量巨大，具有广阔的前景。近年来，非常规油气藏的勘探如日中天，作为非常规油气烃源岩的重要类型，细粒沉积岩受到越来越多的关注。然而，由于矿物组分多样、非均质性强，加之粒度小、观察难度大，对细粒沉积岩的沉积和成岩作用的研究仍然较为薄弱（姜在兴等，2013；周立宏等，2016），影响了对该类岩石沉积规律的认识，进而制约了对细粒沉积岩优质储集层的识别。因此，作为细粒沉积岩研究的基础，岩石类型的深入研究有助于进一步明确该

类岩石的沉积、成储过程及特点，对推动非常规油气藏勘探开发具有至关重要的理论和实际意义。

渤海湾盆地东营凹陷是中国细粒沉积岩较为发育的地区之一，其细粒沉积岩分布稳定、埋深适中，目前已有 110 余口井见油气显示，并且新利深 1、樊 119 等多口井获得了工业油流，油气勘探潜力巨大（梁超，2015）。笔者以东营凹陷利页 1 井为例，在大量岩心及薄片观察资料、测试数据资料的基础上，进行了详细的岩石学特征描述和类型划分，分析了利页 1 井细粒沉积岩的沉积环境演化，并探讨了沉积环境与岩石组合之间的关系。

## 1 区域地质背景

东营凹陷位于渤海湾盆地济阳拗陷东南部，东起青坨子凸起，西邻惠民凹陷，南抵广饶凸起和鲁

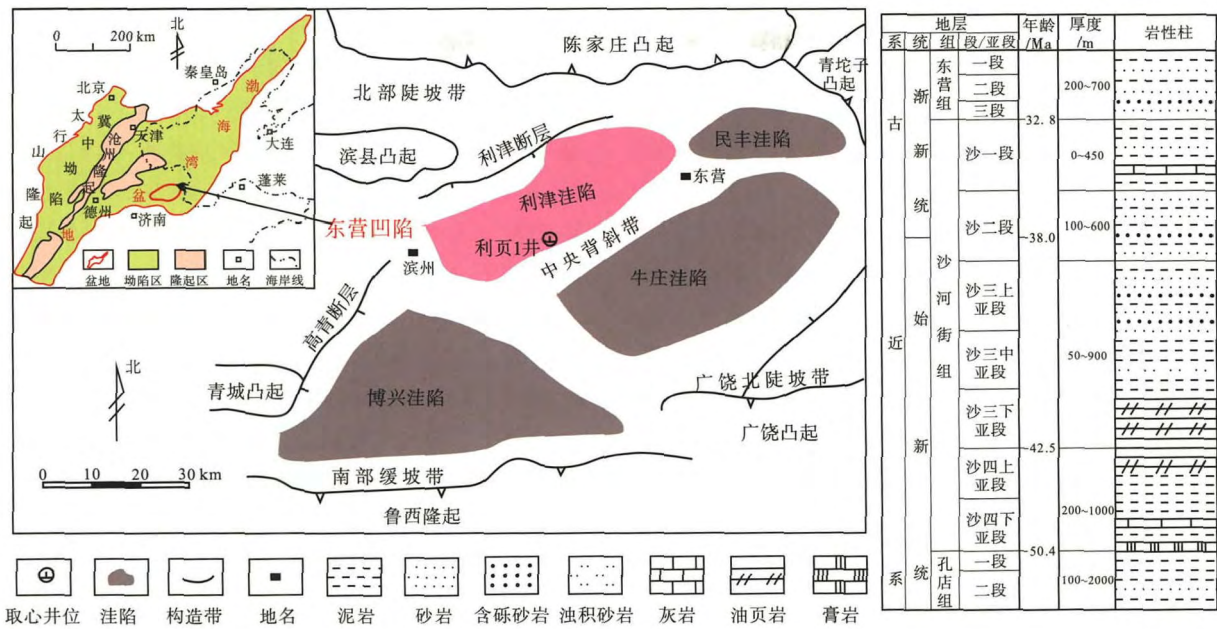


图 1 渤海湾盆地东营凹陷区域构造图 (据梁超, 2015, 有修改)

Fig. 1 Regional tectonic map of Dongying sag, Bohai Bay Basin (modified from Liang, 2015)

西隆起, 北至陈家庄凸起(图 1), 是中国东部陆相箕状断陷湖盆的典型代表, 具有“北断南超, 北深南浅”的特点(徐守余和李学艳, 2005)。东营凹陷在裂后充填期主要发育泛滥平原沉积和辫状河沉积, 而在裂陷充填期呈多幕式演化, 沉积环境多样, 以半深湖—深湖为主(梁超, 2015)。凹陷内广泛分布古近系和新近系, 自下而上依次发育古近系孔店组、沙河街组、东营组及新近系馆陶组、明化镇组(姚益民等, 2007; 梁超, 2015; Liang et al., 2016), 厚度达 7000 m, 见深灰色—黑色泥岩、砂质泥岩、油页岩、泥质灰岩、含砾砂岩及粉砂岩等。文中研究对象为沙河街组三段下亚段和沙河街组四段上亚段的泥页岩。

物、有机质、生物碎屑、石英等(Aplin and Macquaker, 2011)。东营凹陷细粒沉积物可见方解石、黏土矿物、石英、长石、白云石、黄铁矿以及菱铁矿、石膏、硬石膏等, 且有机质含量普遍较高(梁超等, 2017; Liang et al., 2017, 2018), 其中碳酸盐矿物、黏土矿物和长英质矿物为含量最高的 3 大类组分(图 2)。碳酸盐矿物以方解石为主, 平均含量约 30.6%, 粒径多介于 10~50 μm 之间, 呈

## 2 岩石学特征

随着泥页岩油气勘探的深入, 详细解剖细粒沉积岩的岩石类型和组成, 深化湖相细粒沉积岩岩石学基础研究, 对后续储集层研究中优势岩石类型的确立有重要意义。

### 2.1 岩石类型划分

#### 2.1.1 划分依据

1) 矿物组分。矿物成分是细粒沉积岩形成不同岩相的决定性因素, 主要包括碳酸盐、黏土矿

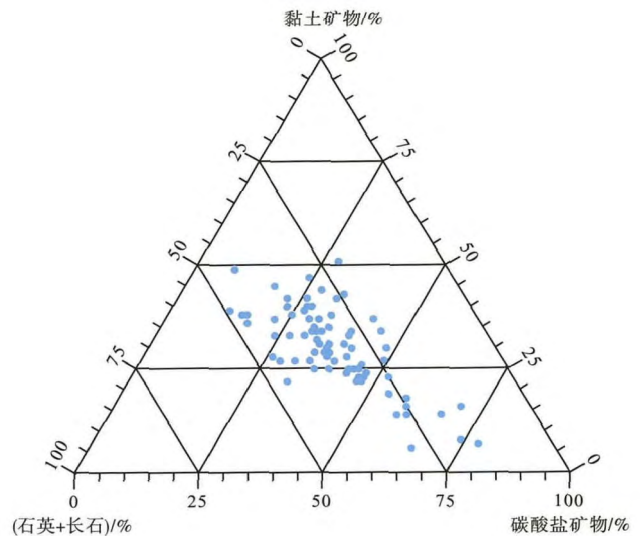


图 2 渤海湾盆地东营凹陷利页 1 井细粒沉积岩主要矿物含量  
Fig. 2 Main mineral content of fine-grained sedimentary rocks from Well LY1 in Dongying sag, Bohai Bay Basin

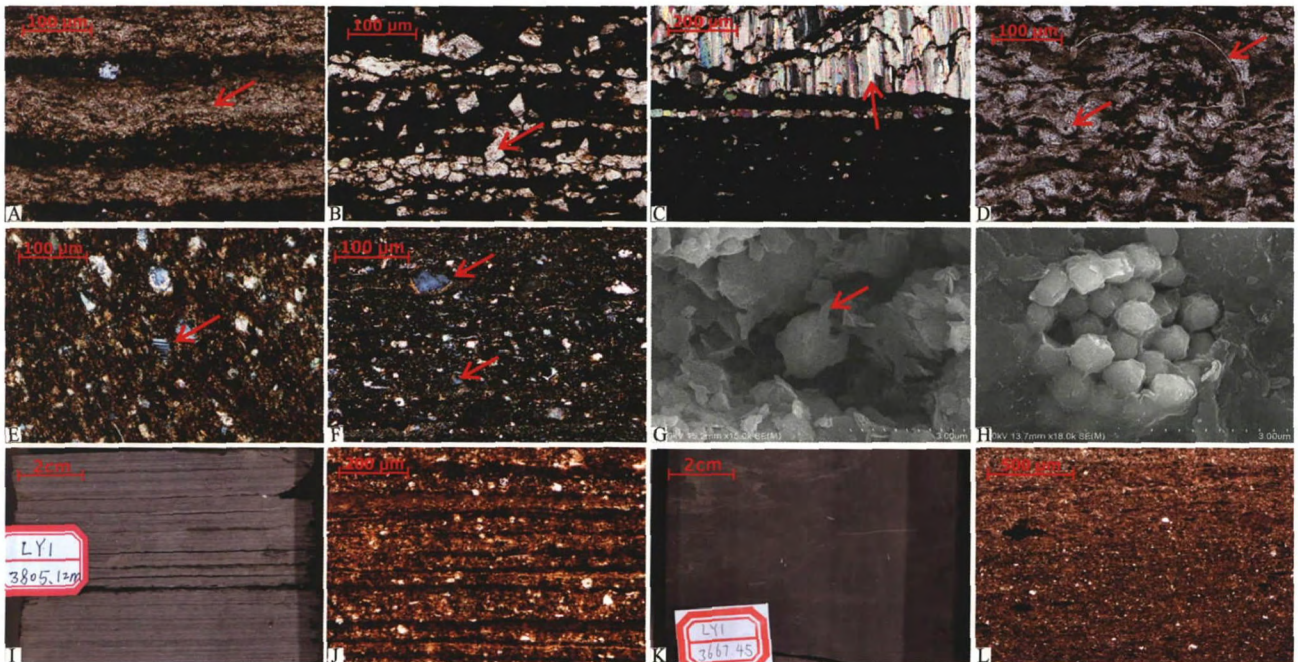
泥晶、粒状和柱状(图 3-A, 3-B, 3-C), 少量为生物碎片, 如介形虫碎片、钙球(图 3-D)。长石类矿物主要为斜长石, 含少量钾长石, 斜长石平均含量约 4.5%, 镜下主要呈长条形, 解理较为发育, 可见钠长石聚片双晶(图 3-E) 及卡钠复合双晶。石英含量平均值为 24.5%, 可见粒状碎屑(图 3-F) 和微晶石英 2 种赋存状态(Liang *et al.*, 2018), 前者的粒径多介于 10~30  $\mu\text{m}$  之间, 后者多为 5  $\mu\text{m}$ 。黏土矿物含量平均值为 30.1%, 棕褐色, 颗粒极小, 扫描电镜下主要见片状的伊利石(图 3-G), 其次为似蜂巢状的伊蒙混层。黄铁矿平均含量约 3.2%, 黑色, 颗粒大小介于 5~20  $\mu\text{m}$  之间, 多呈莓球状集合体(图 3-H), 通常被黏土矿物所包裹, 晶体自形程度较高(梁超, 2015)。此外, 可见后生黄铁矿充填于溶蚀的方解石颗粒内。

2) 沉积构造。沉积构造是区分岩相的又一重要特征。东营凹陷沙三下—沙四上亚段细粒沉积岩

主要发育纹层状构造(图 3-I, 3-J) 和块状构造(图 3-K, 3-L)。纹层状构造是东营凹陷细粒沉积岩最为发育的沉积构造类型, 通常由 1 种纹层或几种纹层在垂向上以不同的组合方式构成(张顺等, 2015)。通过对沙三下—沙四上亚段细粒沉积岩的岩心及薄片观察, 可见研究区纹层由明显的浅色层和暗色层交替构成, 暗色纹层主要为有机质层、黏土矿物层, 而浅色层主要为泥晶方解石纹层、粒晶方解石纹层、方解石和粉砂混合层以及粉砂和黏土矿物混合层, 其中, 由方解石构成的纹层宏观特征最为显著, 颜色一般较浅甚至接近纯白色。块状构造在研究区发育相对较少, 主要见于沙四上亚段上部, 其矿物成分分布比较均匀, 结构差异较小。

### 2.1.2 划分方案及岩石类型

根据前人研究(Macquaker and Adams, 2003; 姜在兴等, 2013; 梁超, 2015; Liang, 2018), 并综合考虑研究区的实际情况, 笔者依据三端元分类法, 将矿物成分作为第一要素, 以各自含量的 50% 为界,



A—泥晶方解石, 暗色层为富含有机质的黏土矿物, 3827.20 m, (-); B—粒状方解石, 表面清洁明亮, 部分可见解理, 3662.1 m, (-); C—柱状方解石, 高级白干涉色, 黑色部分为有机质, 3642.35 m, (+); D—钙球及生物碎片, 成分为亮晶方解石, 3833.92 m, (-); E—斜长石, 长条状, 见聚片双晶, 3657.85 m, (+); F—石英, 粒状, I 级灰白干涉色, 3782.73 m, (+); G—黏土矿物, 片状, 3833.92 m, 扫描电镜照片; H—莓球状黄铁矿, 周围被黏土矿物包裹, 单体呈五角十二面体, 3632.42 m, 扫描电镜照片; I—纹层状构造, 3805.12 m, 岩心照片; J—纹层状构造, 浅色层为方解石及长英质矿物, 暗色层主要为黏土矿物, 纹层边界清晰, 3639.34 m, (-); K—块状构造, 3667.45 m, 岩心照片; L—块状构造, 矿物组分均匀分布, 3753.86 m, (-)

图 3 渤海湾盆地东营凹陷利页 1 井细粒沉积岩矿物组分赋存形态及沉积构造

Fig. 3 Mineral combined forms and sedimentary structures of fine-grained sedimentary rocks from Well LY1 in Dongying sag, Bohai Bay Basin

首先将细粒沉积岩划分为粉砂岩、黏土岩、碳酸盐岩、混合细粒沉积岩 4 大类, 然后结合沉积构造及沉积岩三级命名法(仅考虑到次要矿物含量 25% 的界限)进行细分, 共划分出 9 种细粒沉积岩(表 1), 其中纹层状混合细粒沉积岩、纹层状灰岩、纹层状粉砂质灰岩、纹层状粉砂质黏土岩及块状混合细粒沉积岩在研究区最为发育。

## 2.2 岩石学特征

### 2.2.1 混合细粒沉积岩

混合细粒沉积岩在东营凹陷沙三下一沙四上亚段最为常见, 其黏土矿物、长英质矿物和碳酸盐矿物的含量均小于 45%。根据沉积构造的不同, 进而分为纹层状混合细粒沉积岩和块状混合细粒沉积岩。

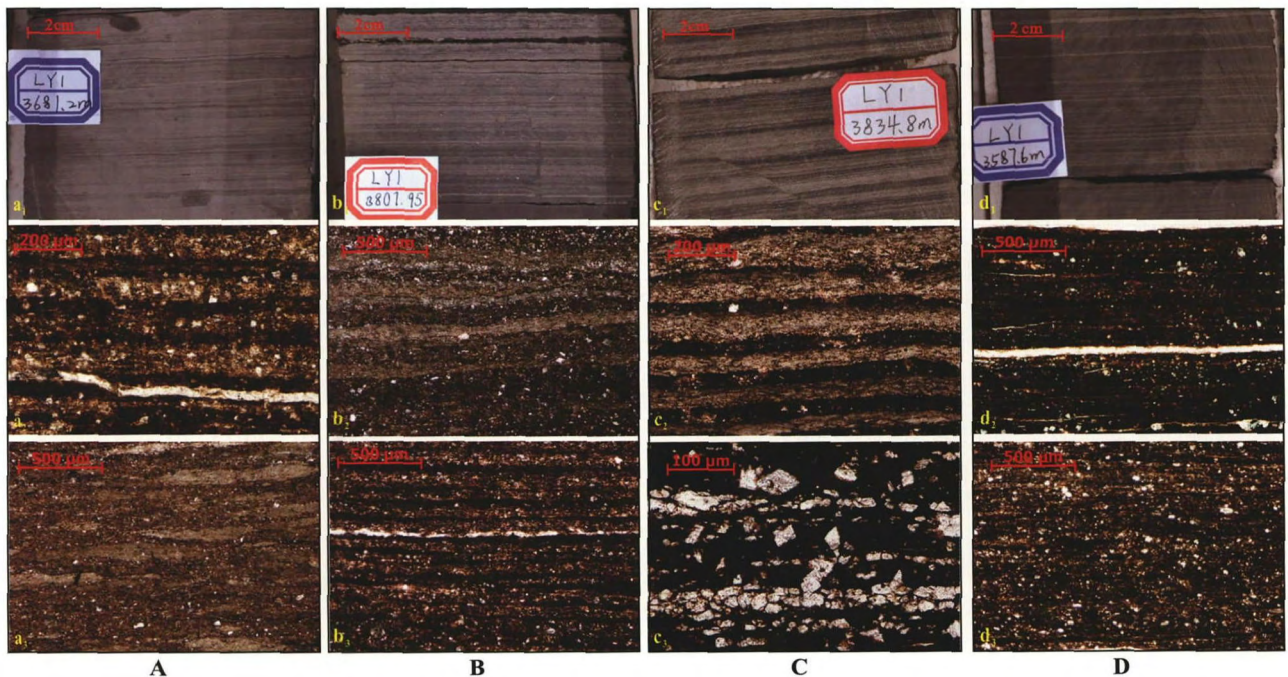
1) 纹层状混合细粒沉积岩(图 4-A)。沙三下一沙四上亚段中发育最广的岩相, 呈褐灰色或深灰色。纹层发育, 其中浅色纹层主要为泥晶方解石, 呈条带状(图 4-A 中 a<sub>2</sub>)或透镜状(图 4-A 中 a<sub>3</sub>), 暗色纹层主要为黏土矿物, 部分富含黑色有机质。该岩相的镜质体反射率 R<sub>0</sub> 值介于 0.51%~

表 1 渤海湾盆地东营凹陷利页 1 井  
沙三下一沙四上亚段细粒沉积岩岩石类型划分  
Table 1 Division of fine-grained sedimentary rocks  
from Well LY1 in Dongying sag, Bohai Bay Basin

三端元分类	次要矿物+三端元分类	沉积构造+次要矿物+三端元分类
混合细粒沉积岩	混合细粒沉积岩	纹层状混合细粒沉积岩 块状混合细粒沉积岩
	灰岩	纹层状灰岩
碳酸盐岩	粉砂质灰岩	纹层状粉砂质灰岩
	黏土质灰岩	纹层状黏土质灰岩
	黏土质白云岩	纹层状黏土质白云岩
黏土岩	灰质黏土岩	纹层状灰质黏土岩
	粉砂质黏土岩	纹层状粉砂质黏土岩
粉砂岩	黏土质粉砂岩	纹层状黏土质粉砂岩

0.84% 之间, 氯仿沥青 A 含量及生烃潜力值(表 2)表明该岩相可作为良好的烃源岩类型, 热演化程度较高, 峰温 T<sub>max</sub> 介于 426~452 °C 之间, 大部分位于主要生油带。

2) 块状混合细粒沉积岩。在沙三下亚段的底部和沙四上亚段的顶部少量出现, 深灰色。整体呈



A—纹层状混合细粒沉积岩, 利页 1 井: a<sub>1</sub>, 3681.20 m; a<sub>2</sub>, 3672.62 m, (-); a<sub>3</sub>, 透镜状泥晶方解石构成断续纹层, 3746.36 m, (-)。B—纹层状粉砂质灰岩, 利页 1 井: b<sub>1</sub>, 3807.95 m; b<sub>2</sub>, 3675.14 m, (-); b<sub>3</sub>, 3665.14 m, (-)。C—纹层状灰岩, 利页 1 井: c<sub>1</sub>, 3834.80 m; c<sub>2</sub>, 3827.20 m, (-); c<sub>3</sub>, 纹层由亮晶方解石层构成, 连续性差, 3662.10 m, (-)。D—纹层状粉砂质黏土岩, NY1: d<sub>1</sub>, 3587.60 m; d<sub>2</sub>, 3661.52 m, (+); d<sub>3</sub>, 纹层边界模糊, 3687.64 m, (-)

图 4 渤海湾盆地东营凹陷细粒沉积岩主要岩相特征

Fig. 4 Characteristics of main lithofacies of fine-grained sedimentary rocks in Dongying sag, Bohai Bay Basin

表 2 渤海湾盆地东营凹陷利页 1 井细粒沉积岩主要类型分析测试数据

Table 2 Analysis test data of main lithofacies of fine-grained sedimentary rocks from Well LY1 in Dingying sag, Bohai Bay Basin

主要岩石类型	样品数 / 个	含量 / %								S1+S2 / mg · g <sup>-1</sup>
		方解石	白云石	石英	斜长石	黏土矿物	黄铁矿	菱铁矿	氯仿沥青 A	
纹层状混合细粒沉积岩	36	10~41	1~16	19~38	2~9	22~44	0~14	0~6	0.74~3.37	5.23~40.42
		26.19	6.35	27.07	4.67	31.81	3.14	0.74	1.78	19.85
块状混合细粒沉积岩	5	24~28	7~9	24~29	5~6	28~37	0~2	0	0.74~1.19	5.85~9.83
		25.33	8.33	26.67	5.67	32.33	1.33	0	0.97	7.24
纹层状粉砂质灰岩	19	33~59	5~12	21~27	2~5	6~26	0~3	0~2	1.49~5.05	11.85~47.10
		42.25	8.33	23.92	3.67	20.08	2.29	0.17	2.44	19.52
纹层状灰岩	17	35~73	2~17	10~19	2~6	7~23	0~4	0	0.85~0.97	8.34~45.92
		58.17	7.14	15.00	3.17	14.67	2	0	0.89	19.06
纹层状粉砂质黏土岩	11	5~18	3~6	20~29	3~8	42~47	1~6	0~2	1.1159	10.14~32.76
		13.75	4.25	26.25	5.50	45.75	3	1	1.1159	21.95

注:  $\frac{10\sim41}{26.19}$  表示含量的  $\frac{\text{最小值}\sim\text{最大值}}{\text{平均值}}$ 。

较为均匀的块状构造。 $R_0$  均值约 0.72%，有机质成熟度高，也可作为较好的烃源岩。

### 2.2.2 纹层状粉砂质灰岩

发育程度仅次于纹层状混合细粒沉积岩，以沙三下亚段和沙四上亚段中部最为密集。碳酸盐含量平均约 52%，长英质矿物含量平均约 28%，黏土矿物含量 6%~25%。主要呈褐灰色，纹层状构造，浅色层主要由泥晶方解石组成，暗色层为粉砂及黏土矿物的混合层(图 4-B 中  $b_2$ )。镜质体反射率平均为 0.63%，峰温  $T_{\max}$  为 436~448 °C，表明有机质成熟度较高且处于热催化生油气阶段，同时氯仿沥青 A 含量及生烃潜力值(表 2) 说明该类岩石可以作为好的烃源岩类型。

### 2.2.3 纹层状灰岩

主要分布在沙四上亚段的底部，少量见于沙三下亚段，大多数呈褐灰色。碳酸盐含量介于 52%~78% 之间，长英质矿物含量多在 20% 左右，黏土矿物含量相对最低，平均约 15%。纹层状构造发育，浅色层多由泥晶方解石构成，也可见方解石粒状晶构成的纹层(图 4-C 中  $c_3$ )，暗色层则以富含有机质的黏土矿物为主，偶见单独的有机质条带。 $R_0$  值约为 0.89%，有机质的成熟度高，是较好的烃源岩类型。

### 2.2.4 纹层状粉砂质黏土岩

主要见于沙三下亚段中下部。黏土矿物含量平均为 47%，长英质矿物含量为 37% 左右，碳酸盐含量大多低于 20%。呈深灰色，纹层状构造，浅色层主要由方解石、石英、长石构成，并可见少量

的黏土矿物，暗色层由黏土矿物及分散分布的有机质共同构成(图 4-D 中  $d_2$ )。氯仿沥青 A 含量为 1.1159%，热演化程度及有机质的成熟度较高。

## 3 沉积环境分析

岩层中元素分配差异不仅受到元素自身物理化学性质的控制，而且受到沉积环境的影响(李春荣和陈开远, 2007)。因此，地球化学元素尤其是特征元素比值的变化特征，能够有效地反映岩石沉积过程中古气候、古水深、古盐度、水体氧化还原性以及陆源输入程度的演化。文中选取东营凹陷利页 1 井 3580~3835 m 深度段的泥页岩，以 0.1~0.3 m 为采样间距，进行岩心实测(由胜利油田地质院石油地质测试中心进行测试)，得到 Ca、Mg、Na、Al、Ti、Fe、Mn、Sr、Ba、V、Ni 等一系列元素含量(分析误差均在 2% 以内)，并据之计算了相应的特征元素比值，以反映沉积环境的变化。

### 3.1 古气候

沉积物中不同的元素会在不同的环境下得以保存，Al、Fe、Cr、Co 等在潮湿的环境下易于保存，而 Na、Ca、Mg、Sr 等则更易于在干燥的条件下沉积(李春荣和陈开远, 2007; 杨万芹等, 2015)，尤其是 Na 含量的增加能较好地反映古气候向干冷发展的趋势(宋春晖等, 2007)；同时，随着气温升高，Mg 元素相对 Ca 元素更容易富集，因此，Na/Al 值和 Ca/Mg 值可以很好地反映沉积物沉积

时的气候条件。 $\text{Na}/\text{Al}$  值升高, 说明气候由暖湿向干冷的转变 (Sawyer, 1986; 吴靖等, 2017), 而  $\text{Ca}/\text{Mg}$  值越高, 则说明古气温降低 (宋春晖等, 2007; 熊小辉和肖加飞, 2011; 杨万芹等, 2015)。东营凹陷沙四上亚段沉积时,  $\text{Na}/\text{Al}$  值和  $\text{Ca}/\text{Mg}$  值整体上均变小, 表明气候由相对寒冷干燥转向暖湿; 到沙三下亚段,  $\text{Na}/\text{Al}$  值和  $\text{Ca}/\text{Mg}$  值进一步呈减小的趋势, 即气候更加温暖湿润 (图 5)。

### 3.2 陆源输入

陆源输入程度的高低常借助  $\text{Al}$ 、 $\text{Ti}$  元素含量进行判别,  $\text{Al}$ 、 $\text{Ti}$  含量越高, 表明陆源碎屑物质输入量越多 (刘刚和周东升, 2007; 熊小辉和肖加飞, 2011; 杨万芹等, 2015)。沙四上亚段沉积初期,  $\text{Al}$  含量介于 3.3%~6.1% 之间,  $\text{Ti}$  含量介于 0.17%~0.31% 之间, 陆源碎屑含量相对较少, 随后陆源输入不断增多并保持相对稳定,  $\text{Al}$  含量达 7.4%~7.7% 之间,  $\text{Ti}$  含量介于 0.36%~0.43% 之间; 沙三下亚段沉积时期陆源碎屑含量整体较高,  $\text{Al}$  含量可达 4.6%~10.2%,  $\text{Ti}$  含量介于 0.26%~0.53% 之间, 在 3632 m 和 3658 m 附近呈现极高值。

### 3.3 古水深

$\text{Fe}/\text{Mn}$  值可用以指示离岸距离的远近, 进而反映沉积时的古水体深度。 $\text{Fe}$  元素易沉积于近岸的环境下, 即其含量高说明水体相对浅, 相反, 稳定性强的  $\text{Mn}$  元素可长距离迁移至远离岸的盆地中, 即其含量越高说明沉积物沉积时水体越深 (陈中红等, 2008), 因此,  $\text{Fe}/\text{Mn}$  值与古水深呈负相关, 比值越大说明沉积时水体深度越小。据前人研究, 东营凹陷沙三下一沙四上亚段沉积时水体深度集中在 10~60 m (杨万芹等, 2015); 沙四上亚段沉积初期水体较深, 随后呈现变浅的趋势, 介于 7~20 m 之间 (苏新等, 2012); 沙三下亚段沉积时期, 平均水深约 50 m (杨万芹等, 2015), 于 3842 m 附近达到最低值, 之后整体上持续增大, 最深可达 140 m (李守军等, 2005)。

### 3.4 古盐度

$\text{Sr}/\text{Ba}$  值是判别水体古盐度的常用指标。 $\text{Sr}$  和  $\text{Ba}$  均可以形成硫酸盐、碳酸盐等进入水溶液, 但  $\text{Sr}$  元素比  $\text{Ba}$  元素的迁移能力强, 其化合物溶解度更低, 随着盐度不断增大,  $\text{Ba}$  元素更易于沉淀析出,

当盐度增大到一定程度时,  $\text{Sr}$  元素才会逐渐沉淀为  $\text{SrSO}_4$  (付亚飞等, 2017; 王峰等, 2017), 因此  $\text{Sr}/\text{Ba}$  值与水体盐度呈明显的正相关, 且通常以  $\text{Sr}/\text{Ba}=1$  作为淡水和咸水的分界值 (张茂盛和胡晓静, 2003)。所测样品的  $\text{Sr}/\text{Ba}$  值多数都大于 1, 表明该井细粒沉积岩整体沉积于咸水介质; 沙四上亚段下部沉积时,  $\text{Sr}/\text{Ba}$  值介于 1.1~4.2 之间, 水体盐度大, 到中上部沉积时,  $\text{Sr}/\text{Ba}$  值介于 0.9~1.8 之间, 水体盐度相对减小; 沙三下亚段沉积时,  $\text{Sr}/\text{Ba}$  值介于 0.8~3.8 之间, 且主要集中在 1.0~2.0 之间, 古盐度在该阶段初期较大, 后期相对较低。

### 3.5 水体氧化还原性

$\text{V}$ 、 $\text{Ni}$  元素的相对含量能敏感地反映水体氧化还原性。水体还原性强,  $\text{V}$  元素迁移能力下降, 相对于  $\text{Ni}$  元素更容易发生吸附沉降 (王淑芳等, 2014; 王峰等, 2017), 故  $\text{V}/(\text{V}+\text{Ni})$  值可以较为准确地指示沉积水体的氧化还原条件。根据前人研究, 该比值小于 0.46 表明水体为氧化环境, 大于 0.46 时为还原条件 (刘庆等, 2017), 且比值越大反映水体还原性越强。 $\text{V}/(\text{V}+\text{Ni})$  值垂向变化 (图 5) 表明, 沙三下一沙四上亚段细粒沉积岩沉积时期研究区整体处于还原环境; 在整个沙四上亚段,  $\text{V}/(\text{V}+\text{Ni})$  值呈现增大趋势, 表明该沉积过程中, 水体还原性不断增强; 沙三下亚段沉积时, 水体  $\text{V}/(\text{V}+\text{Ni})$  值基本在 0.7~1.0 之间波动, 呈较为稳定的还原—强还原条件。

## 4 沉积环境与岩石组合

不同类型岩石沉积时的环境各异, 而环境演化过程中, 每一阶段又可以形成不同类型的岩石组合。明确沉积环境特征及其与岩石类型的对应关系, 有利于进一步理解细粒沉积岩的沉积规律。

### 4.1 环境演化与岩石组合

古沉积环境的各元素判别指标是相互联系、相辅相成的, 例如,  $\text{Ti}$  含量作为陆源输入程度指标, 其高含量也能反映气候温暖湿润 (张茂盛和胡晓静, 2003)。因此, 利用  $\text{Na}/\text{Al}$ 、 $\text{Ca}/\text{Mg}$ 、 $\text{Al}$ 、 $\text{Ti}$ 、 $\text{Fe}/\text{Mn}$ 、 $\text{Sr}/\text{Ba}$ 、 $\text{V}/(\text{V}+\text{Ni})$  等特征元素含量及比值的规律, 笔者将东营凹陷利页 1 井细粒沉积岩的环境演化大致划分为 6 个阶段, 其中沙四上亚段

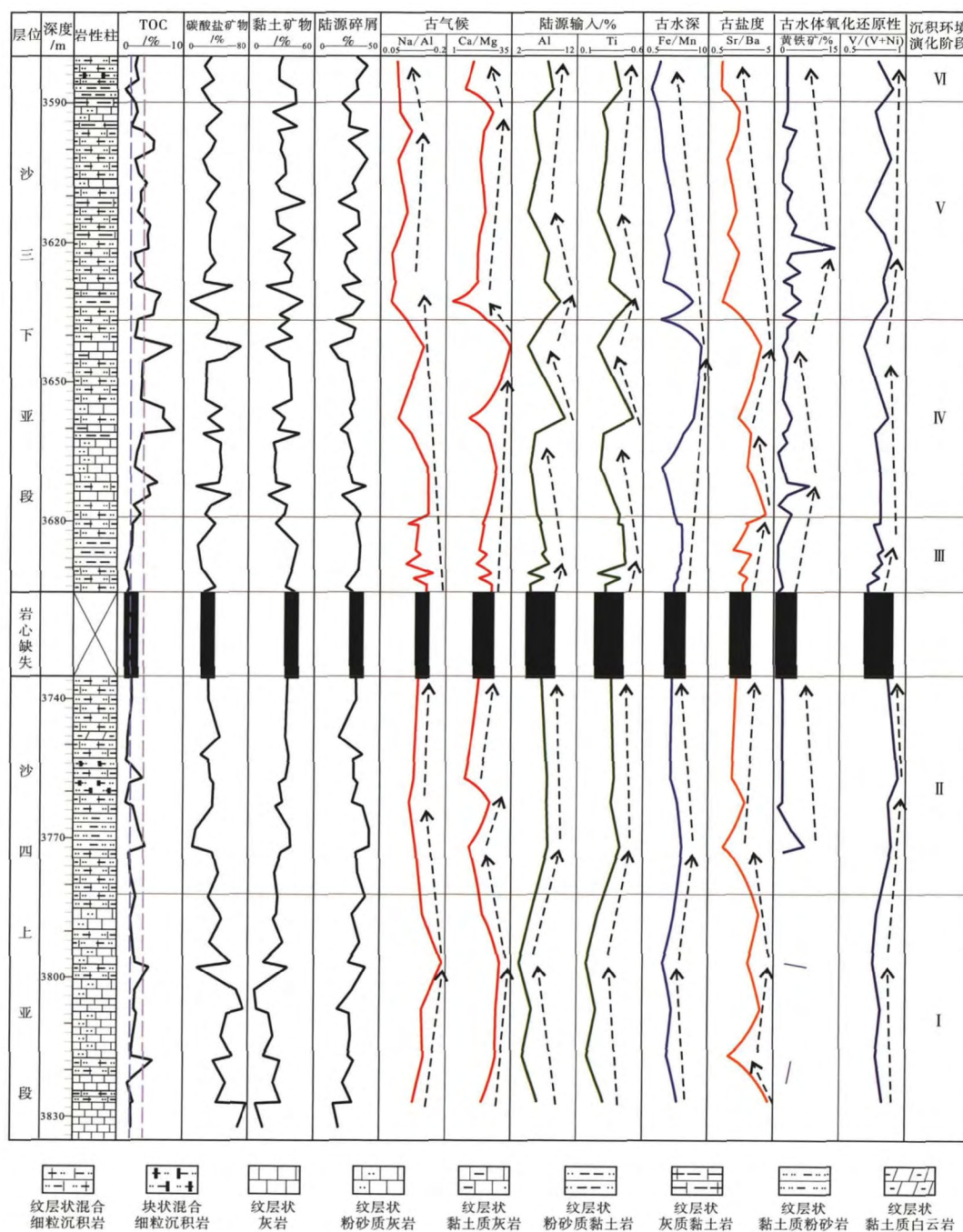


图 5 渤海湾盆地东营凹陷利页 1 井细粒沉积岩沉积环境演化特征

Fig. 5 Sedimentary environment evolution of fine-grained sedimentary rocks from Well LY1 in Dongying sag, Bohai Bay Basin

有 2 个演化阶段，沙三下亚段划分出 4 个演化阶段。

3835~3782 m 为阶段 I，其 Na/Al、Ca/Mg 先增大后减小，整体呈高值，Al 和 Ti 含量低，Fe/Mn 值中等偏低，Sr/Ba 值高，V/(V+Ni) 值基本在 0.8 左右波动，反映该阶段气候较为寒冷干燥，陆源输入程度低，水体呈缺氧条件且水深较

大，受海侵影响，大量咸水注入导致水体盐度异常高（吴靖等，2016）。在这种环境下，纹层状混合细粒沉积岩夹纹层状灰岩—纹层状粉砂质灰岩夹纹层状混合细粒沉积岩的组合得以发育，由于有机质得到较好的保存，岩石颜色向上有所加深。

3782 ~ 3735 m 为阶段 II，该阶段 Na/Al、



Ca/Mg 值均减小, Al、Ti 含量明显增多, Fe/Mn 值先增大后略有减小, Sr/Ba 减小, 呈相对低值, V/(V+Ni) 值进一步增大, 说明这一时期气候变得相对温暖湿润, 陆源输入程度增加。此时海侵结束, 水体环境发生相应变化, 水体深度相对于阶段 I 变浅, 盐度也明显减小并呈波动稳定, 而水体的还原性则达到最强后呈减小的趋势。在这种低盐度的贫氧水体条件下, 碳酸盐矿物含量降低, 而黏土矿物大量出现 (刘庆等, 2017), 且随着陆源碎屑含量的增加以及有机质的减少, 灰黑色灰岩等岩相不再发育 (吴靖等, 2016), 而发育纹层状混合细粒沉积岩—纹层状黏土质粉砂岩—块状混合细粒沉积岩—纹层状混合细粒沉积岩的组合形式, 纹层状黏土质白云岩的沉积则说明当时可能存在较为强烈的蒸发作用。

3685~3680 m 为阶段 III, 该阶段各项元素指标变化甚微, Na/Al 值、Al、Ti 含量与阶段 II 基本相近, Ca/Mg 值、Fe/Mn 值、Sr/Ba 值稍有增大, 而 V/(V+Ni) 值相对减小, 这表明此时气候依然较为湿润, 且仍保持较高的陆源输入量, 气温有所下降, 水体略微变浅, 水体盐度偏小但相对上一阶段稍有增大, 水介质仍然呈还原条件但还原性明显相对减弱。该阶段水体条件与阶段 II 相似, 利于纹层状构造的发育 (刘庆等, 2017), 黏土矿物广泛沉积, 故沉积的岩石组合为纹层状混合细粒沉积岩夹纹层状粉砂质黏土岩。

3680~3627 m 为阶段 IV, 该阶段 Na/Al 值、V/(V+Ni) 值整体上均相对稳定, 浮动较小, Ca/Mg 值持续增大, Al、Ti 含量相对减少, Fe/Mn 值及 Sr/Ba 值明显增大, 此时水体深度不断变浅, 盐度增大, 陆源输入程度稍有降低, 大量雨水的注入利于营养元素进入湖泊, 水体表层生物勃发, 生产力提高, 加之水体分层明显, 有助于有机质的保存 (马义权等, 2017), 因而该阶段 TOC 含量高, 主要发育纹层状粉砂质灰岩—纹层状混合细粒沉积岩夹多种灰岩薄层的组合。

3627~3590 m 为阶段 V, 此时其 Na/Al 值、Ca/Mg 值均明显降低, Al、Ti 含量在底部相对增多, 而后逐渐减少, 但整体上高于上一阶段。Fe/Mn 值呈持续减小的趋势, Sr/Ba 值普遍偏低, V/(V+Ni) 值略微增大并保持相对稳定, 即气候变得相对温暖潮湿, 水体深度不断增加, 介质仍呈

较强的还原性, 陆源碎屑物质输入有所增多, 该时期纹层的发育得益于季节的交替, 而冬季生物大量死亡后, 生物作用的缺乏使得碳酸盐沉淀减少, 陆源碎屑沉淀增多 (梁超, 2015), 黏土矿物富集成层, 因而纹层状粉砂质黏土岩薄层发育, 可见纹层状混合细粒沉积岩夹纹层状灰质黏土岩—纹层状粉砂质灰岩的组合。

3590~3580 m 为阶段 VI, 这一阶段 Ca/Mg 值明显减小, Al、Ti 含量显著增多, 其余各元素指标均保持相对稳定, 指示该时期仍保持潮湿的气候和较深的水体, 而气温明显升高, 陆源输入程度显著增大, 长英质矿物及黏土矿物等陆源碎屑物质大量沉积, 形成了纹层状灰质黏土岩—纹层状粉砂质黏土岩—纹层状混合细粒沉积岩夹块状混合细粒沉积岩的组合。

利页 1 井细粒沉积岩的环境演化具有明显的阶段性特征, 同时, 各环境要素之间相互影响。总的来说, 气候对其他条件的变化起重要的控制作用, 在不受海侵或其他事件影响的情况下, 温暖湿润的气候条件下常伴随大量的陆源碎屑物质输入湖盆中, 而受气候和陆源的影响, 水体深度会显著增大, 进而导致水介质盐度的降低; 相应地, 后者的变化亦能良好地反映前者的特征。

#### 4.2 沉积环境特征与岩石类型

对环境演化的分析表明, 随着气候越来越温暖湿润, 陆源输入量不断增多, 且水体盐度明显降低, 纹层状粉砂质灰岩的沉积越来越少, 逐渐向纹层状混合细粒沉积岩过渡; 由阶段 III 到阶段 IV 的前半部分, 气候干冷程度的增强、陆源输入的进一步减少以及水深的突然加大, 使纹层状粉砂质灰岩得以形成规模沉积; 之后, 气候由干燥寒冷向温暖湿润逐渐转变, 水体深度持续增大, 整体上以纹层状混合细粒沉积岩的沉积为主, 并逐渐可见纹层状灰质黏土岩夹层出现。

总的来说, 纹层状混合细粒沉积岩广泛发育于各种环境下, 相对温暖湿润的气候和陆源输入量的增加更有助于其大规模沉积。纹层状粉砂质黏土岩的沉积同样需要较为温暖湿润的气候和一定程度的陆源碎屑输入背景, 且水体深度较大, 此时水体盐度较低, 内源矿物含量减少, 黏土矿物通过絮凝作用得以沉淀 (刘庆等, 2017); 而纹层状黏土质粉砂岩沉积时, 气候较之更为湿热, 陆源输入量更

多,粉砂质纹层的发育表明该岩相受到了较强的间歇性水流影响 (Schieber, 1989)。当陆源输入程度相对较低,水体盐度较高且阳离子充足时,生物化学作用促使内源碳酸盐矿物大量沉淀,易于灰岩类岩相沉积,纹层状灰岩总体沉积于低能、悬浮的半封闭—封闭水体,表层富氧水体利于生物繁殖,而底层缺氧水体利于有机质的富集和保存 (马义权等, 2017),其纹层状构造的形成主要受季节变化控制,夏季形成浅色泥晶方解石层,冬季悬浮在表层的细粒黏土物质及有机质下沉,形成暗色纹层 (梁超, 2015; 吴靖等, 2016)。

## 5 结 论

1) 以矿物组分含量和沉积构造作为主要依据,渤海湾盆地东营凹陷利页1井沙三下一沙四上亚段细粒沉积岩可划分为9种岩石类型,其中纹层状混合细粒沉积岩、纹层状灰岩、纹层状粉砂质灰岩、纹层状粉砂质黏土岩分布最为广泛。

2) 东营凹陷利页1井细粒沉积岩的沉积环境演化具有阶段性,古气候在沙四上亚段沉积时期经历了干冷—暖湿的演化,在沙三下亚段沉积时期呈现暖湿—相对湿冷—暖湿—相对湿热的变化特征。沙四上亚段的陆源输入量整体上呈由少增多的趋势,沙三下亚段陆源输入量呈较高—减少—增多—减少—增多的旋回变化。水介质在沙三下一沙四上亚段沉积过程中始终呈还原性。

3) 不同类型岩石的沉积环境特征各异,相对温暖湿润的气候和较高的陆源输入量有利于纹层状混合细粒沉积岩和纹层状粉砂质黏土岩的沉积,而纹层状灰岩的沉积反映了水体较浅且陆源输入程度相对较低。

## 参考文献 (References)

陈中红,查明,金强. 2008. 东营凹陷古近系中深层湖盆演化中的无机元素响应. 沉积学报, 26(6): 925-932. [Chen Z H, Zha M, Jin Q. 2008. Mineral elemental response to the evolution of terrestrial brine faulted-basin: A case study in the Paleogene of Well Haoke-1, Dongying Sag. Acta Sedimentologica Sinica, 26(6): 925-932]

付亚飞,邵龙义,张亮,郭双庆,石彪,侯海海,闫晗,宋建军. 2018. 焦作煤田石炭—二叠纪泥质岩地球化学特征及古环境意义. 沉积学报, 36(2): 415-426. [Fu Y F, Shao L Y, Zhang L, Guo S Q, Shi B, Hou H H, Yan H, Song J J. 2018. Geochemical characteristics of mudstones in the Permo-Carboniferous strata of the Jiaozuo

Coalfield and their paleoenvironmental significance. Acta Sedimentologica Sinica, 36(2): 415-426]

姜在兴,梁超,吴靖,张建国,张文昭,王永诗,刘惠民,陈祥. 2013. 含油气细粒沉积岩研究的几个问题. 石油学报, 34(6): 1031-1039. [Jiang Z X, Liang C, Wu J, Zhang J G, Zhang W Z, Wang Y S, Liu H M, Chen X. 2013. Several issues in sedimentological studies on hydrocarbon-bearing fine-grained sedimentary rocks. Acta Petrologica Sinica, 34(6): 1031-1039]

李春荣,陈开远. 2007. 潜江凹陷潜江组元素演化特征及其古气候意义. 石油地质与工程, 21(6): 18-21. [Li C R, Chen K Y. 2007. Evolutional characteristics and their paleoclimate significance of elements in the Qianjiang Formation, Qianjiang Depression. Petroleum Geology and Engineering, 21(6): 18-21]

李守军,郑德顺,姜在兴,胡斌,王金香,焦叶红. 2005. 用介形类优势分异度恢复古湖盆的水深: 以山东东营凹陷古近系沙河街组沙三段湖盆为例. 古地理学报, 7(3): 399-404. [Li S J, Zheng D S, Jiang Z X, Hu B, Wang J X, Jiao Y H. 2005. Water depth of palaeo-lacustrine basin recovered by dominance diversity of Ostracoda: An example from sedimentary period of the Member 3 of Shahejie Formation of Paleogene in Dongying Sag, Shandong Province. Journal of Palaeogeography (Chinese Edition), 7(3): 399-404]

梁超. 2015. 含油气细粒沉积岩沉积作用与储层形成机理. 中国地质大学(北京)博士论文. [Liang C. 2015. The sedimentation and reservoir formation mechanism of hydrocarbon-bearing fine-grained sedimentary rocks. China University of Geosciences (Beijing), Doctoral dissertation]

梁超,吴靖,姜在兴,操应长,刘淑君,逢淑伊. 2017. 有机质在页岩沉积成岩过程及储层形成中的作用. 中国石油大学学报(自然科学版), 41(6): 1-9. [Liang C, Wu J, Jiang Z X, Cao Y C, Liu S J, Pang S Y. 2017. Significances of organic matters on shale deposition diagenesis process and reservoir formation. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 41(6): 1-9]

刘刚,周东升. 2007. 微量元素分析在判别沉积环境中的应用: 以江汉盆地潜江组为例. 石油实验地质, 29(3): 307-310. [Liu G, Zhou D S. 2007. Application of trace element analysis in distinguishing sedimentary environment: A case study of Qianjiang Formation in Jiangnan Basin. Petroleum Geology & Experiment, 29(3): 307-310]

刘庆,曾翔,王学军,蔡进功. 2017. 东营凹陷沙河街组沙三下一沙四上亚段泥页岩岩相与沉积环境的响应关系. 海洋地质与第四纪地质, 37(3): 147-156. [Liu Q, Zeng X, Wang X J, Cai J G. 2017. Lithofacies of mudstones and shale deposits of the Es<sup>3</sup>-Es<sup>4</sup> Formation in Dongying Sag and their depositional environment. Marine Geology & Quaternary Geology, 37(3): 147-156]

马义权,杜学斌,刘惠民,陆永潮. 2017. 东营凹陷沙四上亚段陆相页岩岩相特征、成因及演化. 地球科学, 42(7): 1195-1208. [Ma Y Q, Du X B, Liu H M, Lu Y C. 2017. Characteristics, depositional processes and evolution of shale lithofacies of the upper submember of Es<sub>4</sub> in the Dongying Depression. Earth Science, 42(7): 1195-1208]

宋春晖,鲁新川,邢强,孟庆泉,夏伟民,刘平,张平. 2007. 临夏盆地晚新生代沉积物元素特征与古气候变迁. 沉积学报, 25(3): 409-416. [Song C H, Lu X C, Xing Q, Meng Q Q, Xia W M, Liu

- P Zhang P. 2007. Late Cenozoic element characters and palaeoclimatic change of the lacustrine sediments in Linxia Basin, China. *Acta Sedimentologica Sinica*, 25(3): 409-416]
- 苏新, 丁旋, 姜在兴, 胡斌, 孟美岑, 陈萌莎. 2012. 用微体古生物定量水深法对东营凹陷沙四上亚段沉积早期湖泊水深再造. *地学前缘*, 19(1): 188-199. [Su X, Ding X, Jiang Z X, Hu B, Meng M C, Chen M S. 2012. Using of multi-microfossil proxies for reconstructing quantitative paleo-water depth during the deposit period of LST of Es<sub>4</sub> in Dongying Depression. *Earth Science Frontiers*, 19(1): 188-199]
- 王峰, 刘玄春, 邓秀芹, 李元昊, 田景春, 李士祥. 2017. 鄂尔多斯盆地纸坊组微量元素地球化学特征及沉积环境指示意义. *沉积学报*, 35(6): 1265-1273. [Wang F, Liu X C, Deng X Q, Li Y H, Tian J C, Li S X. 2017. Geochemical characteristics and environmental implications of trace elements of Zhifang Formation in Ordos Basin. *Acta Sedimentologica Sinica*, 35(6): 1265-1273]
- 王淑芳, 董大忠, 王玉满, 黄金亮, 蒲泊伶. 2014. 四川盆地南部志留系龙马溪组富有机质页岩沉积环境的元素地球化学判别指标. *海相油气地质*, 73(3): 27-34. [Wang S F, Dong D Z, Wang Y M, Huang J L, Pu B L. 2014. Geochemistry evaluation index of red-ox-sensitive elements for depositional environments of Silurian Longmaxi organic-rich shale in the south of Sichuan Basin. *Marine Origin Petroleum Geology*, 73(3): 27-34]
- 吴靖, 姜在兴, 童金环, 杨璐, 李积, 聂海宽. 2016. 东营凹陷古近系沙河街组四段上亚段细粒沉积岩沉积环境及控制因素. *石油学报*, 37(4): 464-473. [Wu J, Jiang Z X, Tong J H, Yang L, Li J, Nie H K. 2016. Sedimentary environment and control factors of fine-grained sedimentary rocks in the upper fourth Member of Paleogene Shahejie Formation, Dongying Sag. *Acta Petrolei Sinica*, 37(4): 464-473]
- 吴靖, 姜在兴, 梁超. 2017. 东营凹陷沙河街组四段上亚段细粒沉积岩岩相特征及与沉积环境的关系. *石油学报*, 38(10): 1110-1122. [Wu J, Jiang Z X, Liang C. 2017. Lithofacies characteristics of fine-grained sedimentary rocks in the upper submember of Member 4 of Shahejie Formation, Dongying Sag and their relationship with sedimentary environment. *Acta Petrolei Sinica*, 38(10): 1110-1122]
- 熊小辉, 肖加飞. 2011. 沉积环境的地球化学示踪. *地球与环境*, 39(3): 405-414. [Xiong X H, Xiao J F. 2011. Geochemical indicators of sedimentary environments: A summary. *Earth and Environment*, 39(3): 405-414]
- 徐守余, 李学艳. 2005. 胜利油田东营凹陷中央隆起带断层封闭模式研究. *地质力学学报*, 11(1): 19-24. [Xu S Y, Li X Y. 2005. Fault seal model of the central uplift, Dongying Depression. *Journal of Geomechanics*, 11(1): 19-24]
- 杨万芹, 蒋有录, 王勇. 2015. 东营凹陷沙三下一沙四上亚段泥页岩岩相沉积环境分析. *中国石油大学学报(自然科学版)*, 39(4): 19-26. [Yang W Q, Jiang Y L, Wang Y. 2015. Study on shale facies sedimentary environment of lower Es<sub>3</sub>-upper Es<sub>4</sub> in Dongying Sag. *Journal of China University of Petroleum(Natural Science Edition)*, 39(4): 19-26]
- 姚益民, 徐道一, 张海峰, 韩延本, 张守鹏, 尹志强, 李宝利, 何青芳, 边雪梅. 2007. 山东东营凹陷新生代天文地层表简介. *地层学杂志*, 31(s2): 423-429. [Yao Y M, Xu D Y, Zhang H F, Han Y B, Zhang S P, Yin Z Q, Li B L, He Q F, Bian X M. 2007. A brief introduction to the Cenozoic astrographic time scale for the Dongying Depression, Shandong. *Journal of Stratigraphy*, 31(s2): 423-429]
- 张茂盛, 胡晓静. 2003. 微量元素在地质沉积环境中的应用. *广西师范大学学报(自然科学版)*, 21(z3): 80-81. [Zhang M S, Hu X J. 2003. Application of trace elements in geological and sedimentary environment. *Journal of Guangxi Normal University(Natural Science Edition)*, 21(z3): 80-81]
- 张顺, 陈世悦, 鄢继华, 谭明友, 张云银, 龚文磊, 王光增. 2015. 东营凹陷西部沙三下亚段一沙四上亚段泥页岩岩相及储层特征. *天然气地球科学*, 26(2): 320-332. [Zhang S, Chen S Y, Yan J H, Tan M Y, Zhang Y Y, Gong W L, Wang G Z. 2015. Characteristics of shale lithofacies and reservoir space in the 3<sup>rd</sup> and 4<sup>th</sup> members of Shahejie Formation, the west of Dongying sag. *Natural Gas Geoscience*, 26(2): 320-332]
- 周立宏, 蒲秀刚, 邓远, 陈世悦, 鄢继华, 韩文中. 2016. 细粒沉积岩研究中几个值得关注的问题. *岩性油气藏*, 28(1): 6-15. [Zhou L H, Pu X G, Deng Y, Chen S Y, Yan J H, Han W Z. 2016. Several issues in studies on fine-grained sedimentary rocks. *Lithologic Reservoirs*, 28(1): 6-15]
- Aplin A C, Macquaker J H S. 2011. Mudstone diversity: Origin and implications for source seal and reservoir properties in petroleum systems. *AAPG Bulletin*, 95(12): 2031-2059.
- Liang C, Jiang Z X, Cao Y C, Wu M H, Guo L, Zhang C M. 2016. Deep-water depositional mechanisms and significance for unconventional hydrocarbon exploration: A case study from the Lower Silurian Longmaxi shale in the southeastern Sichuan Basin. *AAPG Bulletin*, 100(5): 773-794.
- Liang C, Cao Y C, Jiang Z X, Wu J, Song G Q, Wang Y S. 2017. Shale oil potential of lacustrine black shale in the Eocene Dongying Depression: Implications for geochemistry and reservoir. *AAPG Bulletin*, 101(11): 1835-1858.
- Liang C, Jiang Z X, Cao Y C, Wu J, Wang Y S, Hao F. 2018. The sedimentary characteristics and origin of lacustrine organic-rich shale in the salinized Eocene Dongying Depression. *GSA Bulletin*, 130(1/2): 154-174.
- Macquaker J H S, Adams A E. 2003. Maximizing information from fine-grained sedimentary rocks: An inclusive nomenclature for mudstones. *Journal of Sedimentary Research*, 73(5): 735-744.
- Sawyer E W. 1986. The influence of source rock type, chemical weathering and sorting on the geochemistry of clastic sediments from the Quetico Metasedimentary Belt, Superior Province, Canada. *Chemical Geology*, 55(1-2): 77-95.
- Schieber J. 1989. Facies and origin of shales from the mid-Proterozoic Newland Formation, Belt Basin, Montana, USA. *Sedimentology*, 36(2): 203-219.
- Schieber J, Zimmerle W, Sethi P V. 1998. Shales and Mudstones (Vol. 1): Basin Studies, Sedimentology and Paleontology. Stuttgart: Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, 1-10.

(责任编辑 张西娟)