

·油气地质·

## 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

刘惠民<sup>1</sup>, 孙善勇<sup>2\*</sup>, 操应长<sup>2</sup>, 梁超<sup>2</sup>, 张春池<sup>3</sup>

(1.中国石化胜利油田分公司勘探开发研究院, 山东 东营 257015; 2.中国石油大学(华东)地球科学与技术学院, 山东 青岛 266580; 3.山东省地质调查院, 山东 济南 250013)

**摘要:**综合运用岩心观察、薄片鉴定、X衍射和扫描电镜等分析方法,对东营凹陷沙三段下亚段细粒沉积岩矿物组成、沉积构造和纹层类型及成因进行精细刻画,在此基础上建立细粒沉积岩岩相划分方案,并以樊页1井沙三段下亚段为例分析其岩相垂向演化特征。东营凹陷沙三段下亚段细粒沉积岩具有矿物组成复杂多变、受底流微弱改造作用频繁及纹层类型丰富的特点。参考矿物组成和沉积构造,研究区发育11种岩相类型,其中平直纹层粘土岩相、夹层灰岩相、平直纹层灰岩相、不平直纹层灰岩相、平直纹层混合岩相、不平直纹层混合岩相和块状混合岩相是最为发育的7种岩相类型,不同岩相发育环境差异性明显。细粒沉积岩岩相分布模式受古水深和古气候综合控制,在气候干冷、深水还原环境下主要发育平直纹层粘土岩相;气候由于冷向暖湿转变时形成夹层灰岩相;在气候半暖湿的广阔深湖环境下发育平直纹层灰岩相;在气候最为暖湿时期,底流发育,形成不平直纹层灰岩相;随着水深减小,水体分层不稳定,加之气候逐渐干冷,形成平直纹层混合岩相,若底流发育,则形成不平直纹层混合岩相;在半氧化一半还原的浅湖环境下发育块状混合岩相。

**关键词:**细粒沉积岩 岩相 沉积环境 分布模式 东营凹陷

中图分类号:TE111.3

文献标识码:A

文章编号:1009-9603(2017)01-0001-010

DOI:10.13673/j.cnki.cn37-1359/te.2017.01.001

## Lithofacies characteristics and distribution model of fine-grained sedimentary rock in the lower Es<sub>3</sub> member, Dongying sag

Liu Huimin<sup>1</sup>, Sun Shanyong<sup>2\*</sup>, Cao Yingchang<sup>2</sup>, Liang Chao<sup>2</sup>, Zhang Chunchi<sup>3</sup>

(1. Research Institute of Exploration and Development, Shengli Oilfield Company, SINOPEC, Dongying City, Shandong Province, 257015, China; 2. School of Geosciences, China University of Petroleum (East China), Qingdao City, Shandong Province, 266580, China; 3. Institute of Geological Survey, Jinan City, Shandong Province, 250013, China)

**Abstract:** Combining core description, thin sections analysis, whole-rock X-ray diffraction and scanning electron microscopy technologies, the characteristics of mineral composition of fine-grained sedimentary rocks, sedimentary structure and laminations in the lower Es<sub>3</sub> member in the Dongying sag were described in detail, by which lithofacies of fine-grained rocks were classified and their vertical evolution characteristics were analyzed using a case from the lower Es<sub>3</sub> member drilled by Well FY1. The results show that the fine-grained rocks in the lower Es<sub>3</sub> member is characterized by complex and variable mineral composition, frequent and weak bottom current reworking and abundant laminations. Based on the mineral composition and sedimentary structure, there are eleven types of lithofacies in the study area, and seven of them are mainly developed, which are parallel-laminated clay stone, interbedded calcareous limestone, parallel-laminated limestone, non-parallel-laminated limestone, parallel-laminated mixed sedimentary rock, nonparallel-laminated mixed sedimentary rock

收稿日期:2016-10-09。

作者简介:刘惠民(1969—),男,山东寿光人,教授级高级工程师,博士,从事油气勘探研究与管理工。联系电话:(0546)8716765, E-mail:hmliu@vip.163.com。

\*通讯作者:孙善勇(1992—),男,山东德州人,在读硕士研究生。联系电话:13013567520, E-mail:bmhssy1992@163.com。

基金项目:国家“973”计划“陆相页岩油储集空间与发育模式”(2014CB239102),国家科技重大专项“济阳坳陷页岩油勘探开发目标评价”(2017ZX05049-004),山东省地质勘查项目“山东省页岩气成矿条件研究和资源潜力预测”(鲁勘字(2013)1号)。

and massive mixed sedimentary rock. Their development environment are different obviously. The distribution of fine sedimentary facies is controlled by paleo-water depth and paleoclimate. The parallel-laminated clay stone are developed mainly in deep water in dry and cold reducing environment. Interbedded limestone develops when the paleoclimate changes from dry and cold to warm and wet. Parallel-laminated limestone develops in wide and deep water when the paleoclimate is semi-warm and wet. Nonparallel-laminated limestone develops when the paleoclimate becomes the warmest and wettest and the bottom current develops. Parallel-laminated mixed sedimentary rock develops when the water becomes shallower with unstable water delimitation and the paleoclimate becomes drier and colder. And the nonparallel-laminated mixed sedimentary rock will develop if there are bottom current. The massive mixed sedimentary rock develops in semi oxidation and reduction environment.

**Key words:** fine-grained sedimentary rocks; lithofacies; sedimentary environment; distribution model; Dongying sag

细粒沉积岩是指由粒径小于 $62.5\ \mu\text{m}$ 的粘土级和粉砂级沉积物组成的沉积岩<sup>[1]</sup>。20世纪70年代,东营凹陷河54井在沙三段下亚段细粒沉积岩层段试油,产油量为 $91.4\ \text{t/d}$ ,表明东营凹陷沙三段下亚段细粒沉积岩蕴含丰富的油气资源<sup>[2-3]</sup>。由于湖相深水细粒沉积岩矿物组成复杂,沉积构造具有微观多样性,纹层类型丰富,并且沉积时经常受到周期性底流的影响<sup>[4-9]</sup>,当前岩相划分方案<sup>[10-12]</sup>不能准确反映其岩石学特征,严重制约了对其沉积规律的认识。

东营凹陷属于渤海湾盆地三级负向构造单元,整体上表现出北断南超、北深南浅的箕状结构<sup>[13-15]</sup>。在沙三段下亚段沉积时期,盆地迅速裂陷,为欠补偿的闭流湖—敞流湖<sup>[16]</sup>,由于受到气候因素的影响,湖水时升时降,水体随之收缩和扩张,引发沉积物有规律变化,沉积了一套垂向上岩性频繁变化的细粒沉积岩。参考前人研究成果<sup>[1]</sup>,综合考虑矿物组成及沉积构造,笔者提出了东营凹陷沙三段下亚段细粒沉积岩岩相划分方案,结合地化参数,分析了主要岩相特征及发育环境;在此基础上,以樊页1井为例,明确岩相垂向演化特征,并建立了岩相分布模式。

## 1 岩相划分依据

### 1.1 矿物组成特征

东营凹陷沙三段下亚段细粒沉积岩矿物成分以方解石、粘土矿物和石英为主,白云石和长石次之,此外还有少量黄铁矿、菱铁矿和硬石膏等(图1)。方解石含量平均为38%,以泥微晶和柱状晶为主,呈纹层状或与其他矿物混合分散产出(图1a-1c),少量以生物壳体或碎屑形式存在。粘土矿物含量平均为24%,含量低于海相泥岩和传统观点,这可能与湖盆面积相对较小且近物源有关<sup>[10]</sup>,以伊利石和伊/蒙混层为主,顺层产出(图1d)或分布于矿物

颗粒间(图1e);随着混入有机质含量的增加,颜色逐渐加深。石英含量平均为24%,以微晶石英和颗粒石英形式存在,微晶石英直径一般为几微米,呈自形被粘土矿物包裹(图1f),颗粒石英形状不规则,呈星散状分布(图1g)。白云石含量平均为7%,以泥微晶(图1h)和自生白云石(图1i)为主,泥微晶白云石呈块状或纹层状产出,自生白云石呈孤立状。长石含量平均为3%,以斜长石为主(图1j),可见少量钾长石,钾长石边缘不规则,常被碳酸盐矿物交代(图1k),分散分布于粘土层中。黄铁矿含量平均为3%,分布广泛,一般以草莓状、球状产出(图1l),顺层分布,另外可见零星分布的自形黄铁矿。总体来说,研究区细粒沉积岩矿物类型丰富、产出状态多样、相对含量极为多变,体现了陆相湖盆细粒沉积岩矿物组成复杂多变的特征。

### 1.2 沉积构造特征

沉积构造可以反映细粒沉积岩的成因和沉积环境。东营凹陷沙三段下亚段细粒沉积岩的沉积构造以水平层理(图2a—2d)和块状构造(图2e)为主,还可见砂纹交错层理、波状交错层理、冲刷面(图2f)、变形构造和生物扰动等(图2g),整体厚度不大,但频繁出现,反映深湖—半深湖区常受到较强水动力的影响。

早期简单地认为水平层理为单一季节性悬浮的结果,表现为近似平行的薄层,反映底层水循环完全停滞的深水缺氧环境;但是笔者根据对研究区大量岩心和薄片观察发现,大量水平层理的纹层形态表现为波状或透镜状。Schieber等通过水槽实验证实,在一定的水流流速下会形成透镜状的絮凝物波纹<sup>[9]</sup>,表明安静水体环境下的缓慢悬浮沉积经常受到微弱水动力冲刷的影响<sup>[4-8]</sup>。水平层理2种不同的纹层形态反映了2种不同的微环境,据此将水平层理细分为平直纹层水平层理(简称平直纹层)(图2a,2b)和不平直纹层水平层理(简称不平直纹层)(图2c,2d)。另外,研究区可见柱状方解石夹于

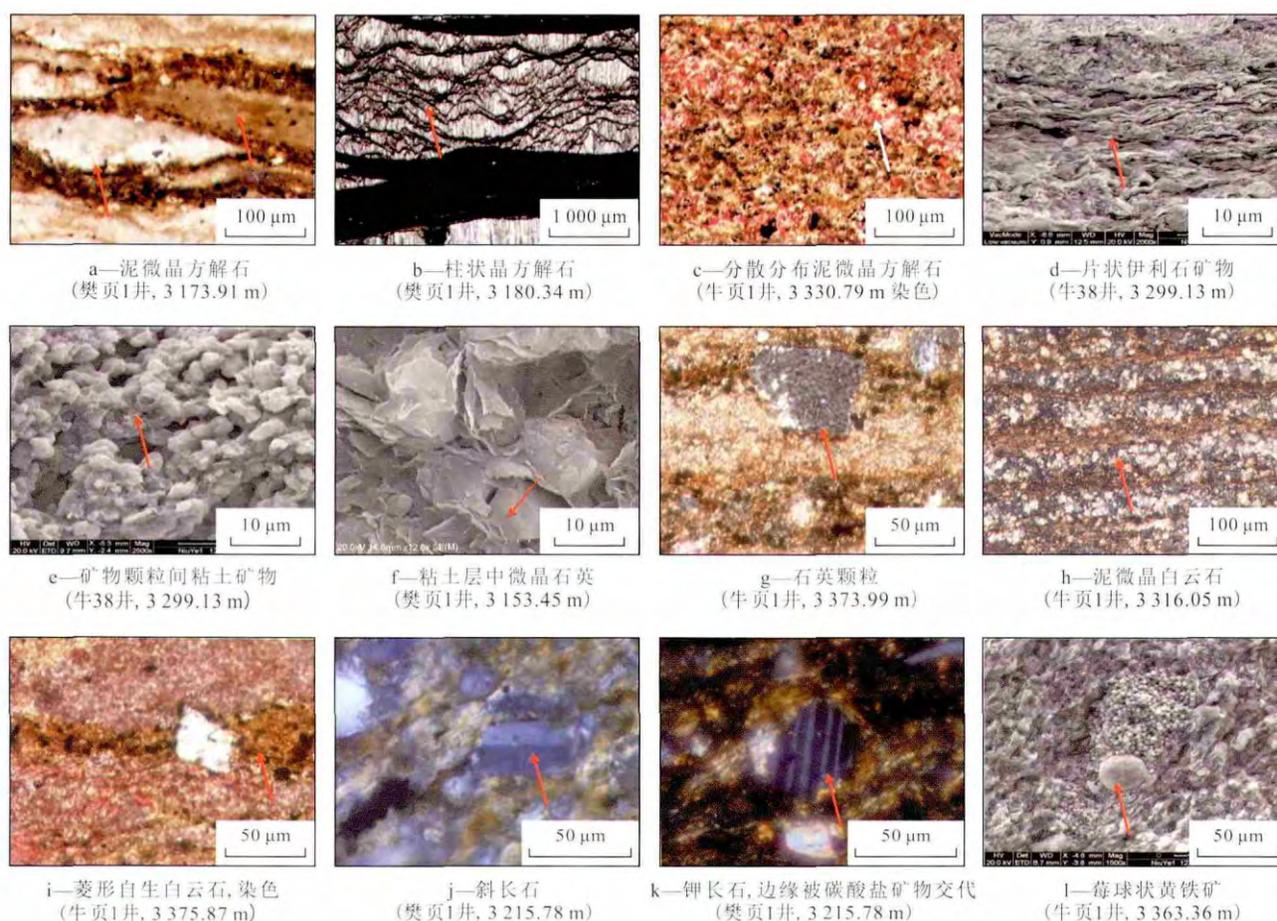


图1 东营凹陷沙三段下亚段细粒沉积岩矿物组成特征

Fig.1 Characteristics of mineral composition of fine-grained sedimentary rocks in the lower Es<sub>3</sub> member, Dongying sag

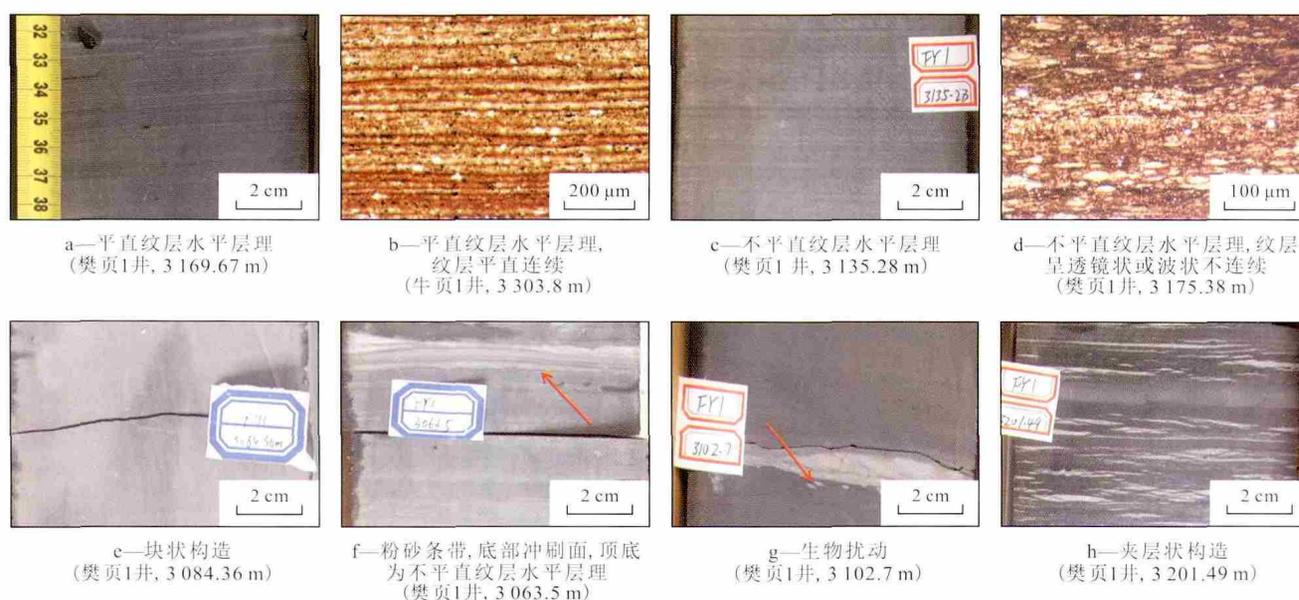


图2 东营凹陷沙三段下亚段细粒沉积岩沉积构造特征

Fig.2 Characteristics of sedimentary structure of fine-grained sedimentary rocks in the lower Es<sub>3</sub> member, Dongying sag

暗色泥岩中,参考前人研究<sup>[10]</sup>,将该特殊的沉积构造命名为夹层状构造(图2h)。

### 1.3 纹层类型及成因

东营凹陷沙三段下亚段细粒沉积岩水平层理

极为发育,通过镜下观察,总结出5种基本的纹层类型,即泥微晶方解石纹层、柱状晶方解石纹层、粘土纹层、富有机质粘土纹层和混合纹层(图3),其在纹层厚度、矿物组成、镜下特征和成因等方面均不相

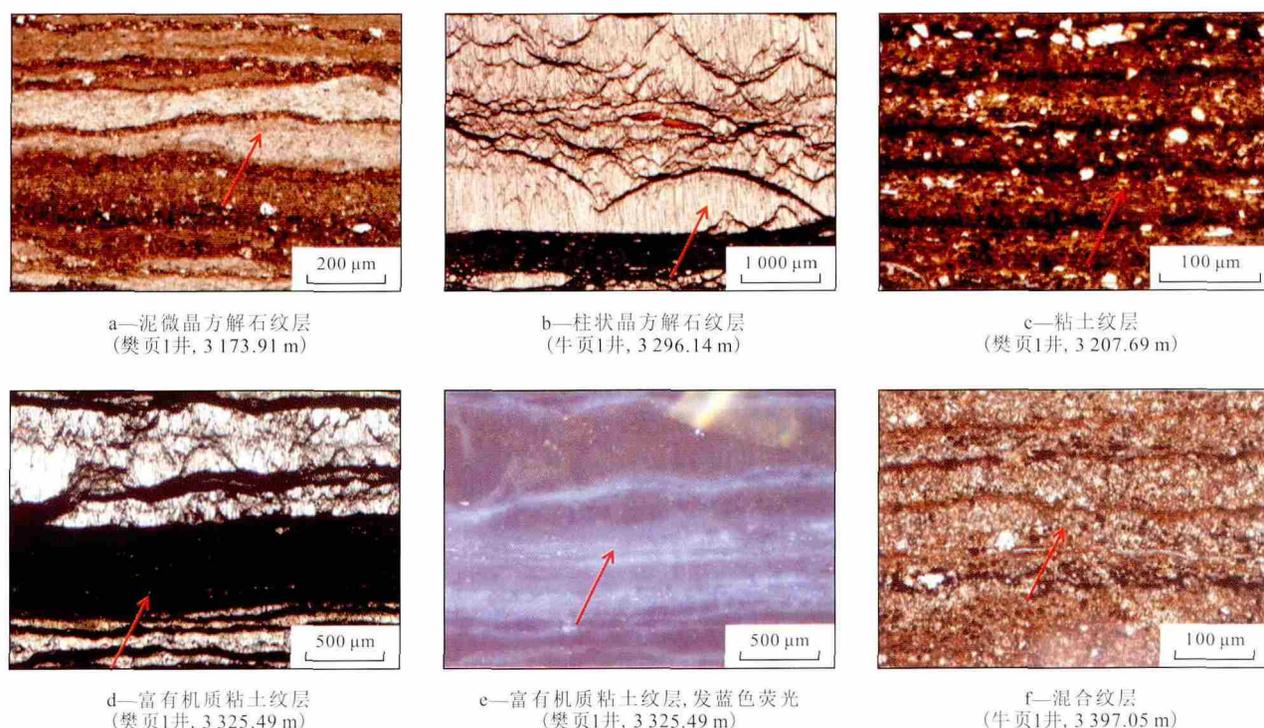


图3 东营凹陷沙三段下亚段细粒沉积岩不同类型纹层特征

Fig.3 Characteristics of different laminations of fine-grained sedimentary rocks in the lower Es<sub>3</sub> member, Dongying sag

同。

**泥微晶方解石纹层** 泥微晶方解石纹层厚度为80~100 μm,由泥微晶方解石组成,呈平直状、微波状或透镜状(图3a)。浮游生物的勃发消耗掉表层水中的CO<sub>2</sub>,引发CaCO<sub>3</sub>沉淀,从而形成泥微晶方解石纹层,另外该纹层中可见大量钙质超微化石堆叠在一起<sup>[17]</sup>。因此该纹层可能为生物或生物—化学作用的产物。

**柱状晶方解石纹层** 柱状晶方解石纹层厚度可达数厘米,主要由柱状晶方解石组成,垂向生长,内部十分洁净,呈夹层状分布于富有机质粘土纹层中<sup>[10]</sup>(图3b)。该纹层常与富有机质粘土纹层伴生,其形成可能与有机质的演化过程有关,在有机质埋藏演化过程中,产生大量有机酸冲洗泥晶方解石中的Mg<sup>2+</sup>,同时生烃产生的高压裂缝为晶粒提供生长空间,使得碳酸盐泥晶发生重结晶形成柱状晶。

**粘土纹层** 粘土纹层厚度为50~100 μm,由粘土矿物组成,由于混含少量有机质,单偏光下为棕褐色(图3c),在正交光下连片消光,具统一的消光位,表明其沉积速率极为缓慢<sup>[8]</sup>。其形成可能与物源周期性向湖盆进积有关<sup>[18]</sup>。

**富有机质粘土纹层** 富有机质粘土纹层厚度较薄,一般小于50 μm,主要由大量有机质、伊利石以及少量黄铁矿等组成,有机质分散在粘土矿物间,为红褐色—黑色(图3d,3e)。刘传联等通过透

射电镜观察发现,该纹层含有大量的沟鞭藻化石以及无定形有机质<sup>[17]</sup>。该纹层主要是在湖盆缺乏陆源碎屑输入时<sup>[6]</sup>,在闭塞分层的强还原—还原水体环境下,由藻类大量死亡缓慢沉淀而成<sup>[18]</sup>。

**混合纹层** 混合纹层厚度为50~100 μm,主要由长英质、粘土和泥微晶方解石等多种矿物混合形成,呈平直状或微波状(图3f),单偏光下呈浅色。其是在水体分层变差、细粒物质供给充分的情况下,由悬浮物未经充分分选快速沉积而形成<sup>[19]</sup>。

## 2 岩相划分及特征

### 2.1 岩相划分方案

细粒沉积岩由于颗粒细小、矿物组成复杂多样、结构构造更加微观且形成机制尚不明确,使其岩相划分方案至今难以确定。笔者认为细粒沉积岩岩相划分需要满足3个原则:①要有清晰的分类标准,且依据充分;②要对细粒沉积岩成因机制的分析有一定的指导意义;③实用性强,不建议引入过多的分类指标,以保证岩相命名简单不繁琐。

矿物成分是陆源输入—沉积作用及(生物)化学作用共同作用的结果,是造成细粒沉积岩岩石类型多样性的根本因素,是构成岩相的物质基础<sup>[12]</sup>。沉积构造可反映沉积物的输入、沉积界面的能量强弱,是对沉积过程的直接反映<sup>[5,11]</sup>。另外,由于水动

力强弱会间接影响有机质的保存,所以沉积构造对于指导细粒沉积岩油气勘探开发具有重要意义。参考前人研究成果<sup>[1]</sup>,综合考虑矿物成分及沉积构造,以长英质矿物、粘土矿物和碳酸盐矿物三端元各自含量50%为界,将细粒沉积岩分为碳酸盐岩、粘土岩、粉砂岩和混合岩,其中碳酸盐岩可根据方解石和白云石的相对含量,分为灰岩和云岩;然后参考沉积构造进一步细分。按照上述岩相划分方

案,在研究区共识别出11种岩相类型(表1)。

### 2.2 岩相特征及发育环境

东营凹陷沙三段下亚段主要发育平直纹层粘土岩相、夹层灰岩相、平直纹层灰岩相、不平直纹层灰岩相、平直纹层混合岩相、不平直纹层混合岩相以及块状混合岩相等7种岩相。根据岩相特征,结合地化参数特征(表2),对不同岩相发育环境进行探讨。

表1 东营凹陷沙三段下亚段细粒沉积岩岩相综合分类方案  
Table1 Comprehensive classification and naming scheme of lithofacies for fine-grained sedimentary rocks in the lower E<sub>3s</sub> member, Dongying sag

岩石类型	矿物成分	沉积构造	岩相类型	基本特征
碳酸盐岩	碳酸盐含量大于等于50%,以方解石为主;长英质+粘土矿物含量小于50%	夹层状	夹层灰岩相	白色柱状方解石纹层+黑色富有机质粘土纹层
		平直纹层	平直纹层灰岩相	浅色方解石纹层+灰黑色富有机质粘土纹层
	不平直纹层	不平直纹层灰岩相	浅色不平直方解石纹层+深灰色粘土纹层	
	块状	块状灰岩相	整体呈灰色,均匀块状,质硬	
粘土岩	碳酸盐含量大于等于50%,以白云石为主;长英质+粘土矿物含量小于50%	块状	块状云岩相	整体呈灰色,均匀块状,质硬
		平直纹层	平直纹层粘土岩相	黑色,富有机质粘土纹层+粘土纹层
粉砂岩	长英质含量大于等于50%,粘土矿物+碳酸盐含量小于50%	块状	块状粘土岩相	灰色—深灰色,均匀块状,质软
			粉砂岩相	灰白色,多以粉砂条带状产出
混合岩	粘土矿物、长英质以及碳酸盐含量均不超过50%	平直纹层	平直纹层混合岩相	灰色,泥微晶方解石纹层+混合纹层
		不平直纹层	不平直纹层混合岩相	浅灰色,不平直泥微晶方解石纹层+混合纹层
		块状	块状混合岩相	浅灰色,均匀块状,质地中等

表2 东营凹陷沙三段下亚段细粒沉积岩岩相地球化学特征及沉积环境(样品数为25)  
Table2 Geochemical characteristics and sedimentary environment of lithofacies for fine-grained sedimentary rocks in the lower E<sub>3s</sub> member, Dongying sag (sample number: 25)

岩相类型	古气候参数 (平均值)		古水深及还原性 参数(平均值)			沉积环境 综合判别
	Na/Al	古气候指数 <sup>[20]</sup>	TOC, %	U/Th	V/(V+Ni)	
平直纹层粘土岩相	0.143	0.105	5.6	1.25	0.7	气候干冷、深水还原环境
夹层灰岩相	0.129	0.153	4.7	1.12	0.73	气候半干冷、深水还原环境
平直纹层灰岩相	0.112	0.324	3.7	0.95	0.67	气候半暖湿、深水还原环境
不平直纹层灰岩相	0.095	0.687	2.8	0.82	0.59	气候暖湿、深水半还原环境
平直纹层混合岩相	0.103	0.436	3.1	0.76	0.61	气候半暖湿、半深水半还原环境
不平直纹层混合岩相	0.101	0.402	2.5	0.73	0.52	气候半干冷、半深水半还原环境
块状混合岩相	0.123	0.117	1.9	0.69	0.47	气候干冷、浅水半氧化—半还原环境

平直纹层粘土岩相 该岩相岩心呈黑色,硬度较小,纹层平直,随着有机质含量的增多,纹层肉眼逐渐难以识别,表现为模糊纹层(图4a)。镜下可见其由富有机质粘土纹层和粘土纹层组成,前者呈深褐色,后者为浅褐色,纹层界线平直且清晰,偶可

见丰富的莓球状黄铁矿,近顺层分布,证明湖水闭塞,底流不发育。还可见零星长英质碎屑,分散于纹层中,可能为风成粉砂(图4b)。平直纹层粘土岩相矿物组成以粘土矿物为主,表明气候干冷、湖水较深,远离物源区;富有机质粘土纹层发育,表明存

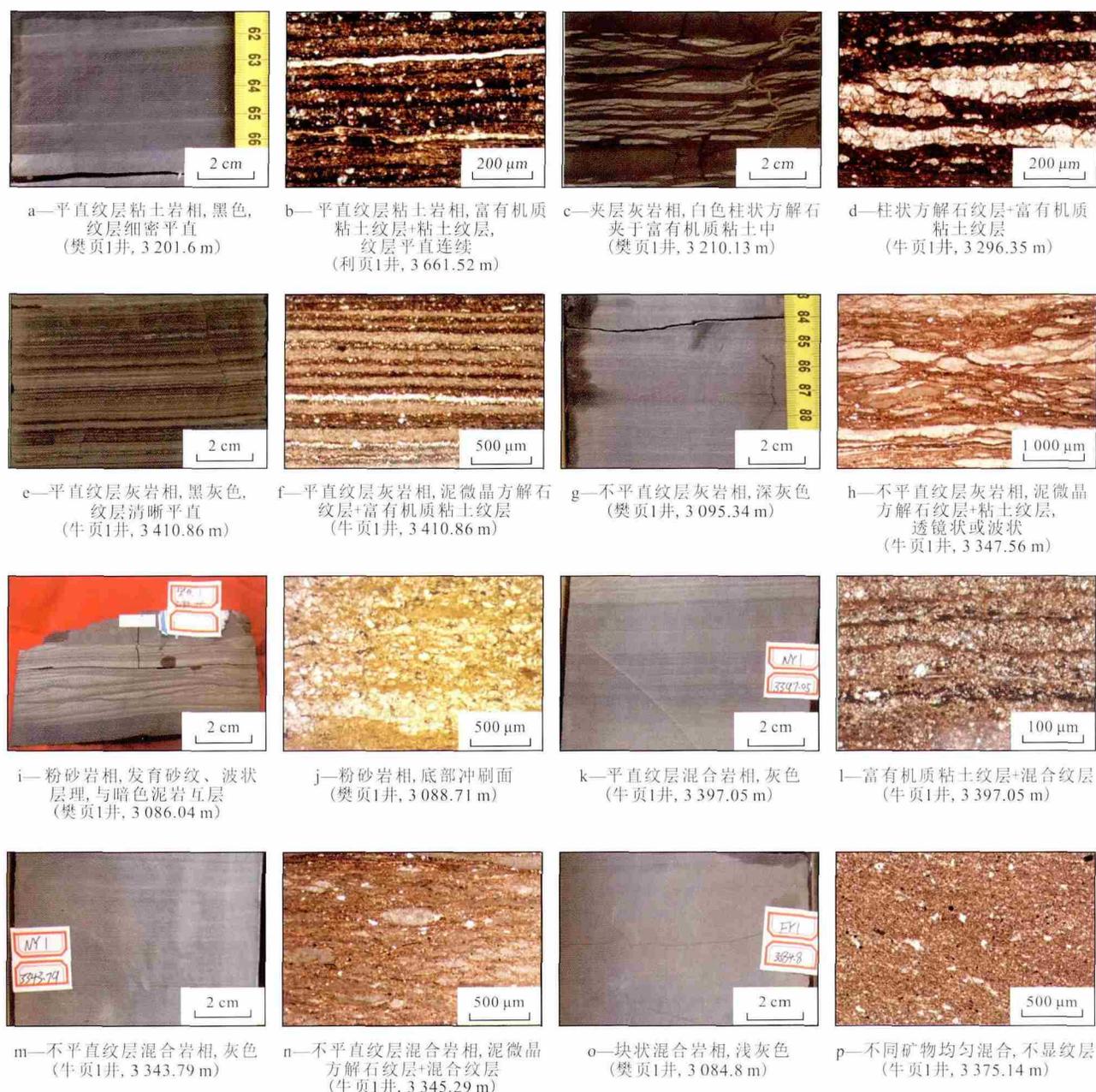


图4 东营凹陷沙三段下亚段细粒沉积岩相宏观和微观特征

Fig.4 Macroscopic and microscopic characteristics of lithofacies for fine-grained sedimentary rocks in the lower Es<sub>3</sub> member, Dongying sag

在湖水分层,使得有机质得以大量保存。综上所述,该岩相发育于气候干冷、闭塞缺氧且水体分层的深湖还原环境。

**夹层灰岩相** 该岩相岩心上白色方解石纹层与暗色纹层截然接触,界线十分清晰但不连续,白色柱状方解石呈叠瓦状排列,厚度多为1~5 mm,最大可达10 mm,夹于暗色纹层中(图4c),常与平直纹层粘土岩相互层产出(图4d)。镜下可见方解石呈柱状晶形式产出,重结晶现象明显,暗色纹层为富有机质粘土纹层,柱状晶方解石纹层与富有机质粘土纹层厚度近乎相当。表明气候趋于暖湿,由于生

物作用或生物—化学作用,在表层湖水中产生方解石,并且湖水深度小于碳酸盐补偿深度,使得方解石可以保存下来<sup>[12]</sup>;另外,水体仍然闭塞且存在分层,使有机质可以大量保存,且纹层厚度较大。在有机质演化过程中,产生的大量有机酸冲洗泥晶方解石中的Mg<sup>2+</sup>,同时生烃产生的高压裂缝为晶粒提供生长空间,促使方解石发生重结晶,形成柱状晶方解石纹层。综上所述,该岩相发育于气候半干冷,水体分层、闭塞、清澈但深度略有减小的深湖还原环境。

**平直纹层灰岩相** 该岩相岩心呈灰色,由浅色

纹层和暗色纹层组成,纹层界线清晰、平整且连续(图4e)。镜下可见浅色纹层为泥微晶方解石纹层,暗色纹层为富有机质粘土纹层,富有机质粘土纹层厚度小于泥微晶方解石纹层厚度(图4f),表明气候暖湿,在夏季发生藻类勃发,消耗掉表层水中的 $\text{CO}_2$ ,产生大量 $\text{CaCO}_3$ 沉淀,形成厚层泥微晶方解石纹层;到冬季,藻类死亡,在分层的水底形成薄层富有机质粘土纹层。由于有机质纹层较薄,有机碳含量相对较低,产生的有机酸不足以使得厚层的方解石发生强烈的重结晶<sup>[12]</sup>,因此方解石纹层主要以泥微晶形式产出。综上所述,该岩相发育于气候半暖湿,水体分层但不闭塞、相对稳定的广阔深湖还原环境。

**不平直纹层灰岩相** 该岩相岩心呈浅灰色,纹层发育,由多个浅色方解石小透镜体堆叠在一起,显示出不连续且不平直的纹层(图4g)。镜下可见浅色纹层为泥微晶方解石纹层,暗色纹层为粘土纹层(图4h)。该岩相发育层段多见薄层状粉砂岩,厚度不超过5 cm,发育各种牵引流构造,垂向上几乎不显粒序,与上、下岩相接触部分的界线清晰(图4i, 4j)。构成该岩相的纹层物质成分较纯,表明当时水底仍然为分层状态;不平直的纹层形态、相伴生的具牵引流构造的粉砂岩以及发育贫有机质含量的粘土纹层均表明,该岩相发育时受到微弱的底流改造作用,表明气候更为暖湿。综上所述,该岩相发育于气候暖湿,整体上水体分层但底流作用频繁的半深湖半还原环境。

**平直纹层混合岩相** 该岩相岩心呈灰色,浅色纹层与暗色纹层界线清晰,与平直纹层灰岩相相比浅色纹层比例明显降低(图4k)。在镜下可见浅色纹层为粘土矿物、长英质和方解石的混合纹层,三者没有优势成分,暗色纹层为富有机质粘土纹层(图4l)。该岩相中长英质矿物含量增多,表明气候由暖湿向干冷转变,陆源输入增强;同时沉积水体变浅,使得水体分层状态不稳定;在夏季表现为不分层,使得随河水注入形成的陆源碎屑纹层与生物作用或生物—化学作用形成的泥微晶方解石混合;到冬季,水流畅通性差造成水体分层,伴随着藻类死亡,形成富有机质粘土纹层。综上所述,该岩相发育于气候半干冷、水体分层不稳定的浅湖—半深湖半还原环境。当季节性回水产生微弱底流时,纹层形态由平直变为不平直,岩相类型也随之变为不平直纹层混合岩相(图4m, 4n)。

**块状混合岩相** 该岩相岩心呈灰—浅灰色,均匀块状(图4o);镜下不显纹层,方解石、粘土矿物和

长英质矿物均匀混合,可见大量的生物碎屑(图4p)。表明水体分层完全消失,水体能量较高,陆源输入增强,悬浮物沉积速率较快,来不及分异。综上所述,该岩相发育于气候干冷、水体分层完全消失的浅湖半氧化—半还原环境。

### 3 岩相垂向演化特征及分布模式

#### 3.1 岩相垂向演化特征

在岩相划分的基础上,以东营凹陷樊页1井为例对细粒沉积岩主要岩相垂向演化特征进行研究。自下而上,樊页1井沙三段下亚段表现出块状混合岩相—平直纹层灰岩相—夹层灰岩相—平直纹层粘土岩相—平直纹层灰岩相—不平直纹层灰岩相—平直纹层混合岩相—不平直纹层混合岩相—块状混合岩相的演化规律(图5),代表湖水由浅湖—半深湖—深湖—半深湖—浅湖的变化。

樊页1井沙三段下亚段2小层和3小层发育时期处于湖侵体系域时期,该时期湖水深、气候相对暖湿、湖水盐度大,形成较为稳定的分层,因此主要发育平直纹层粘土岩相、夹层灰岩相、平直纹层灰岩相和平直纹层混合岩相。同时,由于湖平面升高,湖底极易产生底流,发育不平直纹层灰岩相和不平直纹层混合岩相;且两者所占比例较大,也表明通常认为安静的深湖—半深湖湖底,实际上经常发生微弱的底流作用。沙三段下亚段1小层和4小层发育时期分别处于低位体系域和高位体系域时期,该时期湖水深度减小、气候干燥、陆源输入增强、湖底分层消失、还原性减弱,以块状混合岩相为主。

#### 3.2 岩相分布模式

部分学者对细粒沉积岩岩相分布模式进行了探索<sup>[12, 21-22]</sup>。根据前人研究<sup>[12]</sup>,结合不同岩相在岩石学特征、发育环境以及成因方面的差异,建立研究区沙三段下亚段细粒沉积岩岩相分布模式(图6)。在气候干冷、水深大于碳酸盐补偿深度的环境下,以极细粒陆源粘土矿物供给为主,且供给速率十分缓慢,水体分层、闭塞缺氧,发育平直纹层粘土岩相。当水深小于碳酸盐补偿深度,且气候由干冷向暖湿转变时,在湖底除了沉积富有机质粘土纹层,还沉积碳酸盐纹层<sup>[12]</sup>,由于有机质含量高,在后期成烃演化过程中,方解石发生重结晶,最终发育夹层灰岩相。气候暖湿时期,在生物作用和生物—化学作用下,碳酸盐产率极高,形成平直纹层灰岩相,但是该时期底流活动频繁,经常对纹层形态进行微弱改造,由此形成不平直纹层灰岩相。随着水

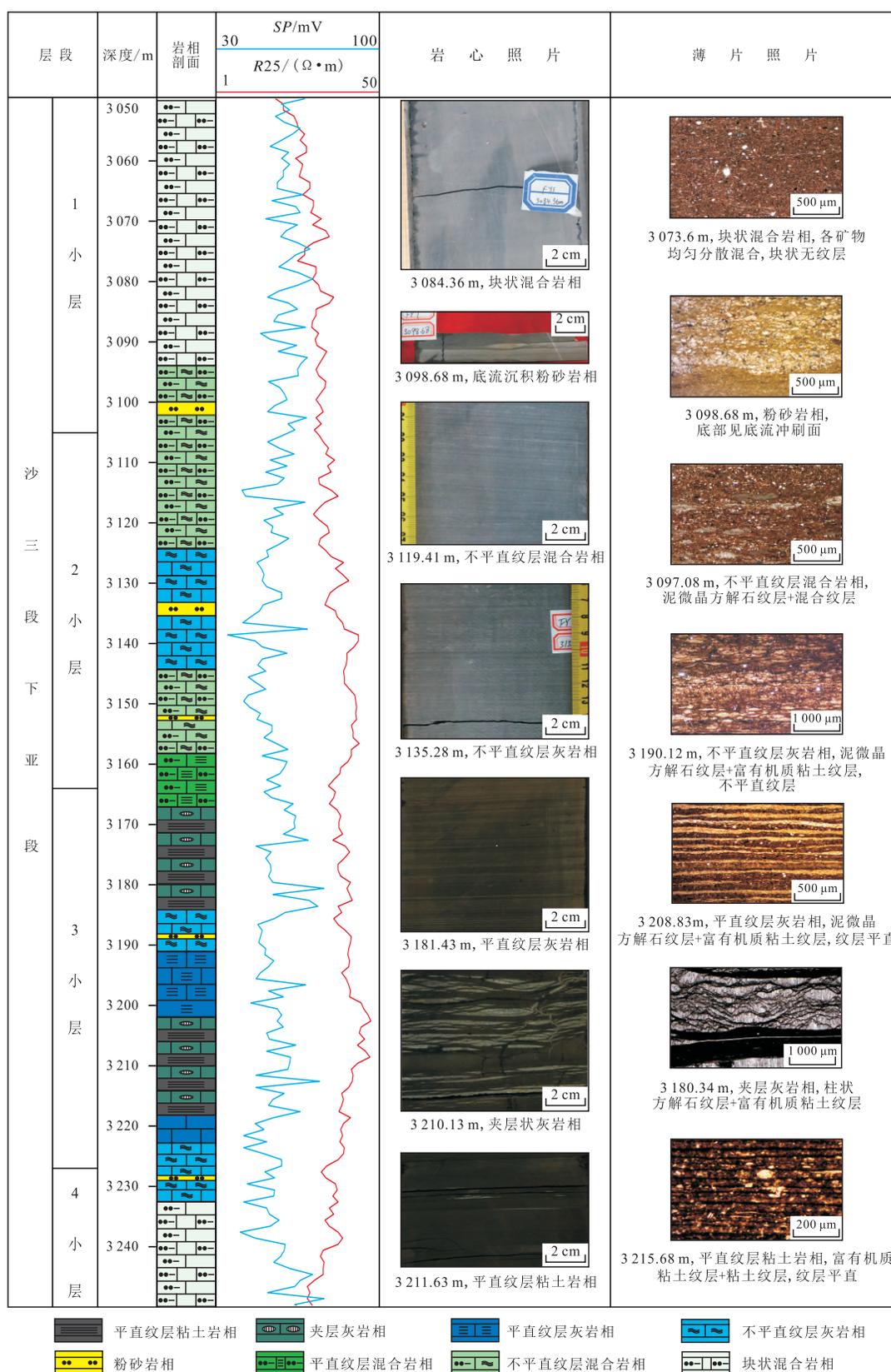


图5 东营凹陷樊页1井沙三段下亚段岩相垂向演化特征

Fig.5 Characteristics of vertical lithofacies variation in Well FY1 in the lower E<sub>3</sub> member, Dongying sag

深减小到水体分层界面附近, 水体分层稳定性变差, 加之气候由暖湿再次向干冷转变, 相对粗粒的陆源长英质输入增多, 形成平直纹层混合岩相, 当

季节性回水产生底流, 发育不平直纹层混合岩相。在气候干冷的浅湖环境, 水体不存在分层且能量较强, 发育块状混合岩相。

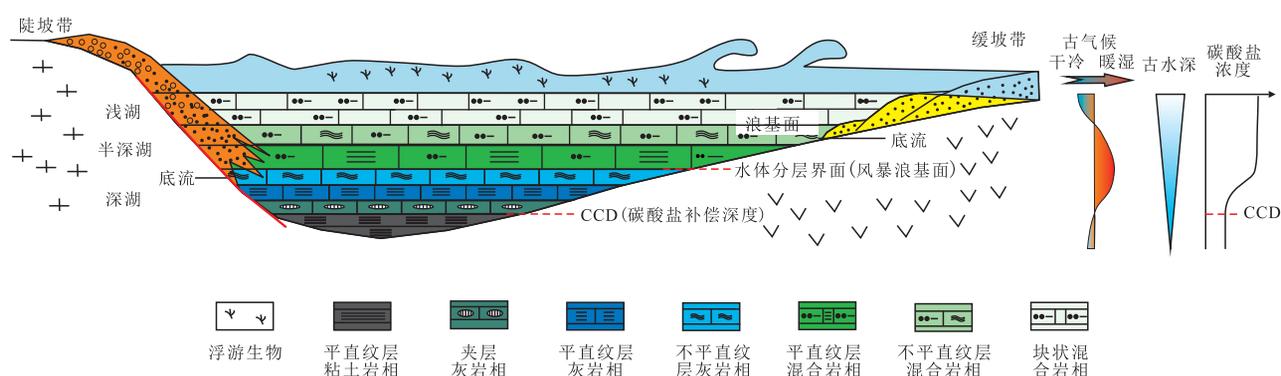


图6 东营凹陷沙三段下亚段细粒沉积岩岩相分布模式(据文献[11]修改)

Fig.6 Distribution model of lithofacies for fine-grained sedimentary rocks in the lower Es<sub>3</sub> member, Dongying sag (Modified by reference [11])

## 4 结论

东营凹陷沙三段下亚段细粒沉积岩矿物类型及其产出状态多样,沉积构造及纹层类型丰富,微弱底流的改造作用常使得纹层形态发生改变。综合考虑矿物组成和沉积构造,将研究区细粒沉积岩岩相分为4大类11小类。平直纹层粘土岩相、夹层灰岩相、平直纹层灰岩相、不平直纹层灰岩相、平直纹层混合岩相、不平直纹层混合岩相和块状混合岩相是研究区最为发育的7种岩相类型,其分别形成于不同的沉积环境。

樊页1井沙三段下亚段自下而上细粒沉积岩岩相发育情况代表湖水发生由浅湖—半深湖—深湖—半深湖—浅湖的变化,细粒沉积岩岩相垂向分布模式主要受古水深和古气候综合控制,据此建立东营凹陷沙三段下亚段细粒沉积岩岩相垂向分布模式:在气候干冷的深水还原环境下,主要发育平直纹层粘土岩相;随着气候转为半干冷且水深小于碳酸盐补偿深度,形成夹层灰岩相;在气候半暖湿的广阔深湖环境下,发育平直纹层灰岩相;在气候最为暖湿时期,底流发育,形成不平直纹层灰岩相;随着水深减小分层不稳定,加之气候逐渐干冷,形成平直纹层混合岩相,倘若此时底流发育,则形成不平直纹层混合岩相;在半氧化—半还原的浅湖环境下,发育块状混合岩相。

### 参考文献:

[1] 姜在兴,梁超,吴靖,等.含油气细粒沉积岩研究的几个问题[J].石油学报,2013,34(6):1 031-1 039.  
Jiang Zaixing, Liang Chao, Wu Jing, et al. Several issues in sedimentological studies on hydrocarbon-bearing fine-grained sedimentary rocks [J]. Acta Petrolei Sinica, 2013, 34 (6) : 1 031-

1 039.

- [2] 王永诗,李政,巩建强,等.济阳拗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 Luoia area in Zhanhua sag [J]. Acta Petrolei Sinica, 2013, 34(1): 83-91.
- [3] 朱德燕,王学军,郝雪峰,等.东营凹陷泥页岩层序地层划分[J].油气地质与采收率,2016,23(2):52-56.  
Zhu Deyan, Wang Xuejun, Hao Xuefeng, et al. Study on sequence stratigraphic division of oil shale in Dongying sag [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2016, 23(2) : 52-56.
- [4] 孔祥鑫,姜在兴,韩超,等.束鹿凹陷沙三段下亚段细粒碳酸盐纹层特征与储集意义[J].油气地质与采收率,2016,23(4):19-26.  
Kong Xiangxin, Jiang Zaixing, Han Chao, et al. Laminations characteristics and reservoir significance of fine-grained carbonate in the lower 3rd member of Shahejie Formation of Shulu sag [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2016, 23(4) : 19-26.
- [5] 冉波,刘树根,孙玮,等.四川盆地及周缘下古生界五峰组—龙马溪组页岩岩相分类[J].地学前缘,2016,23(2):96-107.  
Ran Bo, Liu Shugen, Sun Wei, et al. Lithofacies classification of shales of the Lower Paleozoic Wufeng-Longmaxi Formations in the Sichuan Basin and its surrounding areas, China [J]. Earth Science Frontiers, 2016, 23(2) : 96-107.
- [6] 张鹏,张金川,黄宇琪,等.黔西北五峰—龙马溪组海相页岩含气性及主控因素[J].大庆石油地质与开发,2015,34(1):169-174.  
Zhang Peng, Zhang Jinchuan, Huang Yuqi, et al. Gas-bearing property and its main controlling factors for Wufeng-Longmaxi Formation marine shale in Northwest Guizhou [J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2015, 34(1) : 169-174.
- [7] 张少敏,操应长,朱如凯,等.雅布赖盆地小湖次凹细粒沉积岩岩相特征与沉积环境探讨[J].天然气地球科学,2016,27(2):309-319.  
Zhang Shaomin, Cao Yingchang, Zhu Rukai, et al. The lithofacies and depositional environment of fine-grained sedimentary rocks of Xiaohu Subsag in Yabulai Basin [J]. Natural Gas Geoscience, 2016, 27(2) : 309-319.
- [8] 王勇,宋国奇,刘惠民,等.济阳拗陷细粒沉积岩形成环境及沉

- 积构造[J].东北石油大学学报,2015,39(3):7-14,31.
- Wang Yong, Song Guoqi, Liu Huimin, et al. Formation environment and sedimentary structures of fine-grained sedimentary rock in Jiyang depression[J]. Journal of Northeast Petroleum University, 2015, 39(3):7-14, 31.
- [9] Schieber J, Southard J, Thaisen K. Accretion of mudstone beds from migration floccule ripples [J]. Science, 2007, 18 (5857) : 1 760-1 763.
- [10] 张顺,陈世悦,鄢继华,等.东营凹陷西部沙三下亚段——沙四上亚段泥页岩岩相及储层特征[J].天然气地球科学,2015,26(2):320-332.
- Zhang Shun, Chen Shiyue, Yan Jihua, et al. Characteristics of shale lithofacies and reservoir space in the 3<sup>rd</sup> and 4<sup>th</sup> members of Shahejie Formation, the west of Dongying Sag [J]. Natural Gas Geoscience, 2015, 26(2):320-332.
- [11] 郝运轻,谢忠怀,周自立,等.非常规油气勘探领域泥页岩综合分类命名方案探讨[J].油气地质与采收率,2012,19(6):16-19.
- Hao Yunqing, Xie Zhonghuai, Zhou Zili, et al. Discussion on multi-factors identification of mudstone and shale [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2012, 19(6):16-19.
- [12] 吴靖.东营凹陷古近系沙四上亚段细粒岩沉积特征与层序地层研究[D].北京:中国地质大学(北京),2015:24-38.
- Wu Jing. The study on sedimentary characteristics and sequence stratigraphy of fine-grained rocks of the upper fourth member of Paleogene Shahejie Formation, Dongying Depression [D]. Beijing: China University of Geosciences(Beijing), 2015:24-38.
- [13] 张林晔,包友书,李钜源,等.湖相页岩油可动性——以渤海湾盆地济阳坳陷东营凹陷为例[J].石油勘探与开发,2014,41(6):641-649.
- Zhang Linye, Bao Youshu, Li Juyuan, et al. Movability of lacustrine shale oil: A case study of Dongying Sag, Jiyang Depression, Bohai Bay Basin [J]. Petroleum Exploration and Development, 2014, 41(6):641-649.
- [14] 宁方兴.济阳坳陷页岩油富集机理[J].特种油气藏,2015,22(3):27-30.
- Ning Fangxing. Mechanism of shale oil enrichment in Jiyang Depression [J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2015, 22(3):27-30.
- [15] 李钜源.渤海湾盆地东营凹陷古近系泥页岩孔隙特征及孔隙度演化规律[J].石油实验地质,2015,37(5):566-574.
- Li Juyuan. Pore characteristics and their evolution in Paleogene mud shales, Dongying Sag, Bohai Bay Basin [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2015, 37(5):566-574.
- [16] 朱光有,金强,张水昌,等.东营凹陷沙河街组湖相烃源岩的组合特征[J].地质学报,2004,78(6):416-427.
- Zhu Guangyou, Jin Qiang, Zhang Shuichang, et al. Combination characteristics of lake facies source rock in the Shahejie Formation, Dongying depression [J]. Acta Geologica Sinica, 2004, 78(6):416-427.
- [17] 刘传联,舒小辛,刘志伟.济阳坳陷下第三系湖相生油岩的微观特征[J].沉积学报,2001,19(2):293-298.
- Liu Chuanlian, Shu Xiaoxin, Liu Zhiwei. Micro-characteristics of Paleogene lacustrine petroleum source rocks in Jiyang depression [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2001, 19(2):293-298.
- [18] 王冠民.济阳坳陷古近系页岩的纹层组合及成因分类[J].吉林大学学报:地球科学版,2012,42(3):666-671.
- Wang Guanmin. Laminae combination and genetic classification of Eocene shale in Jiyang depression [J]. Journal of Jilin University: Earth Science Edition, 2012, 42(3):666-671.
- [19] 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.
- [20] 杨万芹,蒋有录,王勇.东营凹陷沙三下一沙四上亚段泥页岩岩相沉积环境分析[J].中国石油大学学报:自然科学版,2015,39(4):19-26.
- Yang Wanqin, Jiang Youlu, Wang Yong. Study on shale facies sedimentary environment of lower Es<sub>3</sub>-upper Es<sub>4</sub> in Dongying sag [J]. Journal of China University of Petroleum: Edition of Natural Science, 2015, 39(4):19-26.
- [21] 袁选俊,林森虎,刘群,等.湖盆细粒沉积特征与富有机质页岩分布模式——以鄂尔多斯盆地延长组长7油层组为例[J].石油勘探与开发,2015,42(1):34-43.
- Yuan Xuanjun, Lin Senhu, Liu Qun, et al. Lacustrine fine-grained sedimentary features and organic-rich shale distribution pattern: A case study of Chang7 Member of Triassic Yanchang Formation in Ordos Basin, NW China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2015, 42(1):34-43.
- [22] 柳波,吕延防,孟元林,等.湖相纹层状细粒岩特征、成因模式及其页岩油意义——以三塘湖盆地马朗凹陷二叠系芦草沟组为例[J].石油勘探与开发,2015,42(5):598-607.
- Liu Bo, Lü Yanfang, Meng Yuanlin, et al. Petrologic characteristics and genetic model of lacustrine lamellar fine-grained rock and its significance for shale oil exploration: A case study of Permian Lucaogou Formation in Malang sag, Santanghu Basin, NW China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2015, 42(5):598-607.

编辑 经雅丽