

DOI:10.16562/j.cnki.0256-1492.2017.03.015

东营凹陷沙河街组沙三下-沙四上亚段泥页岩 岩相与沉积环境的响应关系

刘庆¹, 曾翔², 王学军¹, 蔡进功²

(1. 中石化胜利石油分公司勘探开发研究院, 东营 257015; 2. 同济大学海洋地质国家重点实验室, 上海 200092)

摘要:泥页岩的沉积环境控制了矿物、有机质特征和岩相类型。开展东营凹陷古近系沙河街组泥页岩薄片、X衍射、热解和微量元素等分析,研究各层段元素地球化学特征和岩相类型,探索沉积环境变化与岩相组合的响应关系。研究表明沙河街组沙三下-沙四上亚段泥页岩包含了均匀块状泥岩、细纹层状页岩、宽纹层状页岩、断续纹层状页岩和含石膏构造泥岩5种岩相类型。各层段沉积环境变化明显,沙四纯下次亚段沉积时期水体盐度最高,随着湖泊淡化,水体盐度降低,至沙三下亚段已演化为盐度较低且波动稳定的湖泊环境。岩石类型与沉积环境关系密切:沙四纯下次亚段浅水高盐度条件下沉积了石膏构造泥岩和少量均匀块状泥岩;沙四纯上底部高盐度水体加深的环境下沉积宽纹层页岩和少量细纹层页岩;沙四纯上次亚段上部盐度降低环境沉积均匀块状泥岩和少量宽纹层页岩;沙三下亚段深水安静且盐度较低的环境沉积细纹层页岩,充分展现了沉积环境对岩相的控制作用。因此,关注泥页岩沉积环境演变与岩相成因,探讨岩石与沉积环境响应关系,能够为非常规油气勘探提供新的思路。

关键词:泥页岩岩相;沉积环境;沙河街组;东营凹陷

中图分类号: TE121.3

文献标识码: A

文章编号: 0256-1492(2017)03-0147-10

泥页岩是典型的细颗粒沉积物,也是重要的非常规油气资源类型。关注泥页岩岩相和沉积环境间的关系^[1-4],对于认识泥页岩的发育规律极其重要。泥页岩由黏土、碳酸盐和碎屑矿物组成,由于矿物之间物理化学性质各异,在不同的沉积环境下矿物的类型与富集规律差异明显。例如,在浅水环境且水动力较强的条件下,碎屑矿物通过机械作用而大量富集;在静水环境下,黏土矿物更易通过化学絮凝作用聚集沉淀;在水体矿化度较高的条件下,自生的碳酸盐矿物更易沉淀;而且,沉积环境的变化,矿物和有机质的结合关系也会发生相应的变化,这些都会影响到泥页岩岩相特征的差异。因此,分析沉积环境特征的变化,深化泥页岩岩相的成因研究,这对非常规油气勘探具有重要的意义。

东营凹陷沙河街组湖相泥页岩广泛发育,前人从有机质的富集,烃源岩的形成到生烃贡献等多个方面进行研究,确立了这套泥页岩作为主力烃源岩

的地位^[3,5-13],但对于该套泥页岩的各岩相的沉积环境的关注较少。本次研究选取东营凹陷 NY1 井的岩心样品,采用岩石薄片、X衍射(XRD)、热解和元素地球化学分析,在充分剖析泥页岩的矿物和有机质特征的基础上,关注元素地球化学变化规律,研究各类泥页岩岩相与沉积环境变化响应关系以及各层段间岩相组合的差异,深化泥页岩成因机制的认识。

1 地质概况

东营凹陷在构造上隶属于渤海湾盆地济阳坳陷,是一个典型的北断南超的箕状凹陷(图1)。在凹陷内发育有民丰洼陷、利津洼陷、牛庄洼陷和博兴洼陷4个次级洼陷。凹陷内古近系沙三中、沙三下及沙四上亚段发育了大套湖相泥页岩,是凹陷的主力烃源岩。不同时期沉积的泥页岩岩性差异较大,其中沙四上亚段纯下次亚段发育块状泥岩和石膏质泥岩;沙四上亚段纯上次亚段主要发育深灰色-灰黑色油页岩;沙三下亚段沉积了一套黑色页岩和油页岩;沙三中亚段主要发育块状泥岩和粉砂岩沉积物^[14],沙四上到沙三下沉积时期形成的湖相泥页岩可作为岩相与环境响应研究的典型对象。

基金项目:国家自然科学基金项目(41672115);国家油气重大专项(2016ZX05006001-003)

作者简介:刘庆(1970—),男,博士,高级工程师,从事油气地球化学研究,E-mail:liuq_1230@sina.com

收稿日期:2016-10-09;**改回日期:**2017-01-07 周立君编辑

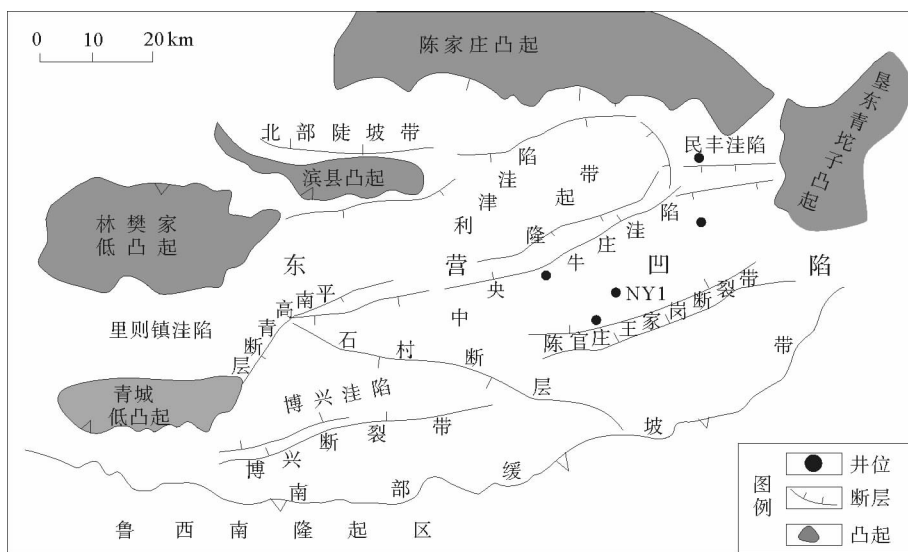


图 1 东营凹陷区域构造、井位与地层展布图(据胜利油田,2014,有修改)

Fig. 1 Tectonic map of with well locations Dongying Sag

(Modified from Shengli Oilfield Company, 2014)

2 样品来源与分析方法

对东营凹陷系统取心井 NY1 井的泥页岩,等间隔采集泥页岩样品共计 183 个,涵盖了沙四上-沙三下亚段的整套地层,其中,沙三下亚段采集泥页岩样品 23 个,沙四纯上和沙四纯下次亚段分别采集泥页岩样品 137 个和 23 个。对样品分别进行系统分析。

2.1 薄片分析

垂直泥页岩纹层样品磨制岩石薄片,利用 ZEISS 光学显微镜进行透光和偏光观察,了解泥页岩矿物组成及晶体特征,通过对泥页岩矿物组成、含量及显微构造等方面的研究,确定泥页岩的岩石类型及微观构造特征。

2.2 X 衍射分析

将泥页岩样品粉碎至 200 目后压片,采用 PanalyticalXpert-MPD 衍射仪进行分析,测试条件为铜靶,管流 40 mA,管压 30 kV,扫描时间 $2^\circ/\text{min}$ 。采用刚玉晶体粉末作为内标,依据 SY/T6210-1996 行业标准进行全岩矿物 X 射线衍射分析,用 K 值算法,计算出各类泥页岩矿物组成与含量。

2.3 岩石热解分析

岩石热解分析依据 GB/T 18602-2001 标准进行测定,将泥页岩样品磨碎至 200 目,放入 ROCK

EVAL-VI 标准型热解仪进行分析。样品在氦气流中加热,排出的游离气态烃、自由液态烃(S1)和热解烃(S2)由氢火焰离子化检测器检测,排出的 CO_2 (S3)由热导检测器检测,得到热解参数 S1, S2, S3, Tmax 等,进一步计算获得 TOC, PC, RC, PI, HI, OI 等地球化学参数。

2.4 微量元素

将样品放入马弗炉中在 600°C 温度下灼烧 2 h,称取 40 mg 左右的残余样放入消解罐。在盛有样品的消解罐中分别加入约 1 mL 的 1:1 HNO_3 和约 3 mL 的 HF,超声波震荡后在 150°C 的加热板上放置 24 h,然后蒸干。将蒸干后的样品再次分别加入约 1 mL 的 1:1 HNO_3 和约 3 mL 的 HF,在加热板上保温一周并每天超声波震荡半小时以上。处理后的样品再次蒸干并加入 5 mL 的 1:1 HNO_3 ,经过超声波震荡、保温等过程后,用浓度为 2% 的稀硝酸将样品稀释至原重量的 10 000 倍作为微量元素待测液。分析中使用标样(GSD-9, GSR-6 和 GSR-5)和空白样进行校正。本次实验用同济大学海洋地质国家重点实验室的 ICP-MS(PQ3, Thermo Elemental)测定微量金属元素,包括 V, Ni, Sr, Ba 等元素。计算精度按照 $100 \times (X_{\text{means}} - X_{\text{std}}) / X_{\text{std}}$ 公式进行计算,其中 X_{means} 为样品测量值, X_{std} 为标样标准值,分析结果偏差在 5% 以内。

3 分析结果

3.1 元素地球化学特征

微量元素测量结果显示,研究目的层段的Sr/Ba值和 $V/(V+Ni)$ 值变化特征见图2。沙三下亚段Sr/Ba值最低(平均值2.5);沙四纯下次亚段Sr/Ba范围变化大,分布在0.3~20.3的区间内,平均值高达5.8;沙四纯上次亚段介于前二者之间,Sr/Ba平均为3.9。各层段显示 $V/(V+Ni)$ 值相近,经计算,沙三下亚段、沙四纯上和沙四纯下次亚段的平均比值分别为0.72、0.72和0.69。

3.2 岩相类型

东营凹陷沙河街组泥页岩岩石类型丰富且分类方案众多。泥页岩岩相的划分需要充分考虑矿物特征、有机质特征、构造形态和成因等,本文根据曾翔等(2017)岩相划分方案^[15],将研究区泥页岩划分为5类。

3.2.1 纹层状页岩

由特征和厚度各异的纹层,如亮色泥质纹层、暗色有机质纹层、碳酸盐纹层等组成,层状构造的类型丰富。根据纹层形态和性质的变化,可进一步划分为细纹层、宽纹层和断续状纹层3类。

细纹层是由浅色的泥质纹层和暗色有机质纹层组合而成的互层状构造,单纹层厚度不超过100

μm 。高倍显微镜下观察发现,亮色泥质纹层颜色较浅,厚度为50~100 μm ,纹层主要由黏土矿物构成,纹层内鲜有碎屑颗粒,黄铁矿颗粒发育(图3a);暗色有机质纹层颜色较深,为红褐色-深褐色,纹层厚度小于50 μm ,纹层内的有机质呈拉长或压扁状排列(图3c)。这类构造中有时可见亮晶方解石脉,宽300 μm 以上,顺层发育于岩石中,亮晶方解石脉中穿插发育有机质(图3b)。

宽纹层是由亮色泥质纹层和隐晶质碳酸盐纹层组合而成的互层状构造,其纹层多具有轻微起伏(图3d,e)。高倍显微镜下观察发现,碳酸盐纹层主要为深黄色-灰色,厚度200 μm 以上,由隐晶质方解石构成,纹层内部均匀,不具有生物构造且具有波状起伏的特点,部分纹层为透镜状(图3e);亮色泥质纹层厚度一般小于100 μm ,由黏土矿物构成,纹层间有时可见少量有机质纹层(图3f)。

断续纹层。显微镜下观察,断续纹层在以泥质为基质的泥页岩中,发育有大量呈断续状分布的有机质纹层,这些有机质纹层为深褐色-黑色,厚度小于50 μm ,纹层由浮游生物粪球粒、藻类残片等有机质碎屑构成。纹层间能够看到少量碎屑颗粒零星分布于岩石内(图3g,h)。

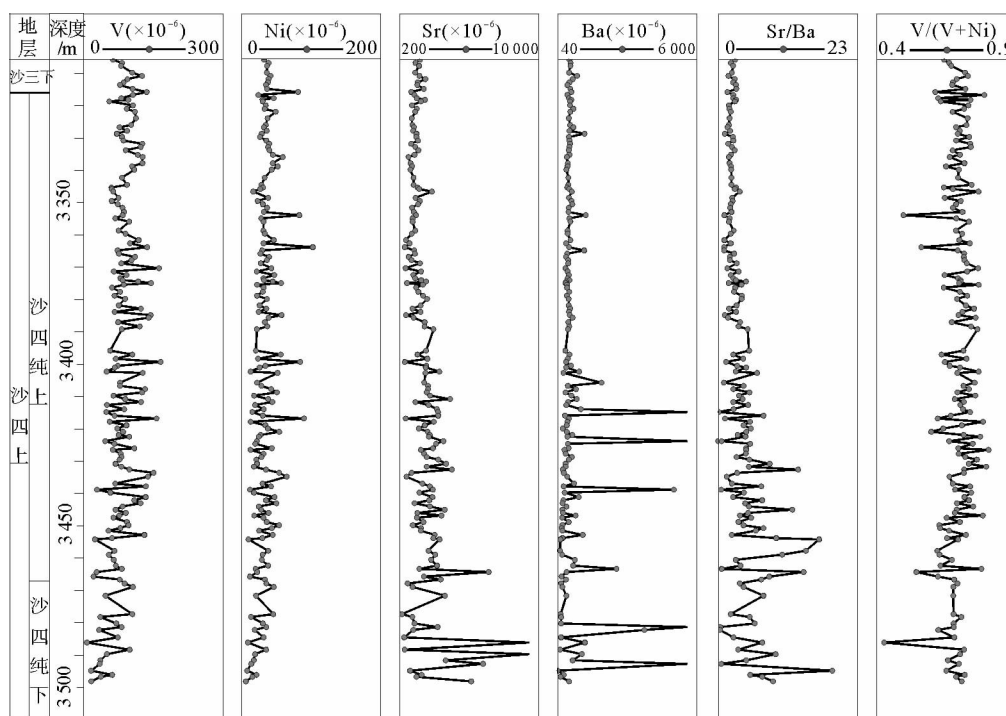


图2 NY1井微量元素地球化学综合特征

Fig. 2 Geochemical characteristics of trace elements in NY1 well

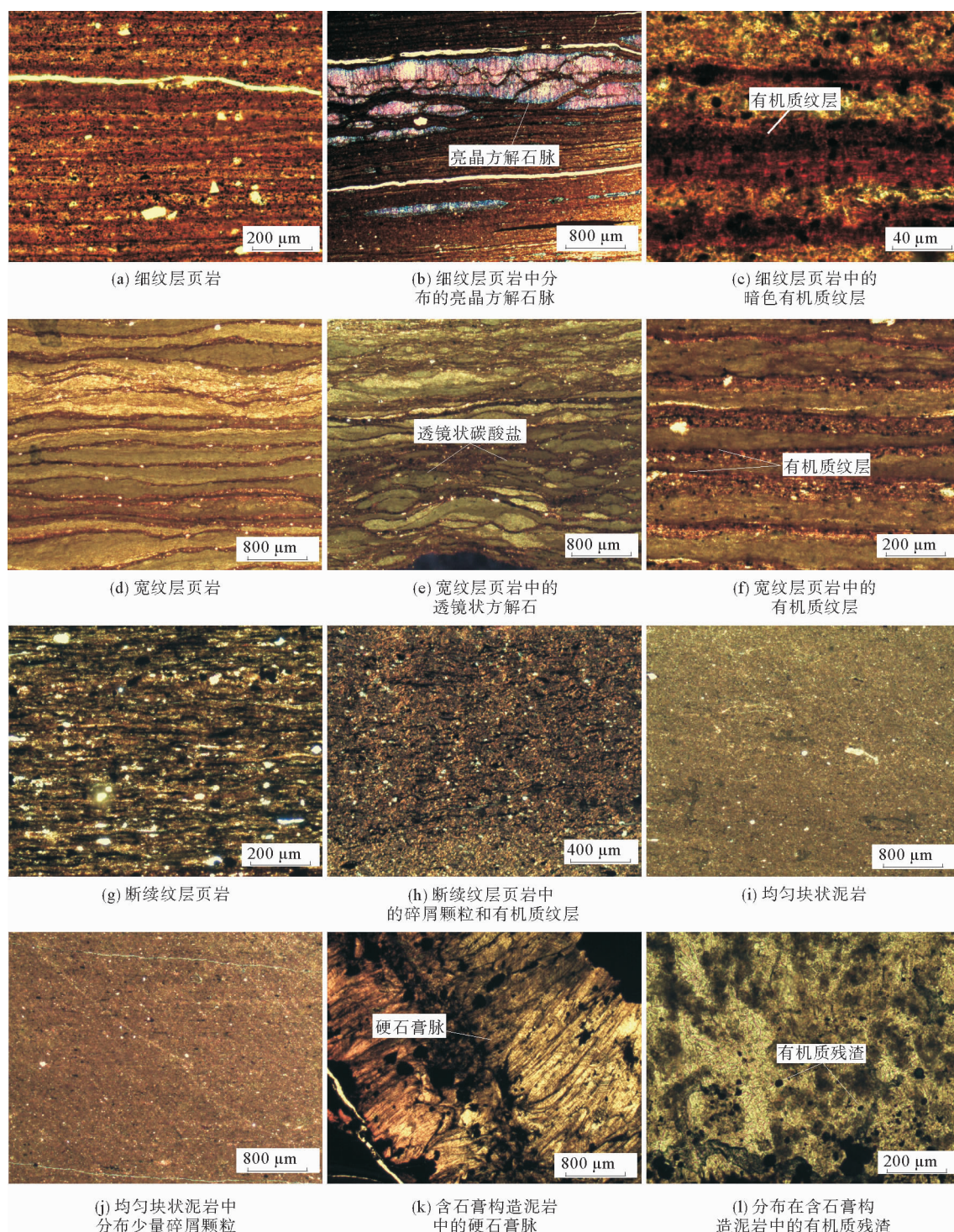


图 3 东营凹陷泥页岩岩石薄片照片(曾翔等,2017,有修改)

Fig. 3 Photographs of mudstone thin sections in Dongying Sag (Modified from Zengxiang, et al, 2017)

3.2.2 块状泥岩

块状构造泥页岩不发育纹层,主要由泥质矿物组成,几乎不含碎屑颗粒,常见微小的有机质分散于岩石中(图 3i,j),称为均匀块状泥岩。

3.2.3 含石膏构造泥岩

这类岩石往往也具有纹层状或块状结构,但岩

石中含有丰富的硬石膏(图 3k)。石膏类矿物是蒸发环境下沉积的产物。岩石中可见少量黑色不透明有机质颗粒分散分布于岩石中(图 3l)。

3.3 矿物组成

通过 XRD 分析发现,东营凹陷沙三下、沙四上

的泥页岩主要由石英、钾长石、斜长石、黏土矿物、方解石、白云石、黄铁矿、菱铁矿和硬石膏等矿物组成。受沉积环境影响,不同微构造类型的泥页岩矿物成分变化大。将泥页岩的 XRD 测试数据,按陆源碎屑(石英、钾长石和斜长石)、黏土矿物、碳酸盐矿物(方解石、白云石)和硫酸盐矿物(硬石膏等)统计发现(图 4,表 1),沙三下亚段和沙四上亚段碎屑矿物含量相近,平均不超过 30%;沙四纯上亚段碳酸盐矿物含量达到 49.0%,明显高于其他层段碳酸盐矿物的平均含量;沙四纯下次亚段黏土矿物含量最高,达到 28.4%,含有少量石膏类矿物是该层段岩石的典型特征。

3.4 热解

热解分析结果显示,东营凹陷沙三中下-沙四上亚段泥页岩 TOC 值最低为 0.19%,最高为 12.22%,平均为 2.89%,为富含有机质的泥页岩。但不同层段中有机碳富集具有较大差异(表 1),其中沙三下亚段 TOC 含量最高,平均达到 3.92%;沙四纯上次亚段 TOC 平均含量不如沙三下亚段,但也达到 3.34%,沙四纯下次亚段的 TOC 平均含量最低,平均为 2.13%。对比各层段的有机质类型发现,沙三下亚段泥页岩总体具有高 HI 低 OI 的有机质特征,岩石 HI 和 OI 分别为 513 mg/g 和 39 mg/g,沙四纯上次亚段也具有相似的特征;沙四纯下次亚段泥页岩具有低 HI 高 OI 的有机质特征,HI 和 OI 分别为 213 mg/g 和 121 mg/g。

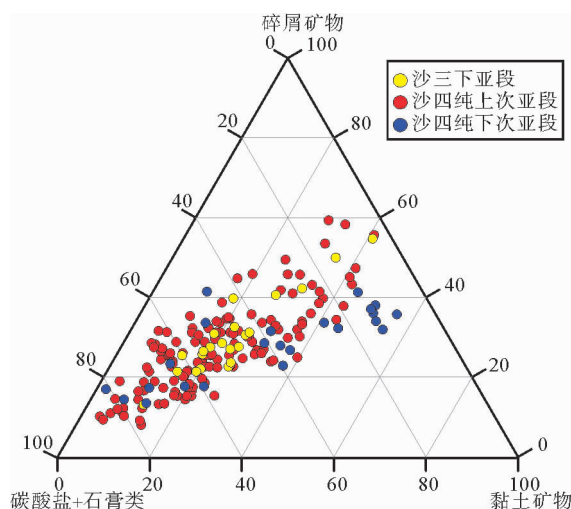


图 4 各层段矿物特征

Fig. 4 Mineral composition of stratigraphic members

表 1 各构造类型泥页岩矿物与热解特征

Table 1 Characteristics of mineral and pyrolysis of samples

	沙三下 亚段	沙四上亚段	
		沙四纯上	沙四纯下
矿物特征	黏土矿物/%	21.2	20.1
	碳酸盐矿物/%	43.3	49.7
	碎屑矿物/%	27.9	26.3
	硬石膏/%	0.0	0.1
热解特征	TOC/%	3.92	3.34
	HI/(mg/g)	513	450
	OI/(mg/g)	39	47
	Tmax/℃	439	439

4 讨论

4.1 沉积环境差异

湖泊的沉积环境主导了矿物和有机质的聚集和保存方式,并直接控制了岩相类型与组合关系。在湖泊环境中,盐度和氧化还原环境是影响有机质-矿物的重要因素,因此,可通过元素分析研究泥页岩沉积时期的古盐度和古氧化还原环境,并开展泥页岩岩相成因研究。

4.1.1 古盐度

Sr/Ba 是反映湖泊水体环境最常用且有效的指标,Sr 和 Ba 的化学性质较相似,在高盐度水体中 Sr 迁移能力比 Ba 迁移能力强,水体盐度逐渐加大时,Ba 以 BaSO_4 的形式首先沉淀,留在水体中的 Sr 相对 Ba 趋于富集,当水体的盐度加大到一定程度时 Sr 亦以 SrSO_4 的形式递增沉淀。因而记录在沉积物中的 Sr 丰度和 Sr/Ba 比值与古盐度呈明显正相关性,可作为古盐度判别的灵敏标志^[16,17]。

古盐度指标的变化显示,沙四纯下次亚段 Sr/Ba 比值在 0.4~20 之间波动,整体处于高值(平均 5.8);沙四纯上次亚段至沙三下亚段,Sr/Ba 比由变化明显的高值逐渐转变为平稳变化的低值(图 5),其中沙四纯上次亚段底部值较高(平均 5.5),层段上部 Sr/Ba 值变化主要分布在 1.0~3.8 之间,平均为 2.7。这种变化反映了沙四纯下亚段沉积时期,湖泊具有高盐度特征,至该时期沉积末期,水体盐度降低。沙四纯下次亚段中发育的含石膏构造泥岩也证实了干旱气候下蒸发强烈的高盐度水体环境。沙四纯上亚段沉积时期开始,湖泊盐度进一步升高,随着演化进行,高盐度的咸湖逐渐转变为盐度稳定的

淡水湖。沙三下亚段 Sr/Ba 值在 1.2~3.6 之间,平均为 2.5,反映了该层段和沙四纯上次亚段上部相近的盐度特征,整体为盐度较低且变化稳定的水体环境。此外,沙四纯上次亚段顶部和沙三下亚段发育的纹层状页岩和均匀块状泥岩也反映了盐度稳定的水体环境。

4.1.2 氧化还原特征

V/(V+Ni) 比值能够充分反映水体中氧化还原条件的变化。相对于 Ni 元素,V 聚集在强烈还原的富硫化氢环境中^[18-20]。V/(V+Ni) 比值的变化主要由氧化还原环境控制,在缺氧环境中,V/(V+Ni) $\geq 0.7 \sim 0.8$,在贫氧环境下为 0.46~0.60^[21]。

东营凹陷泥页岩 V/(V+Ni) 比值变化稳定,普遍在 0.5~0.8 的区间内波动,其中沙四纯下次亚段平均值为 0.69,沙四纯上次亚段和沙三下亚段平均值都为 0.72(图 5)。比值稳定变化反映了在东营凹陷沙四上-沙三下亚段各沉积时期,水体整体处于有利于有机质保存的缺氧环境中。这种稳定的保存环境也说明研究区泥页岩中有机质含量主要受原始沉积作用的影响。

综合分析元素地球化学特征可知,东营凹陷沙河街组泥页岩沉积时期,湖泊水体发生了变迁。整个时期水体经历了由咸变淡的盐度变化,氧化还原条件整体处于稳定条件。

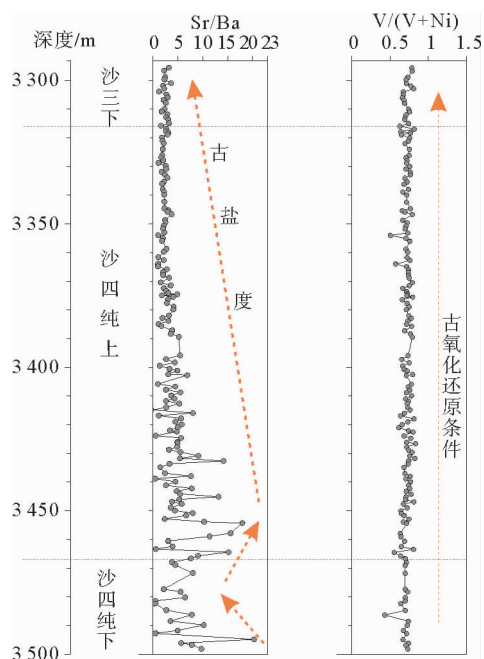


图 5 NY1 井 Sr/Ba 和 V/(V+Ni) 的变化

Fig. 5 Variations in Sr/Ba and V/(V+Ni) in well NY1

4.2 泥页岩岩相成因分析

东营凹陷泥页岩碎屑矿物、黏土矿物、碳酸盐、硫酸盐矿物和有机质组成都具有一定的变化规律。因此,在泥页岩的岩相分析过程中更要关注无机矿物与有机质之间的相互关系,结合矿物特征和有机质成因,开展各类泥页岩的岩相成因研究(表 2)。

综合岩石的构造类型与矿物含量特征分析,发现泥页岩岩相是生物、化学和机械等多种作用的综合结果。前人对泥页岩的成因也有较多的研究^[15],其中,细纹层富集亮色泥质纹层和暗色富有机质泥质纹层,分别是化学和生物作用的产物,反映了安静的深水沉积环境。宽纹层页岩富集隐晶质碳酸盐纹层和亮色泥质纹层,是生物和化学沉积作用主导的沉积物,反映沉积环境稳定且湖水盐度较高。断续纹层中碳质纹层、碎屑颗粒和泥质基质代表了物理和生物作用主导的沉积方式,这类岩石沉积于水体相对较浅且有机质丰富的环境。均匀块状泥岩中的均匀稳定的灰泥质基质反映了化学作用主导的沉积环境。含石膏构造泥岩中的石膏类构造和泥质基质则是浅水蒸发条件下机械-化学作用主导下的产物。

4.3 沉积环境与泥页岩岩相组合

NY1 井各层段的泥页岩的岩相差异较大,总结各层段沉积特征和岩相类型发现(图 6),沉积环境与泥页岩岩相间具有相关性。

沙四纯下次亚段盐度最高,整体处于缺氧-还原环境中,该层段最典型的特征是石膏类矿物含量比较丰富,其中 30% 以上的岩石为含石膏构造泥岩,这些特征都反映了这一时期湖泊处于高盐度的蒸发环境。随着湖泊水体的淡化,湖泊盐度逐渐降低,石膏和碳酸盐类矿物含量降低,黏土矿物和碎屑矿物的含量逐渐增高,岩性逐渐转变为均匀块状泥岩为主(含量 > 50%)的泥页岩。该层段有机质 TOC 为 2.13%,HI 为 213 mg/g 和 OI 为 121 mg/g,干酪根类型以 III 型为主。矿物和有机质特征显示了蒸发条件下化学作用主导了碳酸盐和硫酸盐沉积,形成了具有特色的含石膏构造泥岩,充分反映了沉积与岩相间的响应关系。该层段沉积时期水体条件虽有利于有机质的保存,但由于水体生产力较低且有机质类型较差,生烃潜力相对较弱。

沙四纯上次亚段可以分为两个演化阶段,第一阶段水体盐度整体较高且波动明显,59% 的岩石为宽纹层页岩,28% 为细纹层页岩,层段中的碳酸盐矿物含量高近 50%,外源输入的碎屑矿物和黏土矿物

表 2 泥页岩岩相特征与成因

Table 2 Characteristics and origin of mudstones/shales

岩相类型	纹层类型	矿物类型	有机质特征	成因分析	沉积作用
细纹层页岩	亮色泥质纹层	富集黏土矿物、少量碎屑矿物	生物勃发时期产生的富有机质纹层	物理—化学作用沉淀	静水生物勃发时期形成的岩石
	暗色富有机质纹层	富集黏土矿物		化学—生物作用沉淀	
	亮晶方解石脉	亮晶方解石		成岩作用成因	
宽纹层页岩	泥质纹层	富集黏土矿物、少量碎屑矿物	砂泥质纹层中微小植物残片； 碳酸盐纹层中浮游藻微体化石	物理—化学作用沉淀	水体安静且矿化度较高环境下沉积形成的岩石
	少量粉砂质纹层	富集碎屑矿物		生物作用诱发的沉淀	
	少量富有机质纹层	富黏土矿物			
	隐晶质碳酸盐纹层	隐晶质方解石			
断续纹层页岩	碳质纹层	与黏土矿物和碎屑矿物共生	粪球粒、藻团块及微小的植物残片	机械—生物作用沉淀	水体相对较浅，浮游生物勃发时期形成的岩石
	泥质基底	富集黏土矿物		化学作用沉淀	
	透镜状隐晶质碳酸盐	隐晶质方解石		生物作用诱发的沉淀	
均匀块状泥岩	泥灰质基底	黏土矿物与隐晶质碳酸盐	微小的植物残片	生物—化学作用沉淀	水体相对动荡环境下形成的岩石
含碎屑块状泥岩	分散状碎屑颗粒	石英、长石颗粒	红色高等植物残片	机械作用主导的沉淀	水体较浅环境下，外源物质输入丰富时期形成
	泥质基底	富集黏土矿物		生物作用诱发的沉淀	
	少量碳酸盐斑块	隐晶质碳酸盐			
含石膏构造泥岩	硬石膏脉	硬石膏	黑色不透明颗粒	蒸发环境机械—化学作用沉淀	蒸发深缩环境
	泥质基底	富集黏土矿物			

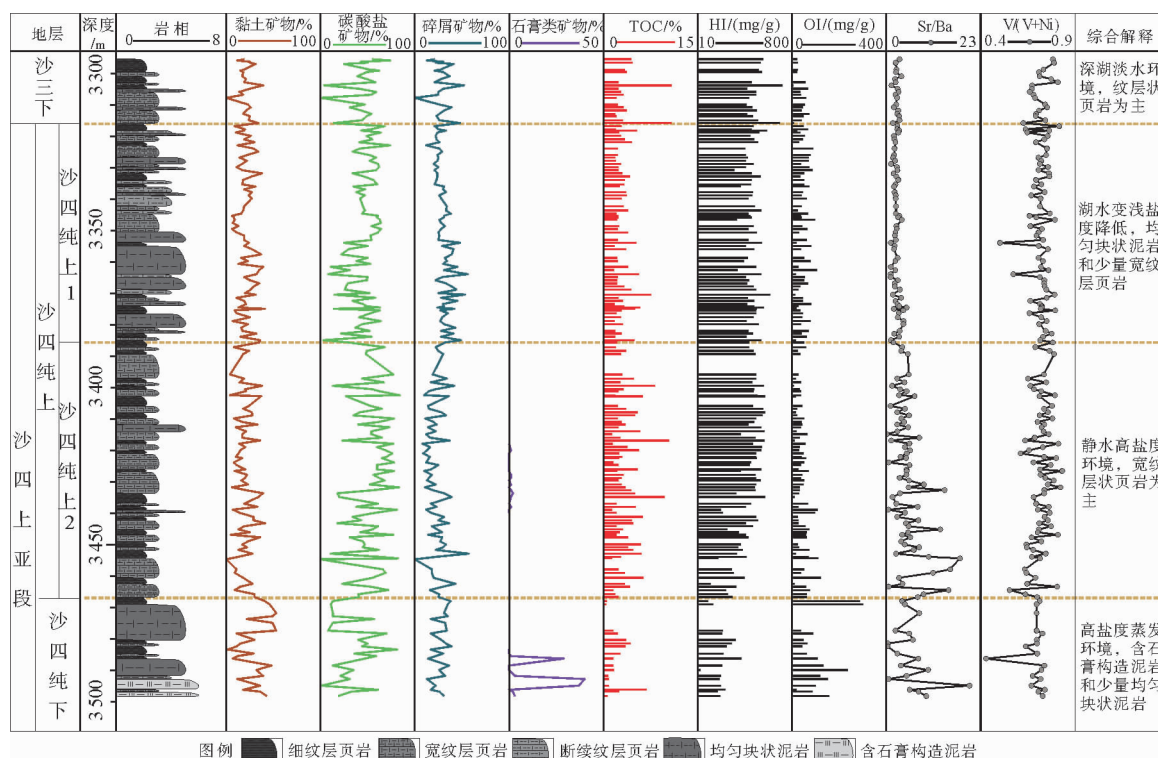


图 6 NY1 井沙三下-沙四上亚段综合柱状图

Fig. 6 Integrated column of the lower Es³- upper Es⁴ Submembers of well NY1

含量整体较低,层段局部含有极少量石膏类矿物。该层段有机质 TOC 平均值达到 3.66%,HI 和 OI 指数平均值分别为 438 mg/g 和 44 mg/g,干酪根类

型为 I-II 型。根据岩石和有机质特征以及沉积环境,在水体盐度较高且阳离子供给丰富时,有机质大量形成,内源的碳酸盐矿物大量沉淀形成富隐晶质

碳酸盐的泥页岩,生物化学作用主导了沉积物的形成;在水体盐度较低时,内源矿物含量减少,黏土矿物通过絮凝作用沉淀。这一时期,生物-化学作用主导了宽纹层泥页岩为主的岩相大量发育。这种咸水环境下形成的泥页岩具有可观的生烃潜力。

沙四纯上次亚段第二阶段水体盐度整体较低且波动稳定,湖泊整体处于贫氧环境,这一时期沉积了均匀块状泥岩(43%以上)和断续纹层页岩(约20%)岩相,该阶段碳酸盐含量有所降低(45%以下),黏土矿物更加富集。有机质的 TOC 平均 3.01%,HI 和 OI 指数分别为 463 mg/g 和 62 mg/g,干酪根类型为 I-II 型。这反映了湖泊盐度相对较低且稳定时期自生物物质和外源矿物共同进入水体后沉积而形成的泥页岩,特别是黏土矿物的大量出现,显示黏土絮凝化学作用为主,其广泛发育的均匀块状泥岩是该沉积环境下的泥页岩岩相响应的典型代表。这一阶段盐度稳定条件下形成的泥页岩生烃能力相对较弱。

沙三下亚段沉积时期为缺氧且盐度相对较低的水体环境,岩石样品具有纹层构造,其中细纹层页岩和宽纹层页岩含量分别为 44%和 48%,块状泥岩含量不到 10%,纹层类构造大量发育体现了水深且安静的沉积环境。该层段黏土矿物含量丰富,岩石中有机质的 TOC 平均为 3.9%,HI 和 OI 指数平均值分别为 513 mg/g 和 39 mg/g,干酪根类型为 I-II 型。该层段与沙四纯上次亚段第二阶段的沉积环境相似,具有相似的沉积方式,但热解特征显示该层段水体生产力更高,生物作用影响了该层段岩石的沉淀,由此产生的泥页岩也具有良好的生烃潜力。

综上所述,沉积环境的变化导致了泥页岩中矿物和有机质特征及沉积方式的差异,形成了丰富的岩相类型。研究区内深水低盐度环境化学作用沉积易形成细纹层页岩,浅水较低盐度环境能够沉积断续纹层页岩和均匀块状泥岩等泥页岩,浅水高盐度条件下沉积含石膏构造泥岩、宽纹层页岩岩石。因此,在寻找非常规油气,特别是预测页岩油气有利区带时,应关注沉积环境与泥页岩岩相间的组合关系。

5 结论

(1) 东营凹陷沙河街组泥页岩沉积时期,湖泊水体发生了变迁。其中沙四纯下次亚段沉积时期盐度最高,随着湖泊淡化,水体盐度降低,至沙三下亚段已演化为盐度较低且波动稳定的湖泊环境。整个层段的水体都处于贫氧环境。

(2) 东营凹陷沙河街组泥页岩包含了均匀块状泥岩、细纹层状页岩、宽纹层状页岩、断续纹层状页岩和含石膏构造泥岩 5 种岩相类型。各岩相都是生物、化学和机械沉积相互作用下形成的。

(3) 研究区岩石类型与沉积环境密切相关,其中沙四纯下次亚段浅水高盐度条件下形成了石膏构造泥岩和少量均匀块状泥岩;沙四纯上底部高盐度水体加深的环境下形成宽纹层页岩和少量细纹层页岩沉积;沙四纯上次亚段上部盐度降低环境下形成均匀块状泥岩和少量宽纹层页岩富集;沙三下亚段深水安静且盐度较低的环境下沉积细纹层页岩。沉积环境决定了岩相的差异,对生烃能力也有较大影响。

参考文献(References)

- [1] Schieber J, Bose P K, Eriksson P G, et al. Atlas of Microbial Mat Features Preserved within the Siliciclastic Rock Record [M]. Amsterdam: Elsevier, 2007.
- [2] Schieber J, Southard J B, Schimmelmann A. Lenticular shale fabrics resulting from intermittent erosion of water-rich muds—interpreting the rock record in the light of recent flume experiments[J]. Journal of Sedimentary Research, 2010, 80 (1): 119-128.
- [3] 刘传联,徐金鲤,汪品先.藻类勃发——湖相油源岩形成的一种重要机制[J].地质论评,2001,47(2):207-210. [LIU Chuanlian, XU Jinli, WANG Pinxian. Algal blooms: The primary mechanism in the formation of lacustrine petroleum source rocks[J]. Geological Review, 2001, 47(2): 207-210.]
- [4] 王冠民,任拥军,钟建华,等.济阳坳陷古近系黑色页岩中纹层状方解石脉的成因探讨[J].地质学报,2005,79(6):834-838. [WANG Guanmin, REN Yongjun, ZHONG Jianhua, et al. Genetic analysis on lamellar calcite veins in Paleogene black shale of the Jiyang Depression[J]. Acta Geologica Sinica, 2005, 79(6): 834-838.]
- [5] 张林晔,李政,朱日房,等.济阳坳陷古近系存在页岩气资源的可能性[J].天然气工业,2008,28(12):26-29. [ZHANG Linye, LI Zheng, ZHU Rifang, et al. Resource potential of shale gas in Paleogene in Jiyang depression[J]. Natural Gas Industry, 2008, 28(12): 26-29.]
- [6] Wang B H, Qian K. Research and Practice of Geology in Shengli Oilfield[M]. Dongying: Petroleum University Press, 1992.
- [7] 张林晔,孔祥星,张春荣,等.济阳坳陷下第三系优质烃源岩的发育及其意义[J].地球化学,2003,32(1):35-42. [ZHANG Linye, KONG Xiangxing, ZHANG Chunrong, et al. High-quality oil-prone source rocks in Jiyang Depression [J]. Geochimica, 2003, 32(1): 35-42.]
- [8] 侯读杰,张善文,肖建新,等.济阳坳陷优质烃源岩特征与隐蔽油气藏的关系分析[J].地学前缘,2008,15(2):137-146.

- [HOU Dujie, ZHANG Shanwen, XIAO Jianxin, et al. The excellent source rocks and accumulation of stratigraphic and lithologic traps in the Jiyang Depression, Bohai Bay Basin, China[J]. *Earth Science Frontiers*, 2008, 15(2): 137-146.]
- [9] 李丕龙. 济阳坳陷“富集有机质”烃源岩及其资源潜力[J]. *地学前缘*, 2004, 11(1): 317-322. [LI Pulong. The organic-rich hydrocarbon source rocks and their resource potentials in Jiyang Depression[J]. *Earth Science Frontiers*, 2004, 11(1): 317-322.]
- [10] 朱光有, 金强, 张水昌, 等. 济阳坳陷东营凹陷古近系沙河街组深湖相油页岩的特征及成因[J]. *古地理学报*, 2005, 7(1): 59-69. [ZHU Guangyou, JIN Qiang, ZHANG Shuichang, et al. Characteristics and origin of deep lake oil shale of the Shahejie Formation of Paleogene in Dongying sag, Jiyang depression [J]. *Journal of Palaeogeography*, 2005, 7(1): 59-69.]
- [11] 朱光有, 金强, 周建林. 东营凹陷旋回式深湖相烃源岩研究[J]. *地质科学*, 2003, 38(2): 254-262. [ZHU Guangyou, JIN Qiang, ZHOU Jianlin. Source rock characters of cyclic deep-lake facies in the Dongying Depression [J]. *Chinese Journal of Geology*, 2003, 38(2): 254-262.]
- [12] 姜福杰, 庞雄奇, 姜振学, 等. 东营凹陷沙四上亚段烃源岩排烃特征及潜力评价[J]. *地质科技情报*, 2007, 26(2): 69-74. [JIANG Fujie, PANG Xiongqi, JIANG Zhenxue, et al. Hydrocarbon-expulsion characters and the potential resource evaluation of hydrocarbon source rocks from the Upper Section of 4th member of Shahejie Formation in Dongying Depression[J]. *Geological Science and Technology Information*, 2007, 26(2): 69-74.]
- [13] 蔡希源. 湖相烃源岩生排烃机制及生排烃效率差异性——以渤海湾盆地东营凹陷为例[J]. *石油与天然气地质*, 2012, 33(3): 329-334, 345. [CAI Xiyuan. Hydrocarbon generation-expulsion mechanisms and efficiencies of lacustrine source rocks; A case study from the Dongying sag, Bohai Bay Basin [J]. *Oil and Gas Geology*, 2012, 33(3): 329-334, 345.]
- [14] 张海峰, 刘庆, 张林晔, 等. 山东东营凹陷古近系沙河街组湖盆演化及烃源岩赋存相带[J]. *古地理学报*, 2005, 7(3): 383-397. [ZHANG Haifeng, LIU Qing, ZHANG Linye, et al. Lacustrine basin evolution and favorable sedimentary facies belt for source rocks abounding in the Shahejie formation of Paleogene in Dongying Sag, Shandong Province[J]. *Journal of Palaeogeography*, 2005, 7(3): 383-397.]
- [15] 曾翔, 蔡进功, 董哲, 等. 泥页岩沉积特征与生烃能力——以东营凹陷沙河街组三段中亚段-沙河街组四段上亚段为例[J]. *石油学报*, 2017, 38(1): 31-43. [ZENG Xiang, CAI Jingong, DONG Zhe, et al. Sedimentary characteristics and hydrocarbon generation potential of mudstone and shale: A case study of Middle Submember of Member 3 and Upper Submember of Member 4 in Shahejie Formation in Dongying sag[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2017, 38(1): 31-43.]
- [16] 王爱华. 不同形态锶钡比的沉积环境判别效果比较[J]. *沉积学报*, 1996, 14(4): 168-173. [WANG Aihua. Discriminant effect of sedimentary environment by the Sr/Ba ratio of different existing forms[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 1996, 14(4): 168-173.]
- [17] 史忠生, 陈开远, 史军, 等. 运用锶钡比判定沉积环境的可行性分析[J]. *断块油气田*, 2003, 10(2): 12-16. [SHI Zhongsheng, CHEN Kaiyuan, SHI Jun, et al. Feasibility analysis of the application of the ratio of Strontium to Barium on the identifying sedimentary environment[J]. *Fault-Block Oil & Gas Field*, 2003, 10(2): 12-16.]
- [18] Abanda P A, Hannigan R E. Effect of diagenesis on trace element partitioning in shales[J]. *Chemical Geology*, 2006, 230(1-2): 42-59.
- [19] Tribovillard N, Algeo T J, Lyons T, et al. Trace metals as paleoredox and paleoproductivity proxies: An update[J]. *Chemical Geology*, 2006, 232(1-2): 12-32.
- [20] Dean W E, Gardner J V, Piper D Z. Inorganic geochemical indicators of glacial-interglacial changes in productivity and anoxia on the California continental margin[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1997, 61(21): 4507-4518.
- [21] 乔锦琪, 刘洛夫, 尚晓庆, 等. 泥页岩中微量元素 V、Ni、V/Ni与有机质丰度及成岩演化关系研究——以准噶尔盆地阜康凹陷为例[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 2016, 35(4): 756-768. [QIAO Jinqi, LIU Luofu, SHANG Xiaoping, et al. The relationship between V, Ni or V/Ni ratio and each of organic matter abundance and diagenetic evolution stages in shales; taking the shales in Fukang Sag of Junggar Basin for example[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 2016, 35(4): 756-768.]

LITHOFACIES OF MUDSTONE AND SHALE DEPOSITS OF THE Es³z-Es⁴s FORMATION IN DONGYING SAG AND THEIR DEPOSITIONAL ENVIRONMENT

LIU Qing¹, ZENG Xiang², WANG Xuejun¹, CAI Jingong²

(1. Research Institute of Petroleum Exploration and development, Shengli Oilfield Company, SINOPEC, Dongying 257015;

2. State Key Laboratory of Marine Geology, Tongji University, Shanghai 200092)

Abstract: The features of mineralogy, organic matter and lithofacies of mudstones and shale are controlled by depositional environment. An amount of samples selected from the Shahejie Formation in the Dongying depression are studied by the authors by means of microscope, X-ray diffraction, pyrolytic analysis and chemical analysis. The results are used to establish the relationship between the element geochemistry and types of lithofacies, upon which the relationship between depositional environment and lithofacies is further revealed. The lithofacies of mudstone/shale includes thin laminated shale, discontinuous laminated shale, thick laminated shale, homogenous massive mudstone and the mudstone with anhydrite-relict. Their depositional environments are obviously different. During the time while the sub-member of Es⁴c_x-Es³x was deposited, the lake evolved from deep to shallow and from saline to fresh, and was in an anoxic environment during the whole period. There is a close relationship between lithology and environment. In the early Es⁴c, it was a shallow and salty lake with deposition of anhydrite-relict mudstone and homogeneous massive mudstone; the upper Es⁴c is mainly consisting of laminated shale at the bottom and homogeneous massive mudstone on the top, as the lake changed from a salty to a brackish lake; the lower Es³ represents a deep fresh lake, rich in laminated shale. In conclusion, both the rock types and their hydrocarbon potentials are controlled by depositional environment. In this regard, further research is suggested on the relationship between lithofacies of mudstone/shale and their depositional environment.

Key words: lithofacies of mudstone and shale; sedimentary environment; the Shahejie Formation; Dongying Sag