

# 中始新世气候演化与页岩有机质富集: 以东营凹陷为例\*

郑 凯<sup>1</sup> 孔祥鑫<sup>1</sup> 姜在兴<sup>1</sup> 蒋 龙<sup>2</sup> 葛涛元<sup>1</sup>  
杨叶芃<sup>3</sup> 王 成<sup>1</sup> 彭艳霞<sup>2</sup>

1 中国地质大学(北京)能源学院, 北京 100083

2 中国石化胜利油田分公司勘探开发研究院, 山东东营 257015

3 中国石油勘探开发研究院, 北京 100083

**摘 要** 渤海湾盆地东营凹陷牛庄注陷沙河街组四段上亚段(沙四上亚段)发育数百米厚富有机质页岩, 该页岩发育时期正处于东亚地区中始新世气候波动的关键阶段, 但页岩沉积演化及其有机质富集对气候演化的响应尚有待研究。通过岩心和薄片观察、有机和元素地球化学分析, 探讨在气候演化约束下有机质富集机制。根据岩相组合和地化参数, 将沙四上亚段分为 3 个阶段: 第 1 阶段气候相对干冷, TOC 均值为 2.52%, 发育中有机质韵律型纹层状云质细粒沉积岩和高有机质韵律型纹层状混合细粒沉积岩; 第 2 阶段气候相对暖湿, TOC 均值为 3.29%, 发育高有机质韵律型纹层状含石英灰质细粒沉积岩和高有机质韵律型纹层状混合细粒沉积岩; 第 3 阶段气候暖湿, TOC 均值为 2.78%, 发育高有机质非韵律型纹层状混合细粒沉积岩和中高有机质韵律型纹层状含石英灰质细粒沉积岩。根据岩相组合和沉积环境变化趋势, 建立牛庄注陷沙四上亚段纯上段沉积模式。在相对暖湿气候下, 适量的陆源输入会给湖盆带来陆源碎屑有机质和营养物质, 利于有机质富集; 在相对于冷气候下浅水高盐的环境会抑制水生生物的生长和繁殖, 在暖湿气候下过强的陆源输入稀释水体有机质含量并带来大量氧气, 均不利于有机质富集。本次研究可为中国东部陆相断陷湖盆富有机质页岩地质甜点分析提供借鉴意义。

**关键词** 沉积环境 细粒沉积 有机质富集 中始新世 东营凹陷

**第一作者简介** 郑凯, 男, 1999 年生, 硕士研究生, 主要从事沉积学研究。E-mail: kaizheng0127@163.com。

**通讯作者简介** 孔祥鑫, 男, 1990 年生, 副教授, 主要从事细粒沉积学与非常规油气储集层研究。E-mail: kongxx@cugb.edu.cn。

中图分类号: P512.2; P618.2 文献标志码: A

## Climate evolution and shale organic matter enrichment during the Middle Eocene: a case study of Dongying sag

ZHENG Kai<sup>1</sup> KONG Xiangxin<sup>1</sup> JIANG Zaixing<sup>1</sup> JIANG Long<sup>2</sup> GE Taoyuan<sup>1</sup>  
YANG Yepeng<sup>3</sup> WANG Cheng<sup>1</sup> PENG Yanxia<sup>2</sup>

1 School of Energy Resources, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China

2 Petroleum Exploration and Production Research Institute, Shengli Oil field Company, Sinopec, Shandong Dongying 257015, China

3 Research Institute of Petroleum Exploration and Development, PetroChina, Beijing 100083, China

\* 国家自然科学基金(编号: 42402114)和中央高校基本科研业务费专项基金(编号: 2652022035)联合资助。[Co-funded by the National Natural Science Foundation of China (No. 42402114) and the Fundamental Research Funds for the Central Universities (No. 2652022035)]

收稿日期: 2024-04-14 改回日期: 2024-08-22

**Abstract** Several hundred meters of organic-rich shale are developed in the upper 4th Member of the Shahejie Formation in the Niuzhuang sub-sag of the Dongying sag, Bohai Bay Basin. This shale formation occurred during a critical period of climate fluctuations in the Middle Eocene in East Asia. However, the sedimentary evolution of this shale and its organic matter enrichment mechanisms in response to climate changes remain insufficiently studied. Through core and thin section observations, as well as organic and elemental geochemical analyses, we explore the mechanisms of organic matter enrichment under climatic constraints. Based on lithofacies assemblages and geochemical parameters, the study interval is divided into three stages: The first stage was characterized by a relatively dry and cold climate, with an average Total Organic Carbon (TOC) content of 2.52%. This stage featured rhythmically layered, dolomitic, fine-grained sedimentary rocks with moderate organic matter content and high-organic-matter rhythmic layered mixed fine-grained sedimentary rocks. The second stage experienced a relatively warm and humid climate, with an average TOC of 3.29%. It was marked by the development of high-organic-matter rhythmically layered quartz-containing calcareous fine-grained sedimentary rocks and high-organic-matter rhythmically layered mixed fine-grained sedimentary rocks. The third stage was a warm and humid period, with an average TOC of 2.78%. This stage was characterized by the development of high-organic-matter non-rhythmically layered mixed fine-grained sedimentary rocks and medium-to high-organic-matter rhythmically layered quartz-containing fine-grained calcareous sedimentary rocks. A sedimentary model for the Upper Fourth Member of the Shahejie Formation in the Niuzhuang sub-sag has been established based on lithofacies assemblages and trends in sedimentary environment changes. Under relatively warm and humid climates, moderate terrestrial input can bring terrestrial detrital organic matter and nutrients to the lake basin, which is beneficial for organic matter enrichment. Conversely, under relatively dry and cold climates, shallow water with high salinity can inhibit the growth and reproduction of aquatic organisms. Under warm and humid climates, excessive terrestrial input can dilute the organic matter concentration in water and introduce large amounts of oxygen, both of which are unfavorable for organic matter enrichment. This study provides valuable insights into the analysis of geological sweet spot analysis of organic-rich shale in continental faulted lake basins in eastern China.

**Key words** depositional environment, fine-grained sedimentary rocks, organic matter enrichment, Middle Eocene, Dongying sag

**About the first author** ZHENG Kai, born in 1999, is a master's degree candidate primarily engaged in the study of sedimentology. E-mail: kaizheng0127@163.com.

**About the corresponding author** KONG Xiangxin, born in 1990, is an associate professor, and specializes in fine-grained sedimentology and unconventional oil and gas reservoirs. E-mail: kongxx@cugb.edu.cn.

## 0 引言

页岩有机质的富集程度是表征页岩油气勘探潜力的重要指标之一(姜在兴等, 2013; 郭旭升等, 2023; 孙龙德等, 2023)。页岩有机质富集受控于原始生产力、保存条件和无机物质的稀释等条件, 这些因素又进一步受沉积环境和气候变化的约束, 特别是地质时期发生的关键气候转变与地质环境突变等事件(王成善和胡修棉, 2005; Katz and Lin, 2014; 黎茂稳等, 2020; 邱振和邹才能, 2020)。

因此, 厘清页岩有机质富集时期的气候及环境条件的演化特征是理解有机质富集机制的重要前提。

中始新世是新生代全球和东亚地区气候转变的关键阶段, 其结束了早始新世的全球极端高温并开启了漫长的全球变冷过程(Zachos *et al.*, 2001; Westerhold *et al.*, 2020), 该时期东亚地区的干湿气候分带发生了意义深远的变化, 东部中、低纬度地区的气候出现了由于旱向湿润的转变, 似季风气候可能在中始新世东亚地区初步发育(Licht *et al.*,

2014; Wu *et al.*, 2022; Kong *et al.*, 2024)。这一时期在中国中东部地区的湖相沉积地层中广泛发育了具有页岩油气勘探开发价值的富含有机质的碳酸盐质细粒沉积岩 (姜在兴等, 2021; Kong *et al.*, 2022)。

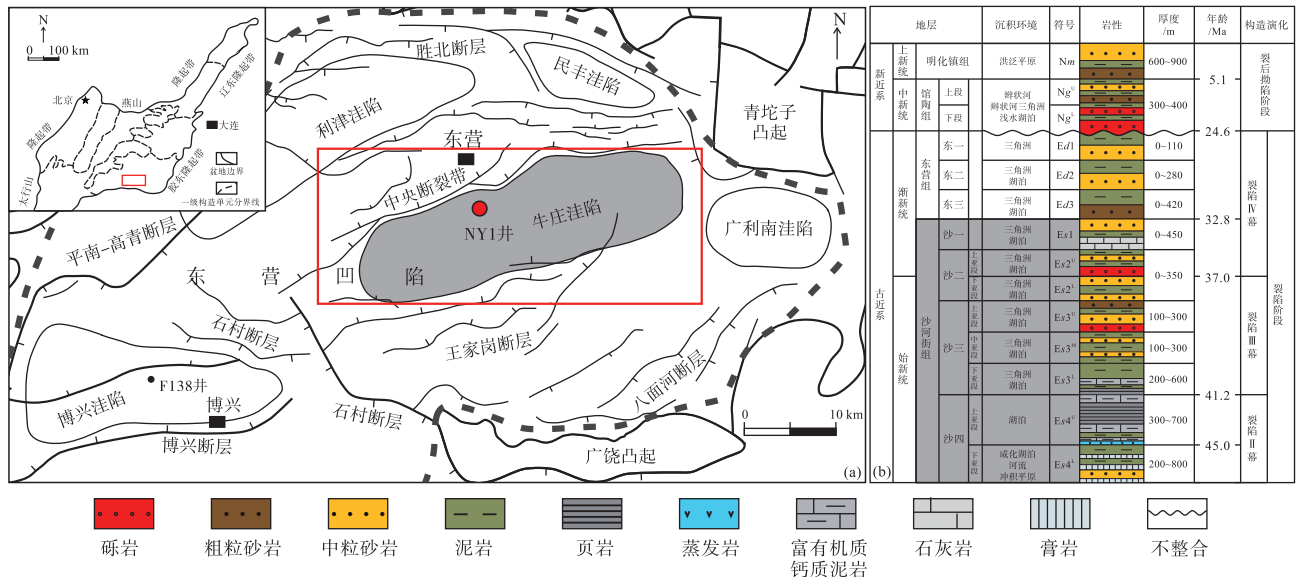
东营凹陷中始新统沙四上亚段纯上段一沙三下亚段富含有机质页岩蕴含丰富的页岩油气资源 (刘惠民, 2022), 其有机质富集变化与富集机制长期以来一直是关注的焦点。前期研究揭示了东营凹陷页岩有机质富集变化与页岩岩相类型及其组合变化的潜在关联 (Liang *et al.*, 2017; 马义权等, 2017), 提出氧化还原条件、湖水深度、盐度、古生产力、物质来源和古地貌等条件的波动控制了有机质的富集程度 (朱光有等, 2005; 杜学斌等, 2018; 王勇等, 2019), 并进一步探究了海侵和火山、热液活动等可能的地质事件对页岩沉积环境和页岩物质形成的影响 (万从礼等, 2003; Bai *et al.*, 2018)。近年来, 米兰科维奇旋回分析开始被应用于页岩沉积研究, 并提出地球轨道周期要素可能是页岩有机质富集条件变化的重要驱动力 (彭军等, 2022; 栾旭伟等, 2024)。但是, 页岩的有机质含量波动并不是简单地遵循天文轨道参数的变化, 而是会呈现出更为复杂的变化趋势, 需要探究有机质富集时期的地质事件作用以理解在不同时期中不同尺度下影响有机质非均质富集的条件发

生的原因。东营凹陷中始新统富有机质页岩大致形成于 43.55—38.97 Ma, 这一时期被认为经历了始新世季风气候的发展, 使得东营凹陷页岩沉积环境发生了明显的变化 (Kong *et al.*, 2023)。因此, 需要从深时季风气候演变的角度出发, 探究东营凹陷中始新统页岩有机质差异富集的机制。

本研究以东营凹陷牛庄洼陷 NY1 井沙四上亚段纯上段为研究对象, 基于沉积特征表征、总有机碳含量 (TOC) 以及元素地球化学分析, 系统评价烃源岩的富集程度和母质来源, 探讨季风气候演化对有机质富集控制因素如水体盐度、水深、氧化还原条件、陆源输入及生产力的影响, 从气候演化的角度分析陆相湖盆沉积有机质的富集机制, 为中国东部陆相断陷湖盆富有机质页岩地质甜点分析提供借鉴意义。

### 1 区域地质背景

济阳拗陷位于渤海湾盆地东南部, 包含东营、沾化、车镇和惠民 4 个凹陷。东营凹陷为济阳拗陷南部的一个典型的次级断陷, 北临滨县凸起、陈家庄凸起, 东接青坨子凸起, 南部地层超覆于鲁西南隆起之上, 受盆地断裂活动和中央隆起带抬升的影响, 东营凹陷被分割成牛庄、博兴、利津和民丰 4 个洼陷 (图 1-a)。研究区牛庄洼陷位于东营凹陷中央背斜带和王家岗—陈官庄断层之间, 继承东营



a—东营凹陷次级构造单元和牛庄洼陷位置; b—古近系—新近系地层发育简表

图 1 渤海湾盆地东营凹陷牛庄洼陷位置及地层划分

Fig. 1 Location and stratigraphic division of Niuzhuang sub-sag, Dongying sag of Bohai Bay Basin

凹陷箕状断陷盆地“北断南超、北深南浅”的构造沉积特点(王冠民等, 2024)。

牛庄洼陷古近系沉积地层厚度最大可达7000 m(吴靖等, 2018), 由下至上依次发育孔店组(*Ek*)、沙河街组(*Es*)和东营组(*Ed*)。沙河街组分为四段, 由下至上分别为沙四段、沙三段、沙二段和沙一段(图1-b), 沙四段(*Es4*)分为上、下2个亚段, 沙四上亚段又分为纯上和纯下2段。沙四段沉积晚期至沙三段沉积早期, 洼陷为半深水—深水环境, 沉积了一套厚层暗色页岩沉积。其中沙四上亚段纯上段暗色页岩沉积充填了整个洼陷, 呈现东厚西薄的趋势(姜福杰等, 2013), 是本次研究的对象。

本研究以牛庄洼陷 NY1 井沙四上亚段纯上段(深度 3315.08~3475.23 m)为研究层段。基于胜利油田采集的自然伽马(GR)测井数据(采样间隔 0.125 m), 结合多项测试分析化验, 其中岩石薄片(130张)由北京日月石矿业技术开发有限公司制作, 常量元素、微量元素和矿物含量(共计 616 块)、总有机碳和热解(共计 154 个)测试均由北京克拉通岩创科技有限公司完成。利用测井资料、岩石薄片和矿物含量数据, 对研究层段烃源岩的岩相特征进行识别与划分。通过总有机碳和热解数据, 分析有机质的富集特征和母质来源。基于常量元素、微量元素和黄铁矿等数据定量恢复了古气候、古盐度、古水深、陆源输入与古生产力, 并与 TOC 数据进行对比, 探讨气候演化约束下的有机质富集机制。

## 2 矿物组成和岩相特征

### 2.1 矿物组成特征

通过对 130 个样品的薄片观察和 616 个样品的 X 衍射(XRD)分析, 识别出研究区主要细粒物质类型包括碳酸盐矿物、石英、长石和黏土矿物。

方解石主要赋存于纹层中, 或在块状泥岩中分散分布。研究区以泥晶方解石和微亮晶方解石最为常见, 其多与富含黏土矿物的碎屑纹层以及有机质纹层形成有规律的韵律型纹层组合(图 2-a)。垂向上方解石含量在沙四上亚段纯上段中、下部呈波动变化, 至上部富集程度增加(图 3)。

研究区白云石类型包括泥晶白云石和微晶白云

石。泥晶白云石多形成较为均质的纹层, 与富有机质纹层互层(图 2-b)。微晶白云石发育在富黏土纹层中, 与泥晶方解石纹层互层(图 2-c)。垂向上白云石主要富集在沙四上亚段纯上段下部(图 3)。

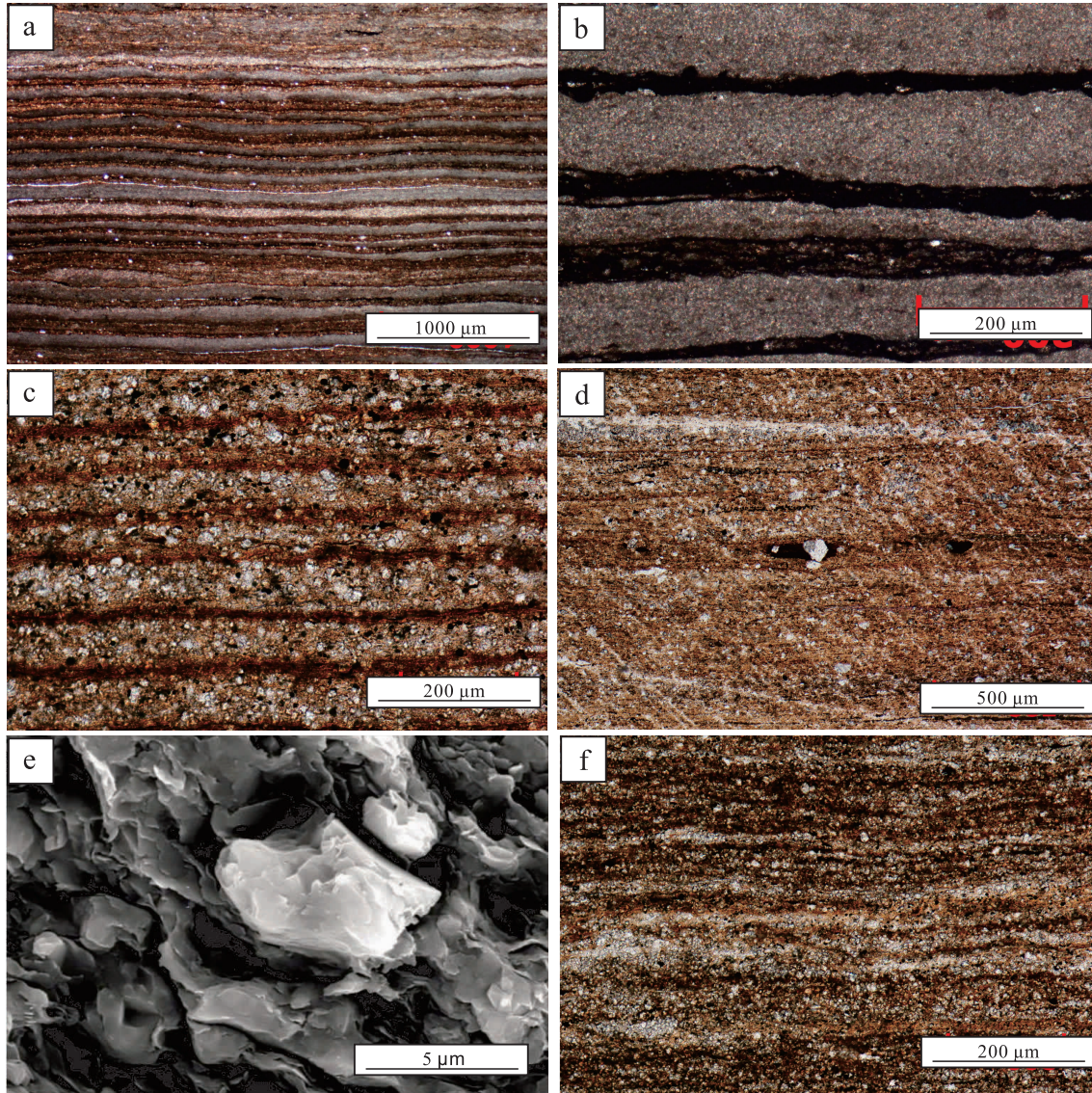
石英和长石颗粒主要分布在富含黏土矿物的碎屑纹层中, 或分散分布在块状泥岩内。通过镜下观察, 石英颗粒和长石物质多为棱角一次棱角状(图 2-d, 2-e), 为陆源碎屑物质输入。

黏土矿物主要分布在碎屑纹层中, 这些黏土矿物多呈片状, 顺层分布, 为悬浮沉积产物。在透镜状泥晶发育的纹层内, 黏土矿物以基质形式包裹泥晶透镜体, 黏土富集体内部仍夹有部分陆源碎屑颗粒(图 2-f)。垂向上黏土矿物含量在沙四上亚段纯上段下部上升, 在中部呈波动富集, 在上部先降低后增高(图 3)。

根据矿物组成的富集变化, 将牛庄洼陷沙四上亚段纯上段页岩分为 3 个演化阶段(图 3)。其中第 1 阶段富集白云石, 总有机碳(TOC)含量介于 0.58%~6.51%之间, 均值 2.52%; 第 2 阶段矿物含量整体呈波动富集, 相对上一阶段白云石含量减少, 方解石含量增加, 长英质矿物和黏土矿物含量增加, TOC 含量较高, 其值介于 1.35%~7.25%之间, 均值 3.29%; 第 3 阶段富集方解石, 长英质矿物含量相对上一阶段有所增加, 白云石含量较低, TOC 含量相对较高, 其值介于 1.23%~6.53%之间, 均值 2.78%。

### 2.2 岩相特征

以碳酸盐、黏土及长英质矿物含量 50%为界限的划分方案, 将细粒沉积岩分为碳酸盐细粒沉积岩、黏土细粒沉积岩、长英细粒沉积岩和混合细粒沉积岩(图 4)(姜在兴等, 2013); 以有机质的含量 1.0%、2.0%为界划分出低、中和高有机质细粒沉积岩(孔祥鑫, 2020); 进一步将细粒沉积岩的层组合类型分为韵律型和非韵律型, 受水文和气候条件控制的纹层组合具有韵律性(指较长周期内的重复叠加), 而受事件过程影响较深的纹层组合不具有韵律性(指叠加规律不明确或仅是短期内具有一定的规律), 前者以有机—无机关联反应作为物质形成的重要机制, 后者以物理搬运和沉积为主(孔祥鑫等, 2016)。基于矿物组成、有机质含



a—NY1 井, 3420.90 m, 单偏光, 泥晶方解石和微亮晶方解石纹层; b—NY1 井, 3466.15 m, 正交光, 云泥纹层与有机质层叠加; c—NY1 井, 3301.82 m, 单偏光, 含微晶白云石, 发育在富黏土纹层中, 含有黄铁矿, 褐红色为泥晶方解石纹层; d—NY1 井, 3358.97 m, 单偏光, 黏土纹层中的石英; e—N55-X1 井, 3335.25 m, 斜长石; f—NY1 井, 3325.73 m, 单偏光, 黏土纹层

图 2 东营凹陷牛庄洼陷沙四上亚段纯上段矿物特征

Fig. 2 Mineral characteristics of the Upper Pure Layer of Upper Submember of 4th Member of Shahejie Formation in Niuzhuang sub-sag, Dongying sag

量和沉积构造特征, 将牛庄洼陷沙四上亚段纯上段划分出 5 种岩相类型 (表 1): 中高有机质韵律型纹层状含石英灰质细粒沉积岩 (L1)、高有机质非韵律型纹层状混合细粒沉积岩 (L2)、高有机质韵律型纹层状含石英灰质细粒沉积岩 (L3)、高有机质韵律型纹层状混合细粒沉积岩 (L4) 和中有机质韵律型纹层状云质细粒沉积岩 (L5)。

中高有机质韵律型纹层状含石英灰质细粒沉积

岩 (L1) 主要发育在牛庄洼陷沙四上亚段纯上段的细粒沉积岩层段上段。该岩相在岩心上呈深灰色, 页理发育且不见其他明显构造特征 (图 5-a), 薄片观察可见明暗相间纹层, 为方解石纹层与黏土纹层互层, 方解石纹层具有泥晶和微亮晶的变化 (图 5-b)。

高有机质非韵律型纹层状混合细粒沉积岩 (L2) 主要发育在牛庄洼陷沙四上亚段纯上段的细

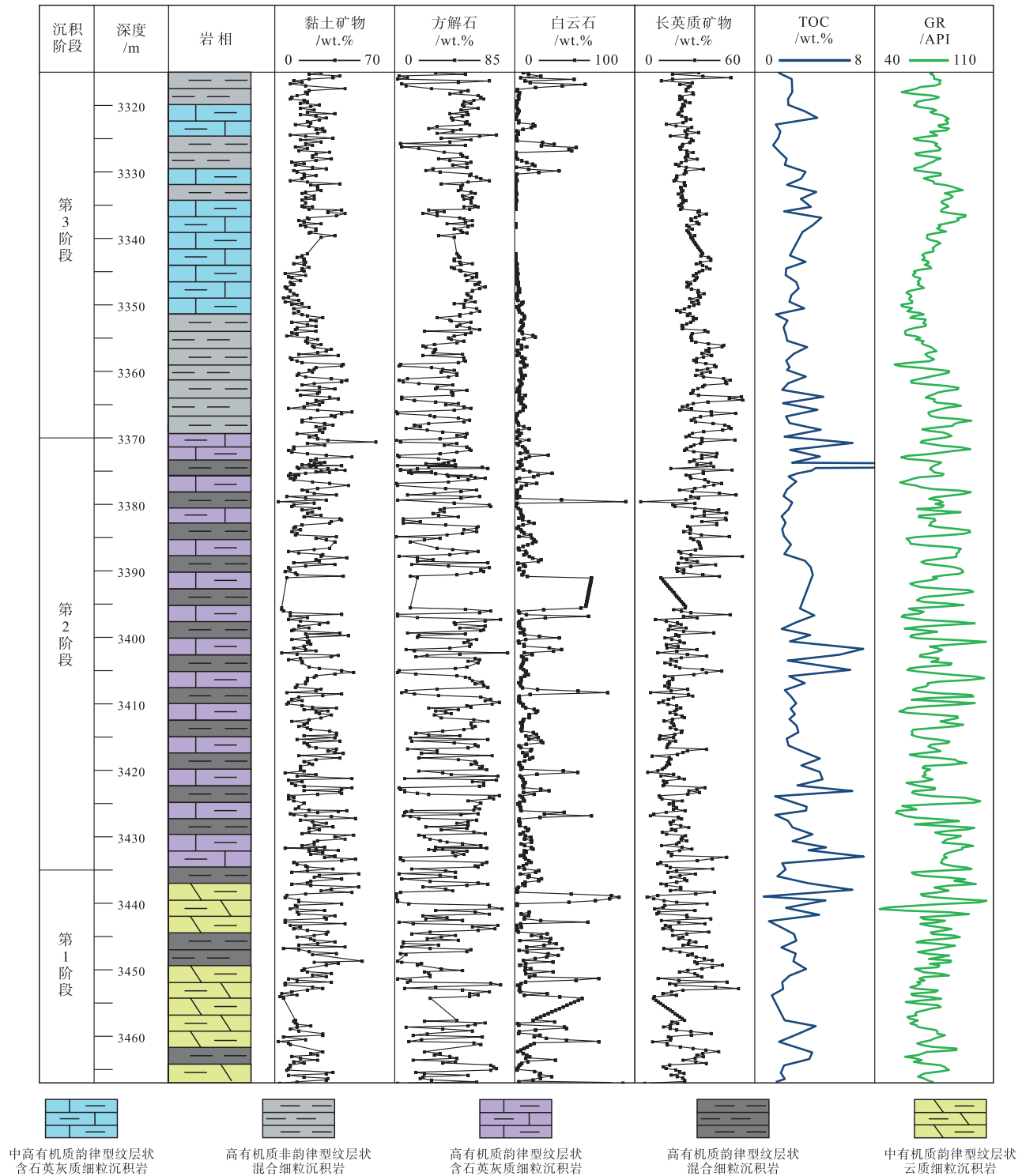


图 3 东营凹陷牛庄洼陷 NY1 井沙四上亚段纯上段沉积特征

Fig. 3 Sedimentary characteristics in the Upper Pure Layer of Upper Submember of 4th Member of Shahejie Formation of Well NY1 in Niuzhuang sub-sag, Dongying sag

粒沉积岩层段上段。该岩相在岩心上呈灰褐色，具有纹层特征但较 L1 不明显(图 5-c)，薄片观察其纹层特征较弱，岩心上的明暗差异推测与纹层组合

中有机质含量变化有关，可见部分灰泥透镜体(图 5-d)。

高有机质韵律型纹层状含石英灰质细粒沉积岩

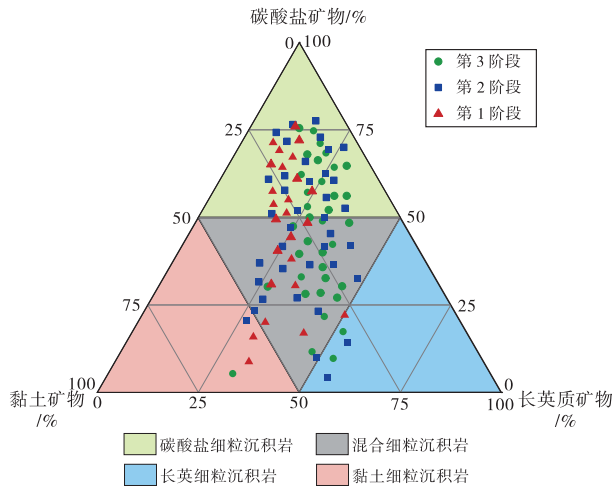


图 4 东营凹陷牛庄洼陷沙四上亚段纯上段  
细粒沉积岩岩石类型划分三角图

Fig. 4 Triangle diagram of rock type classification for fine-grained sedimentary rocks of the Upper Pure Layer of Upper Submember of 4th Member of Shahejie Formation in Niuzhuang sub-sag, Dongying sag

(L3) 主要发育在牛庄洼陷沙四上亚段纯上段的细粒沉积岩层段中段。该岩相在岩心上纹层特征明显，发育明暗相间纹层(图 5-e)，薄片观察可见页理发育，由较厚的有机质层、碳酸盐层和黏土层组成(图 5-f)。

高有机质韵律型纹层状混合细粒沉积岩(L4)主要发育在牛庄洼陷沙四上亚段纯上段的细粒沉积岩层段中、下段。该岩相在岩心上页理发育，整体颜色较深，暗色纹层相对较厚，部分呈现破碎(图 6-a)，薄片观察可见浅色纹层为黏土矿物与隐晶状方解石的混合层，暗色层为富含有机质的黏土矿物层(图 6-b)。

中有机质韵律型纹层状云质细粒沉积岩(L5)主要发育在牛庄洼陷沙四上亚段纯上段的细粒沉积

岩层段下段。该岩相在岩心上呈灰黑色，页理发育明显，可见明暗相间纹层(图 6-c)，薄片观察可见微亮晶白云石纹层、富含黏土矿物的碎屑纹层及有机质纹层形成韵律型纹层组合(图 6-d)。

### 3 有机质富集特征

牛庄洼陷沙四上亚段纯上段有机质含量分布具有显著的阶段差异，自下而上分为 3 个阶段，TOC 均值整体表现为自下而上先增加后略微减少的分布特征，第 2 阶段最高，均值为 3.29%；第 3 阶段次之，均值为 2.78%；第 1 阶段最低，均值为 2.52%(图 7-a)。研究区烃源岩整体 TOC 值变化范围较大，介于 0.58%~11.4% 之间，平均值为 2.89%；以有机质含量 1.0%、2.0% 为界划分为低、中和高有机质烃源岩；其中 2.03% 的样品为低有机质烃源岩，20.95% 的样品为中有机质烃源岩，77.02% 的样品为高有机质烃源岩(图 7-b)。

从 T<sub>max</sub>-HI 关系图(图 8)中可以看出，牛庄洼陷沙四上亚段纯上段的干酪根类型整体以 I、II<sub>1</sub> 型为主，其中第 1 阶段以 I、II<sub>1</sub> 型为主，第 2 阶段以 I 型为主，第 3 阶段以 I 型为主，含有少量 II<sub>1</sub> 型。

### 4 古气候与沉积环境

#### 4.1 古气候

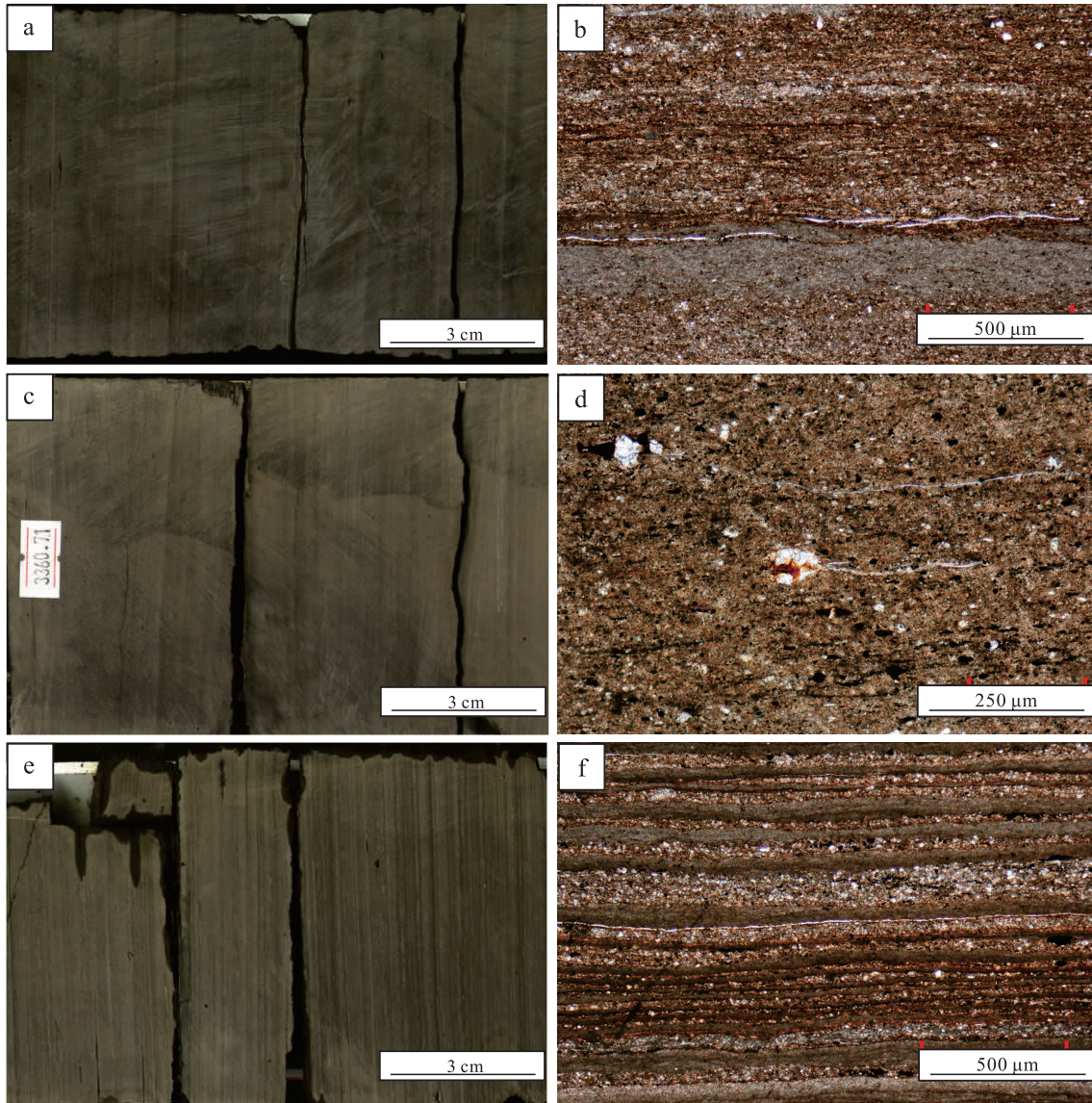
在上地壳化学风化过程中，Ca、Na 和 K 元素逐渐从长石中析出，导致在风化过程中，氧化铝与碱金属的比值增高。据此，Nesbitt 和 Young (1982) 提出 CIA (化学蚀变指数) 的概念，并用来判断物源区的风化程度。CIA 的计算如下：

表 1 东营凹陷牛庄洼陷沙四上亚段纯上段岩相类型与物质组成

Table 1 Lithofacies types and material composition of the Upper Pure Layer of Upper Submember of 4th Member of Shahejie Formation in Niuzhuang sub-sag, Dongying sag

岩相	方解石/%	白云石/%	黏土矿物/%	石英/%	长石/%	TOC 含量/%
L1	50.00~67.00/58.60	1.00~17.00/5.60	6.00~18.00/11.60	7.00~31.00/20.80	1.00~3.10/1.70	1.50~3.35/2.30
L2	5.00~44.00/31.50	1.00~18.00/4.60	21.00~62.00/37.60	16.00~30.00/22.20	1.00~13.00/3.70	1.93~3.49/2.55
L3	50.00~73.00/59.80	3.00~29.00/10.20	2.00~19.00/8.30	10.00~29.00/18.10	1.00~5.00/2.00	1.99~4.02/2.56
L4	2.00~46.00/20.00	1.00~39.00/10.30	16.00~57.00/30.30	17.00~42.00/26.70	2.00~21.00/7.80	1.90~8.59/3.01
L5	6.00~32.00/20.00	27.00~75.00/53.80	3.00~13.00/5.80	13.00~18.00/15.00	1.00~10.00/3.80	1.20~1.99/1.59

注：50.00~67.00/58.60 为“最小值~最大值/平均值”。



a—中高有机质韵律型纹层状含石英灰质细粒沉积岩，岩心，3331.92~3332.02 m；b—中高有机质韵律型纹层状含石英灰质细粒沉积岩，普通薄片，3331.95 m，单偏光；c—高有机质非韵律型纹层状混合细粒沉积岩，岩心，3360.71~3360.81 m；d—高有机质非韵律型纹层状混合细粒沉积岩，普通薄片，3360.07 m，单偏光；e—高有机质韵律型纹层状含石英灰质细粒沉积岩，岩心，3390.05~3390.15 m；f—高有机质韵律型纹层状含石英灰质细粒沉积岩，普通薄片，3390.1 m，单偏光

图 5 东营凹陷牛庄洼陷 NY1 井沙四上亚段纯上段岩相特征（一）

Fig. 5 Lithofacies characteristics in the Upper Pure Layer of Upper Submember of 4th Member of Shahejie Formation of Well NY1 in Niuzhuang sub-sag, Dongying sag ( I )

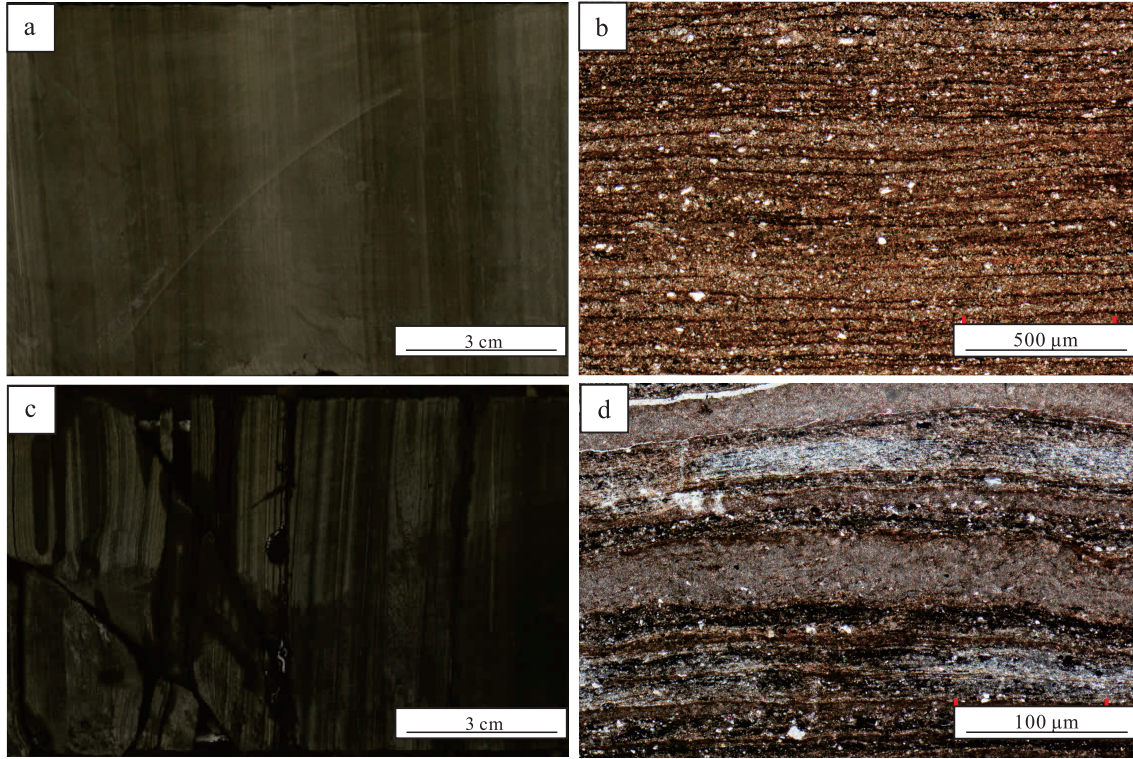
$$CIA = [ Al_2O_3 / ( Al_2O_3 + CaO^* + Na_2O + K_2O ) ] \times 100 \quad (1)$$

式中氧化物以摩尔数为单位，CaO\* 是指硅酸盐矿物中的 CaO，而非硅酸盐（碳酸盐和磷酸盐）矿物中也含有 CaO，因此，在计算 CIA 时需要去掉非硅酸盐矿物中的 CaO。Mclennan (1993) 提出间接计算 CaO\* 的方法：

$$CaO_{\text{剩余}} = CaO - P_2O_5 \times 10/3 \quad (2)$$

若  $CaO_{\text{剩余}} < Na_2O$ ，令  $CaO^* = CaO_{\text{剩余}}$ ；若  $CaO_{\text{剩余}} > Na_2O$ ，令  $CaO^* = Na_2O$ 。

高 CIA 值表明风化过程中 Ca、Na、K 等元素相对于稳定的 Al 和 Ti 元素的大量流失，反映了温暖、潮湿气候下相对较强的风化程度；反之，低 CIA 值反映了寒冷、干燥气候下相对较弱的风化程



a—高有机质韵律型纹层状混合细粒沉积岩，岩心，3397.02~3397.12 m；b—高有机质韵律型纹层状混合细粒沉积岩，普通薄片，3397.05 m，单偏光；c—中有机质韵律型纹层状云质细粒沉积岩，岩心，3450.72~3450.82 m；d—中有机质韵律型纹层状云质细粒沉积岩，普通薄片，3450.78 m，单偏光

图 6 东营凹陷牛庄洼陷 NY1 井沙四上亚段纯上段岩相特征 (二)

Fig. 6 Lithofacies characteristics in the Upper Pure Layer of Upper Submember of 4th Member of Shahejie Formation of Well NY1 in Niuzhuang sub-sag, Dongying sag ( II )

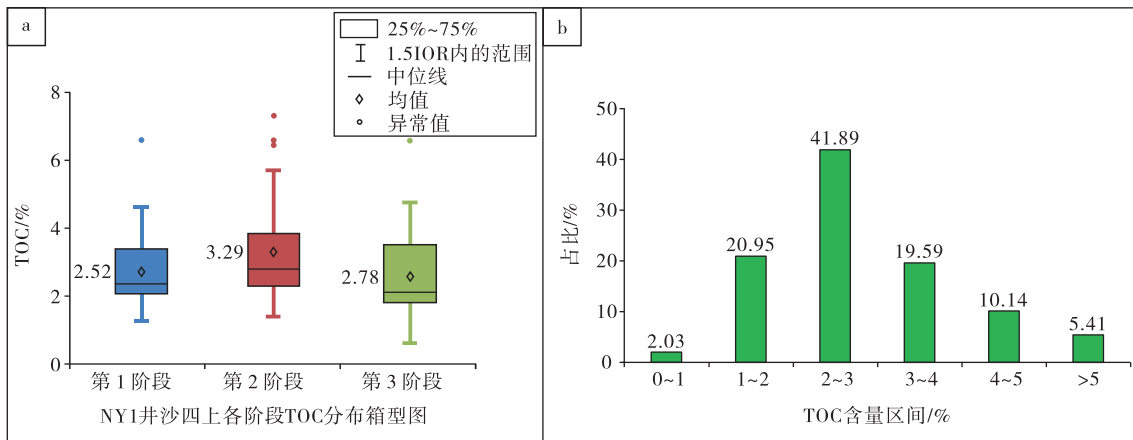


图 7 东营凹陷牛庄洼陷沙四上亚段纯上段细粒沉积岩中有机质含量分布特征

Fig. 7 Distribution characteristics of organic matter content in fine-grained sedimentary rocks in the Upper Pure Layer of Upper Submember of 4th Member of Shahejie Formation of Niuzhuang sub-sag, Dongying sag

度 (Fedo *et al.*, 1995)。

在相对干冷气候的作用下，相较于元素的化学风化，机械风化明显处于主导地位，Na/K 值较

高；在暖湿气候的作用下，地表温度会增加，降雨量升高，元素的化学风化起主导作用，Na/K 值较低 (王鹏万等, 2021)。

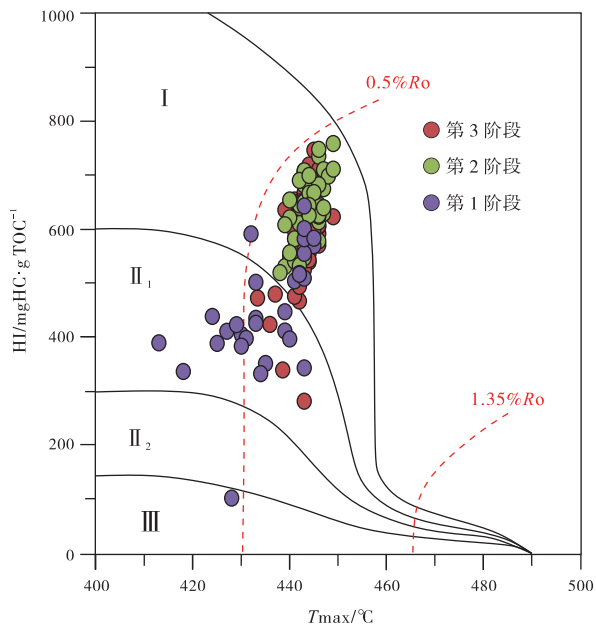


图 8 东营凹陷牛庄洼陷沙四上亚段纯上段烃源岩有机质类型图

Fig. 8 Histogram of organic matter types in source rocks of the Upper Pure Layer of Upper Submember of 4th Member of Shahejie Formation in Niuzhuang sub-sag, Dongying sag

NY1 井 3435~3467 m 为第 1 阶段，主要发育中有机质韵律型纹层状云质细粒沉积岩 (L5)，部分发育高有机质韵律型纹层状混合细粒沉积岩 (L4)。CIA 值较低，均值为 58.68；Na/K 值较高，均值为 0.8，并在 3454.4 m 处出现顶值，指示该阶段为相对干冷气候。

3370~3435 m 为第 2 阶段，有机质含量稍有增加，发育高有机质韵律型纹层状含石英灰质细粒沉积岩 (L3) 与高有机质韵律型纹层状混合细粒沉积岩 (L4) 互层。CIA 值可见大幅度增高，均值增至 66.12；Na/K 值大幅度降低，均值降至 0.5。在该阶段仍出现零星的高值点，如 3431.71 m，Na/K 值为 0.9；3395.8 m，Na/K 值为 0.67。此变化指示该阶段整体气候不稳定，且逐渐由相对干冷向相对暖湿进行转变。

3315~3370 m 为第 3 阶段，有机质含量保持较高值，底部发育高有机质非韵律型纹层状混合细粒沉积岩 (L2)，顶部发育中高有机质韵律型纹层状含石英灰质细粒沉积岩 (L1)。CIA 值持续增高，均值增至 70.82；Na/K 值持续降低，均值降至 0.43。此变化指示该阶段气候由上阶段的相对暖湿转变为暖湿。

牛庄洼陷沙四上亚段纯上段的气候变化具有旋回性与阶段性的特点。垂向上 CIA 和 Na/K 值的变化趋势，指示其气候变化呈“相对于冷—相对暖湿—暖湿”的特点(图 9-a)。

## 4.2 古盐度

Ba 对比于 Sr 迁移能力较弱，在盐度增大的情况下，Ba 先沉淀，Sr 的含量相对于 Ba 有所上升，因此细粒沉积岩中 Sr/Ba 值与古盐度呈正相关(孙中良等，2020)。

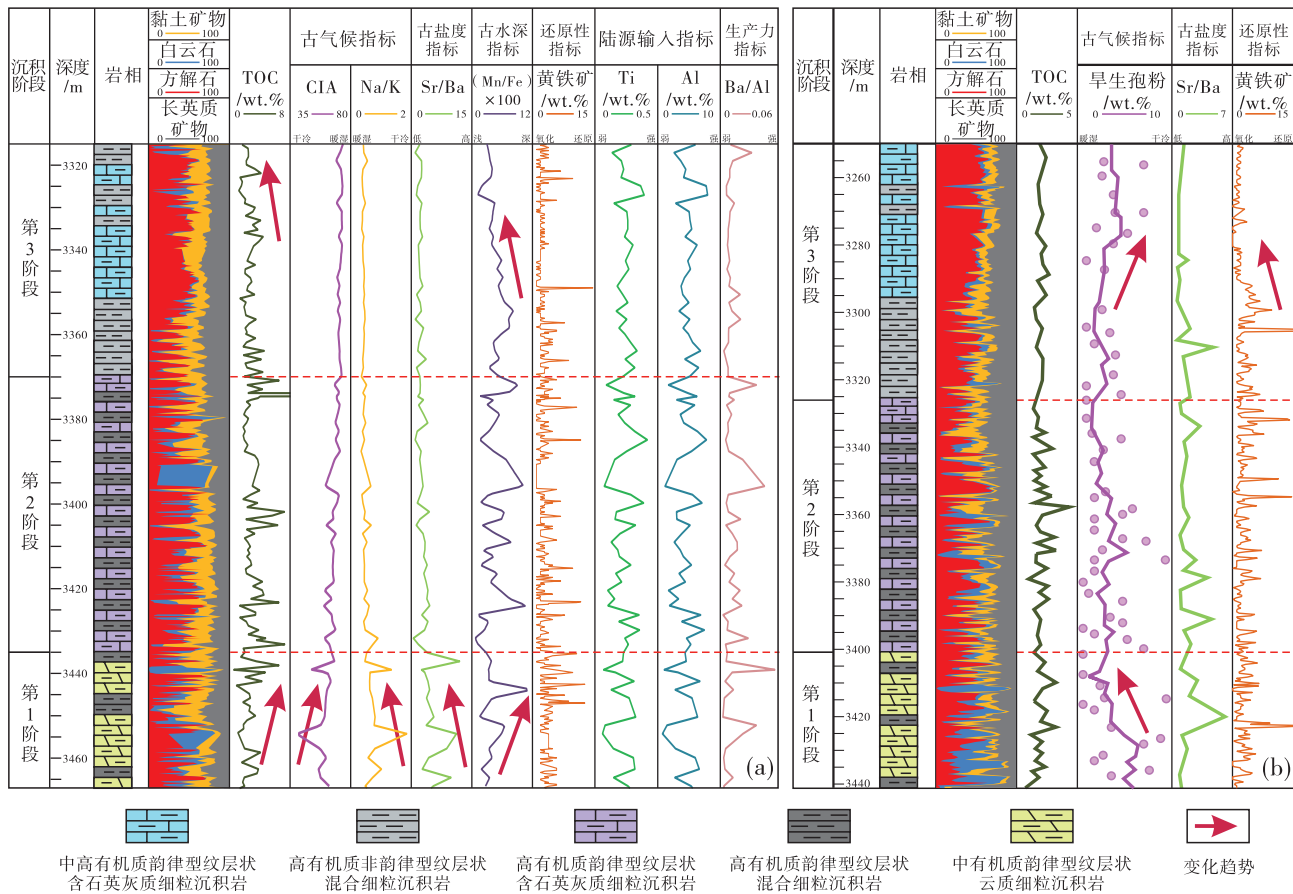
NY1 井第 1 阶段 Sr/Ba 最大值为 11.98，均值为 5.73，指示该阶段的水体盐度较大；第 2 阶段 Sr/Ba 值的最高值降至 4.57，均值降至 2.85，指示该阶段的水体盐度相比于第 1 阶段持续减小；第 3 阶段 Sr/Ba 值依旧在持续降低，最高值降至 3.67，均值降至 2.14，指示该阶段的水体盐度还在持续减小。

牛庄洼陷沙四上亚段纯上段在垂向上 Sr/Ba 值呈“高一中—低”的变化趋势，指示其沉积水体盐度逐渐减小，但整体盐度仍处于较大值，为咸水沉积，该水体盐度的变化趋势与古气候一致(图 9-a)。

## 4.3 古水深和氧化还原性

细粒沉积岩中 Mn 和 Al 的含量随水深增加而增加，Fe 和 Mg 的含量随水深增加而减少，因此采用  $(Mn/Fe) \times 100$  值表征水体深度变化，其值与水体深度呈正相关(朱世发等，2014)；在还原环境下黄铁矿含量较高，可以通过黄铁矿含量变化说明还原性变化，其含量与还原性强弱呈正相关(王鹏万等，2017)。

NY1 井第 1 阶段  $(Mn/Fe) \times 100$  值自下而上有所增高，介于 1.38~11.22 之间，均值为 3.9；黄铁矿由低值逐渐增大，含量介于 1%~11% 之间，均值 2.78%。指示该阶段水体的深度持续增大，且还原性逐渐增强；第 2 阶段  $(Mn/Fe) \times 100$  值持续增高，介于 0.59~10.19 之间，均值为 4.24；黄铁矿处于较高值，含量介于 1%~12% 之间，均值为 2.97%。指示该段整体水体较深，为强还原性，且有水体加深、还原性增强的趋势；第 3 阶段  $(Mn/Fe) \times 100$  值底部继续增高但在顶部略有降低，介于 1.09~7.74 之间，均值为 4.41；黄铁矿略有降低，含量均值降至 2.56%。指示该阶段水体在



a—NY1 井; b—FY1 井, 修改自 Kong 等, 2023

图 9 东营凹陷沙四上亚段纯上段页岩沉积环境演变对比剖面

Fig. 9 Comparative profiles of shale sedimentary environment evolution of the Upper Pure Layer of Upper Submember of 4th Member of Shahejie Formation in Dongying sag

经过 3 个阶段持续加深的过程后在顶部略微变浅, 还原性略有减弱, 为相对弱还原性。

牛庄洼陷沙四上亚段纯上段的水体在第 1 个阶段较浅且持续加深, 第 2 阶段水体较深并继续加深, 第 3 阶段顶部略微变浅但仍比第 1 阶段深; 同时, 水体还原性出现弱还原—强还原—相对强还原的转变(图 9-a)。

#### 4.4 陆源输入

Ti 和 Al 元素主要来源于陆源, 且在搬运和沉积过程中受风化、成岩作用影响较小, 可以通过 Ti 和 Al 含量指示陆源输入强度, 其值均与陆源输入强度呈正相关(何庆等, 2021)。

NY1 井第 1 阶段 Ti 和 Al 含量变化趋势自下而上有所增加, 其中 Ti 含量均值为 0.19%, Al 含量均值为 4.14%, 指示该阶段的陆源输入较弱但在逐渐增强; 第 2 阶段 Ti 和 Al 含量持续增加, Ti 含

量均值增至 0.22%, Al 含量均值增至 4.5%, 指示该阶段的陆源输入相较于上一阶段有所增强; 第 3 阶段 Ti 和 Al 含量持续增加并处于最高值, Ti 含量均值增至 0.23%, Al 含量均值为 5.02%, 指示该阶段的陆源输入强度较大, 且在该阶段的顶部 Ti 和 Al 含量突然增加。

牛庄洼陷沙四上亚段纯上段的陆源输入垂向上持续增强, 并在顶部指标处于较大值。第 1 个阶段, 陆源输入相对较弱, 并在第 2、3 个阶段持续增强最终指标处于较大值(图 9-a)。

#### 4.5 古生产力

古生产力通常被认为是单位时间在单位面积内所产生的有机质含量, 生物成因 Ba 常被用于判断古生产力水平, Ba/Al 值与古生产力呈正相关, 因此用来指示古生产力的大小 (Pi et al., 2013; Ding et al., 2018)。

NY1 井第 1 阶段 Ba/Al 值较低并自下而上有所增加, 均值为 0.0102, 相对应的 TOC 含量均值为 2.53, 指示该阶段的古生产力中等, 并在逐渐增强; 第 2 阶段 Ba/Al 值增至 0.013, 并多处出现较高值, 相对应的 TOC 含量增至 3.11, 指示该阶段的古生产力较大, TOC 含量较高; 第 3 阶段 Ba/Al 值自下而上出现降低的趋势, 均值降至 0.0113, 相对应的 TOC 含量均值降至 2.85, 指示该阶段的古生产力有所减小, TOC 含量略微降低。

牛庄洼陷沙四上亚段纯上段的古生产力垂向上呈“低—高一中”的变化趋势, 第 1 阶段古生产力相对较低并在持续增大, 第 2 阶段指标达到较高值, 第 3 阶段又有所降低, 但此阶段的古生产力仍比第 1 阶段的古生产力要大(图 9-a)。

## 5 气候演化约束下的有机质富集机制

综合上述分析可知, 牛庄洼陷沙四上亚段纯上段页岩沉积环境的演变可分为 3 个阶段(图 8-a)。第 1 阶段气候相对干冷, 水体盐度较高、呈弱还原性, 陆源输入相对较弱, 古生产力相对较低; 第 2 阶段气候相对暖湿, 水体环境呈强还原性, 陆源输入较强, 古生产力处于较高值, 第 3 阶段气候暖湿, 水体环境呈相对强还原性, 陆源输入极强, 古生产力相对第 2 阶段有所降低。因此, 纯上段页岩沉积时期, 整体的气候和环境特征是自下而上气候先逐渐湿润后略转干旱, 水体盐度持续降低, 水体先加深后略微变浅, 水体还原性先加强后略微变弱, 陆源输入持续增强, 并在顶部指标处于较大值, 古生产力先增高后略微降低。

同时期东营凹陷博兴洼陷 FY1 井的页岩沉积经历了相似的气候与环境演变阶段, 且沉积类型可对比(图 9-b)。整体上气候逐渐湿润, 但在第 3 阶段的干旱程度相对有所增加。第 1 阶段气候干旱时期, 主要发育云质细粒沉积岩, 部分发育混合细粒沉积岩; 第 2 阶段气候湿润时期, 发育混合细粒沉积岩与含石英灰质细粒沉积岩互层; 第 3 阶段气候在湿润背景下出现了相对干旱的反转, 对应该阶段下部主要发育混合细粒沉积岩, 上部主要发育含石英灰质细粒沉积岩。因此, 该研究提出气候约束了东营凹陷沙四上亚段纯上段页岩的沉积。

根据前人的分析结果, 东营凹陷沙四上亚段纯上段页岩发育时期大致处于始新世中期 (Kong

*et al.*, 2023), 结合孢粉、同位素和 CIA 数值等气候指标, 反映了该时期整体处于气候由于旱向湿润的过渡变化阶段 (雷华蕊等, 2018; Wei *et al.*, 2021; 王健等, 2022)。依据对东亚地区新生代不同陆相沉积的岩石类型和孢粉类型的对比以及气候模拟, 揭示出始新世中晚期东亚地区已发育有类似现代的季风气候 (Quan *et al.*, 2012; Licht *et al.*, 2014; Kong *et al.*, 2024), 因此始新世季风气候的发育可能是东营凹陷气候演变的驱动机制。前人通过对东营凹陷南、北坡滩坝沉积的古风力恢复, 提出纯下段发育时期北风体系较为强劲, 而纯上段发育时期北风风力开始变弱, 南风风力开始不断加强 (Jiang *et al.*, 2018; Wang *et al.*, 2018), 这与纯上段气候由相对干旱向湿润转变的气候背景相一致, 进一步提供了季风活动驱动区域气候变化的证据。综上所述, 东营凹陷沙四上亚段纯上段页岩发育是始新世季风气候发育的响应结果。

季风气候的发育影响水体盐度、水体还原性、陆源输入强度及生产力。根据岩相组合和沉积环境变化趋势, 建立牛庄洼陷沙四上亚段纯上段沉积模式, 并分为 3 个阶段。第 1 阶段季风较弱, 气候相对干冷, 水体深度较小, 相对不利于有机质的保存, 但受气候逐渐变暖湿的影响水体深度持续加大, 水体沉积环境逐渐缺氧, 还原性由弱还原逐渐增强。相对干冷的气候导致降雨量较小, 使该阶段盐度处于高值, 较高的盐度会使水体出现盐度分层 (孙中良等, 2020), 不利于藻类等水生生物的生长繁殖, 导致水体生产力较低 (Hao *et al.*, 2011), 古盐度参数 Sr/Ba 值与 TOC 含量呈负相关 (图 10-a)。气候的干湿变化会影响陆源风化作用的强度, 进而影响陆源输入作用, 在相对干冷气候下陆源输入相对较弱, 石英、长石和黏土等矿物以及陆源物质输入带来的有机质含量较低。第 1 阶段岩相组合为中有机质韵律型纹层状云质细粒沉积岩和高有机质韵律型纹层状混合细粒沉积岩互层, 在高盐浅水和相对较弱陆源输入的综合作用下, 该阶段有机质丰度中等偏低, 干酪根类型以 I-II<sub>1</sub> 型为主, 主要发育中有机质韵律型纹层状云质细粒沉积岩, 随着水体的不断加深及还原性的增强, 灰质含量逐渐增加, 部分发育高有机质韵律型纹层状混合细粒沉积岩(图 11-c)。

第 2 阶段季风较强, 气候相对暖湿, 陆源风化

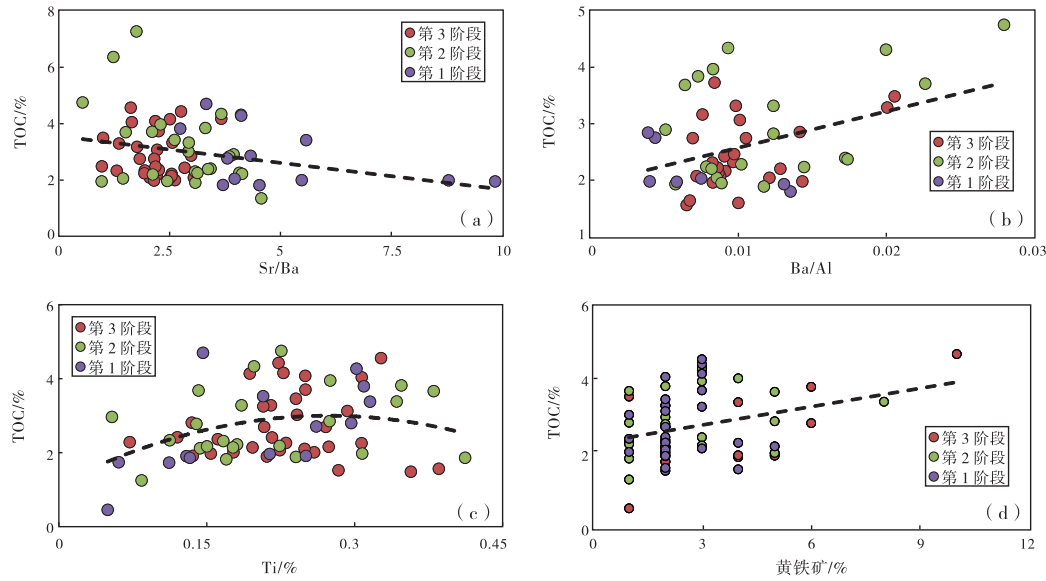


图 10 东营凹陷牛庄洼陷沙四上亚段纯上段地层元素地球化学特征与 TOC 含量相关性

Fig. 10 Correlation between geochemical characteristics of elements and TOC content in the Upper Pure Layer of Upper Submember of 4th Member of Shahejie Formation of Niuzhuang sub-sag, Dongying sag

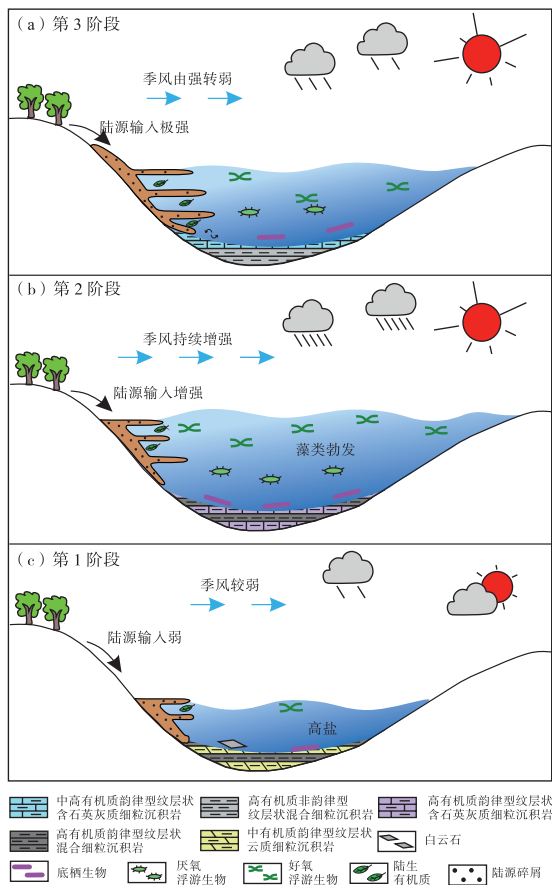


图 11 东营凹陷牛庄洼陷沙四上亚段纯上段有机质富集模式  
Fig. 11 Enrichment model of organic matter of the Upper Pure Layer of Upper Submember of 4th Member of Shahejie Formation of Niuzhuang sub-sag, Dongying sag

作用变强，陆源输入增强，石英、长石和黏土等矿物含量增大，陆源物质输入带来的有机质含量增高。同时该阶段较强的季风带来大量降水，水体深度持续加大，还原性持续增强至最强，缺氧环境非常有利于有机质保存（吴靖等，2017）。该阶段较深的水体稀释了盐度，使水体盐度分层减弱，有利于藻类等水生生物大量生存繁殖（孟庆涛等，2012；周立宏等，2021），使水体生产力得以提高，古生产力参数 Ba/Al 值与 TOC 含量呈正相关（图 9-b），说明有机质的富集需要较高的生产力。第 2 阶段岩相组合为高有机质韵律型纹层状含石英灰质细粒沉积岩和高有机质韵律型纹层状混合细粒沉积岩互层（图 10-b），在陆源输入虽强但不稳定、低盐深水环境下，该阶段有机质丰度较高，干酪根类型以 I 型为主。

第 3 阶段整体季风极强，气候暖湿，陆源风化作用持续增强导致陆源输入变强，石英、长石和黏土等矿物含量增大，较多的陆源物质输入不仅稀释了有机质含量（张玉玺等，2020），而且带来了氧气使水体还原性减弱，破坏了有机质的保存环境（图 10-c）。湖盆盐度经 3 个阶段噬盐微生物的持续分解消耗而持续降低。该阶段顶部季风强度减弱，气候逐渐转变为相对暖湿，使该阶段顶部水体深度略微变浅（图 11-a），还原性在过强的陆源输入和水深的影响下有所降低（胡涛等，2021），不

利于有机质的保存, 导致该阶段 TOC 含量略微降低但仍比第 1 阶段高, 还原性指标黄铁矿含量与 TOC 含量呈正相关(图 10-d)。第 3 阶段岩相组合为高有机质非韵律型纹层状混合细粒沉积岩和中高有机质韵律型纹层状含石英灰质细粒沉积岩互层, 在陆源输入极强的作用下, 该阶段有机质丰度中等偏高, 干酪根类型整体以 I 型为主, 含有少量 II<sub>1</sub> 型, 底部发育高有机质非韵律型纹层状混合细粒沉积岩, 顶部因为陆源输入的持续增强且整体环境相对底部不利于有机质富集而发育中高有机质韵律型纹层状含石英灰质细粒沉积岩。

气候对陆相页岩的有机质富集有明显的控制作用(张美洲等, 2023), 在第 2 阶段气候相对暖湿、水体深度最大、水体盐度较低、陆源输入较强的情况下, 有机质富集程度最好; 第 3 阶段气候暖湿且水深较大, 但被过强的陆源输入破坏了有机质保存环境致使该阶段有机质富集程度次之; 而第 1 阶段气候相对干冷、水体深度较小且水体盐度过高、陆源输入较弱, 使得该阶段成为有机质富集程度最差的阶段。

## 6 结论

1) 渤海湾盆地东营凹陷牛庄洼陷沙四上亚段纯上段分为 3 个演化阶段。第 1 阶段总有机碳(TOC)含量均值 2.52%, 主要发育中有机质韵律型纹层状云质细粒沉积岩; 第 2 阶段 TOC 含量较高, 均值 3.29%, 主要发育高有机质韵律型纹层状含石英灰质细粒沉积岩与混合细粒沉积岩互层; 第 3 阶段 TOC 含量相对较高, 均值 2.78%, 底部发育高有机质非韵律型纹层状混合细粒沉积岩, 顶部发育中高有机质韵律型纹层状含石英灰质细粒沉积岩。

2) 牛庄洼陷沙四上亚段纯上段的气候变化具有旋回性与阶段性 2 个特点。垂向上气候变化呈“相对干冷—相对暖湿—暖湿”的特点; 古盐度呈“高一中—低”的变化趋势, 但整体盐度仍处于较大值, 为咸水沉积; 水体深度经历了“较浅—深—相对深”的过程, 同时水体还原性出现“弱还原—强还原—相对强还原”的转变; 陆源输入持续增强, 并在顶部处于极强值; 古生产力呈“低—高一中”的变化趋势。

3) 中始新世东亚地区季风开始盛行, 气候由

干旱转向湿润。气候对陆相页岩的有机质富集有明显的控制作用: 相对暖湿的气候、适量的陆源营养物质输入使得藻类等水生生物勃发, 利于有机质的富集; 相对干冷的气候、浅水高盐环境抑制藻类等水生生物的生长, 使生产力降低; 过于暖湿的气候、强陆源物质输入稀释水体有机质含量并导致有机质被氧化, 不利于有机质富集。

## 参考文献(References)

- 杜学斌, 陆永潮, 刘惠民, 刘辉, 王勇, 熊仕鹏, 郭来源, 刘占红, 彭丽. 2018. 细粒沉积物中不同级次高频层序划分及其地质意义: 以东营凹陷沙三—沙四上亚段泥页岩为例. 石油实验地质, 40(2): 244-252. [Du X B, Lu Y C, Liu H M, Liu H, Wang Y, Xiong S P, Guo L Y, Liu Z H, Peng L. 2018. Division of high-frequency sequences of different orders in fine-grained deposits and its geologic significance: a case study of mud shale from the lower section of the third member to the upper section of the fourth member of Shahejie Formation in Dongying Sag, Bohai Bay Basin. *Petroleum Geology & Experiment*, 40(2): 244-252]
- 郭旭升, 马晓潇, 黎茂稳, 钱门辉, 胡宗全. 2023. 陆相页岩油富集机理探讨. 石油与天然气地质, 44(6): 1333-1349. [Guo X S, Ma X X, Li M W, Qian M H, Hu Z Q. 2023. Mechanisms for lacustrine shale oil enrichment in Chinese sedimentary basins. *Oil & Gas Geology*, 44(6): 1333-1349]
- 何庆, 高键, 董田, 何生, 翟刚毅, 邹高峰. 2021. 鄂西地区下寒武统牛蹄塘组页岩元素地球化学特征及沉积古环境恢复. 沉积学报, 39(3): 686-703. [He Q, Gao J, Dong T, He S, Zhai G Y, Zou G F. 2021. Elemental geochemistry and paleo-environmental conditions of the lower Cambrian niutitang shale in western Hubei Province. *Acta Sedimentologica Sinica*, 39(3): 686-703]
- 胡涛, 庞雄奇, 姜福杰, 王琦峰, 徐田武, 吴冠响, 蔡哲, 于吉旺. 2021. 陆相断陷咸化湖盆有机质差异富集因素探讨: 以东濮凹陷古近系沙三段泥页岩为例. 沉积学报, 39(1): 140-152. [Hu T, Pang X Q, Jiang F J, Wang Q F, Xu T W, Wu G Y, Cai Z, Yu J W. 2021. Factors controlling differential enrichment of organic matter in saline lacustrine rift basin: a case study of third member Shahejie Fm in Dongpu Depression. *Acta Sedimentologica Sinica*, 39(1): 140-152]
- 姜福杰, 庞雄奇, 姜振学, 刘洛夫, 高小跃, 郭继刚, 白静. 2013. 烃源岩滞留油气作用及其对泥页岩含油气率的影响. 中南大学学报(自然科学版), 44(6): 2439-2448. [Jiang F J, Pang X Q, Jiang Z X, Liu L F, Gao X Y, Guo J G, Bai J. 2013. Residual oil and gas in source rocks and its influence on oil and gas rate in shale. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 44(6): 2439-2448]
- 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 Petrolei Sinica*, 34(6): 1031-1039]
- 姜在兴, 孔祥鑫, 杨叶芃, 张建国, 张元福, 王力, 袁晓冬. 2021. 陆相碳酸盐质细粒沉积岩及油气甜点多源成因. *石油勘探与开发*, 48(1): 26-37. [Jiang Z X, Kong X X, Yang Y P, Zhang J G, Zhang Y F, Wang L, Yuan X D. 2021. Multi-source genesis of continental carbonate-rich fine-grained sedimentary rocks and hydrocarbon sweet spots. *Petroleum Exploration and Development*, 48(1): 26-37]
- 孔祥鑫. 2020. 湖相含碳酸盐细粒沉积岩特征、成因与油气聚集. 中国地质大学(北京)博士学位论文. [Kong X X. 2020. Sedimentary characteristics and generation and accumulation of hydrocarbon analysis of carbonate bearing fine-grained sedimentary rocks. Doctoral dissertation of China University of Geosciences(Beijing)]
- 孔祥鑫, 姜在兴, 韩超, 郑丽婧, 杨叶芃, 刘雅萍. 2016. 束鹿凹陷沙三段下亚段细粒碳酸盐纹层特征与储集意义. *油气地质与采收率*, 23(4): 19-26. [Kong X X, Jiang Z X, Han C, Zheng L J, Yang Y P, Liu Y P. 2016. Laminations characteristics and reservoir significance of fine-grained carbonate in the lower 3rd member of Shahejie Formation of Shulu Sag. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 23(4): 19-26]
- 雷华蕊, 姜在兴, 周红科. 2018. 早古近纪极热时期古气候演化分析: 以东营凹陷为例. *地学前缘*, 25(4): 176-184. [Lei H R, Jiang Z X, Zhou H K. 2018. Analysis of paleoclimate evolution of the hyperthermal period in the early Paleogene: taking the Dongying depression as an example. *Earth Science Frontiers*, 25(4): 176-184]
- 黎茂稳, 金之钧, 董明哲, 马晓潇, 李志明, 蒋启贵, 鲍云杰, 陶国亮, 钱门辉, 刘鹏, 曹婷婷. 2020. 陆相页岩形成演化与页岩油富集机理研究进展. *石油实验地质*, 42(4): 489-505. [Li M W, Jin Z J, Dong M Z, Ma X X, Li Z M, Jiang Q G, Bao Y J, Tao G L, Qian M H, Liu P, Cao T T. 2020. Advances in the basic study of lacustrine shale evolution and shale oil accumulation. *Petroleum Geology & Experiment*, 42(4): 489-505]
- 刘惠民. 2022. 济阳拗陷古近系页岩油地质特殊性及其勘探实践: 以沙河街组四段上亚段—沙河街组三段下亚段为例. *石油学报*, 43(5): 581-594. [Liu H M. 2022. Geological particularity and exploration practice of Paleogene shale oil in Jiyang depression: a case study of the upper submember of Member 4 to the lower submember of Member 3 of Shahejie Formation. *Acta Petrolei Sinica*, 43(5): 581-594]
- 栾旭伟, 孔祥鑫, 张金亮, 蒋龙, 彭艳霞, 蔡媛. 2024. 天文旋回约束下东营凹陷始新统含碳酸盐细粒沉积岩成因分析. *沉积学报*, 42(2): 688-700. [Luan X W, Kong X X, Zhang J L, Jiang L, Peng Y X, Cai Y. 2024. Astronomical forcing of origins of Eocene carbonate-bearing finegrained sedimentary rock in Dongying Sag. *Acta Sedimentologica Sinica*, 42(2): 688-700]
- 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]
- 孟庆涛, 刘招君, 胡菲, 孙平昌, 周人杰, 甄甄. 2012. 桦甸盆地始新世古湖泊生产力与有机质富集机制. *中国石油大学学报(自然科学版)*, 36(5): 38-44. [Meng Q T, Liu Z J, Hu F, Sun P C, Zhou R J, Zhen Z. 2012. Productivity of Eocene ancient lake and enrichment mechanism of organic matter in Huadian Basin. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)*, 36(5): 38-44]
- 彭军, 于乐丹, 许天宇, 韩浩东, 杨一茗, 曾垚, 王瑜斌. 2022. 湖相泥页岩地层米氏旋回测井识别及环境响应特征: 以渤海湾盆地济阳拗陷东营凹陷樊页 1 井 Es<sup>4</sup><sub>scs</sub> 为例. *石油与天然气地质*, 43(4): 957-969. [Peng J, Yu L D, Xu T Y, Han H D, Yang Y M, Zeng Y, Wang Y B. 2022. Logging identification of milankovitch cycle and environmental response characteristics of lacustrine shale: a case study on Es<sup>4</sup><sub>scs</sub> in well fanye 1, Dongying sag, Jiyang Depression, Bohai Bay Basin. *Oil & Gas Geology*, 43(4): 957-969]
- 邱振, 邹才能. 2020. 非常规油气沉积学: 内涵与展望. *沉积学报*, 38(1): 1-29. [Qiu Z, Zou C N. 2020. Unconventional petroleum sedimentology: connotation and prospect. *Acta Sedimentologica Sinica*, 38(1): 1-29]
- 孙龙德, 赵文智, 刘合, 朱如凯, 白斌, 康缘, 张婧雅, 吴松涛. 2023. 页岩油“甜点”概念及其应用讨论. *石油学报*, 44(1): 1-13. [Sun L D, Zhao W Z, Liu H, Zhu R K, Bai B, Kang Y, Zhang J Y, Wu S T. 2023. Concept and application of “sweet spot” in shale oil. *Acta Petrolei Sinica*, 44(1): 1-13]
- 孙中良, 王芙蓉, 侯宇光, 罗京, 郑有恒, 吴世强, 朱钢添. 2020. 盐湖页岩有机质富集主控因素及模式. *地球科学*, 45(4): 1375-1387. [Sun Z L, Wang F R, Hou Y G, Luo J, Zheng Y H, Wu S Q, Zhu G T. 2020. Main controlling factors and modes of organic matter enrichment in salt lake shale. *Earth Science*, 45(4): 1375-1387]
- 万从礼, 金强, 翟庆龙. 2003. 东营凹陷滨南地区水下火山喷溢对烃源岩形成及生烃演化的作用. *石油大学学报(自然科学版)*, 27(3): 17-21, 8. [Wan C L, Jin Q, Zhai Q L. 2003. Effect of volcanic activity on generation and evolution of hydrocarbon source rocks in Binnan Area of Dongying depression. *Journal of the University of Petroleum, China (Edition of Natural Science)*, 27(3): 17-21, 8]
- 王成善, 胡修棉. 2005. 白垩纪世界与大洋红层. *地学前缘*, 12(2): 11-21. [Wang C S, Hu X M. 2005. Cretaceous world and oceanic red beds. *Earth Science Frontiers*, 12(2): 11-21]
- 王冠民, 白玉, 蒋龙, 张云蛟, 孟维新, 任敏华, 熊周海. 2024. 牛庄洼陷沙四上一沙三下亚段细粒沉积岩成分与纹层结构的关系. *中国石油大学学报(自然科学版)*, 48(2): 1-10. [Wang G M, Bai Y, Jiang L, Zhang Y J, Meng W X, Ren M H, Xiong Z H. 2024. Relationship between composition and lamination structure of fine-grained sedimentary rocks in upper fourth member to lower third member of Shahejie Formation in Niuzhuang Depression. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)*, 48(2):

- 1-10]
- 王健, 彭捷, 操应长, 刘可禹, 宋明水, 刘惠民. 2022. 东营凹陷中晚始新世古气候演化特征及其意义: 以 Hk1 井为例. 沉积学报, 40(4): 1059-1072. [Wang J, Peng J, Cao Y C, Liu K Y, Song M S, Liu H M. 2022. Mid-late Eocene paleoclimate characteristics and significance in the Dongying depression: an example from well Hk-1. *Acta Sedimentologica Sinica*, 40(4): 1059-1072]
- 王鹏万, 张磊, 李昌, 李娴静, 邹辰, 张朝, 李君军, 李庆飞. 2017. 黑色页岩氧化还原条件与有机质富集机制: 以昭通页岩气示范区 A 井五峰组—龙马溪组下段为例. 石油与天然气地质, 38(5): 933-943. [Wang P W, Zhang L, Li C, Li X J, Zou C, Zhang C, Li J J, Li Q F. 2017. Redox conditions and organic enrichment mechanisms of black shale: a case from the Wufeng-lower Longmaxi Formations in Well A in Zhaotong shale gas demonstration area. *Oil & Gas Geology*, 38(5): 933-943]
- 王鹏万, 邹辰, 李娴静, 马立桥, 蒋立伟, 贾丹, 梅珏, 黄羚, 陈向阳, 李庆飞. 2021. 滇黔北地区筇竹寺组元素地球化学特征及古环境意义. 中国石油大学学报(自然科学版), 45(2): 51-62. [Wang P W, Zou C, Li X J, Ma L Q, Jiang L W, Jia D, Mei J, Huang L, Chen X Y, Li Q F. 2021. Geochemical characteristics of element Qiongzhusi Group in Dianqianbei area and paleoenvironmental significance. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)*, 45(2): 51-62]
- 王勇, 刘惠民, 宋国奇, 熊伟, 朱德顺, 朱德燕, 银燕, 丁桔红, 杨万芹, 张丽, 张顺. 2019. 济阳拗陷泥页岩细粒沉积体系. 石油学报, 40(4): 395-410. [Wang Y, Liu H M, Song G Q, Xiong W, Zhu D S, Zhu D Y, Yin Y, Ding J H, Yang W Q, Zhang L, Zhang S. 2019. Lacustrine shale fine-grained sedimentary system in Jiyang depression. *Acta Petroli Sinica*, 40(4): 395-410]
- 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 Petroli Sinica*, 38(10): 1110-1122]
- 吴靖, 姜在兴, 王欣. 2018. 湖相细粒沉积岩三—四级层序地层划分方法与特征: 以渤海湾盆地东营凹陷古近系沙四上亚段为例. 天然气地球科学, 29(2): 199-210. [Wu J, Jiang Z X, Wang X. 2018. Sequence stratigraphy characteristics of lacustrine fine-grained sedimentary rocks: a case study of the upper fourth member of Paleogene Shahejie Formation, Dongying Sag, Bohai Bay Basin. *Natural Gas Geoscience*, 29(2): 199-210]
- 张美洲, 朱筱敏, 姜振学, 朱德宇, 叶蕾, 谌志远. 2023. 陆相淡水湖盆页岩有机质富集主控因素研究: 以四川盆地东北部侏罗系自流井组为例. 古地理学报, 25(4): 806-822. [Zhang M Z, Zhu X M, Jiang Z X, Zhu D Y, Ye L, Chen Z Y. 2023. Main controlling factors of organic matter enrichment in continental freshwater lacustrine shale: a case study of the Jurassic Ziliujing Formation in northeastern Sichuan Basin. *Journal of Palaeogeography (Chinese Edition)*, 25(4): 806-822]
- 张玉玺, 陈建文, 周江羽. 2020. 苏北地区早寒武世黑色页岩地球化学特征与有机质富集模式. 石油与天然气地质, 41(4): 838-851. [Zhang Y X, Chen J W, Zhou J Y. 2020. Geochemical features and organic matter enrichment in the Early Cambrian black shale, northern Jiangsu Area. *Oil & Gas Geology*, 41(4): 838-851]
- 周立宏, 陈长伟, 韩国猛, 杨飞, 石倩茹, 付东立, 董越崎, 赵玥, 孙莉莉, 梁晨. 2021. 渤海湾盆地歧口凹陷陆相湖盆页岩气富集条件及勘探潜力. 天然气工业, 41(5): 1-10. [Zhou L H, Chen C W, Han G M, Yang F, Shi Q R, Fu D L, Dong Y Q, Zhao Y, Sun L L, Liang C. 2021. Enrichment conditions and exploration potential of shale gas in continental lake basins in Qikou Sag, Bohai Bay Basin. *Natural Gas Industry*, 41(5): 1-10]
- 朱光有, 金强, 张水昌, 戴金星, 王冠民, 张林晔, 李剑. 2005. 济阳拗陷东营凹陷古近系沙河街组深湖相油页岩的特征及成因. 古地理学报, 7(1): 59-69. [Zhu G Y, Jin Q, Zhang S C, Dai J X, Wang G M, Zhang L Y, Li J. 2005. Characteristics and origin of deep lake oil shale of the Shahejie Formation of Paleogene in Dongying Sag, Jiyang Depression. *Journal of Palaeogeography (Chinese Edition)*, 7(1): 59-69]
- 朱世发, 朱筱敏, 刘英辉, 陈相亦, 王俊怀, 王小军, 马爱钰. 2014. 准噶尔盆地西北缘北东段下二叠统风城组白云质岩石学和岩石地球化学特征. 地质论评, 60(5): 1113-1122. [Zhu S F, Zhu X M, Liu Y H, Chen X Y, Wang J H, Wang X J, Ma A Y. 2014. Petrological and geochemical features of dolomitic rocks in the Lower Permian Fengcheng Formation in Wuerhe—Xiazijie Area, Junggar Basin. *Geological Review*, 60(5): 1113-1122]
- Bai C Y, Yu B S, Liu H M, Xie Z H, Han S J, Zhang L Y, Ye R C, Ge J. 2018. The genesis and evolution of carbonate minerals in shale oil formations from Dongying depression, Bohai Bay Basin, China. *International Journal of Coal Geology*, 189: 8-26.
- Ding J H, Zhang J C, Tang X, Huo Z P, Han S B, Lang Y, Zheng Y Y, Li X Q, Liu T. 2018. Elemental geochemical evidence for depositional conditions and organic matter enrichment of black rock series strata in an inter-platform basin: the lower carboniferous datang formation, southern Guizhou, southwest China. *Minerals*, 8: 509.
- Fedo C M, Nesbitt H W, Young G M. 1995. Unraveling the effects of potassium metasomatism in sedimentary rocks and paleosols, with implications for paleoweathering conditions and provenance. *Geology*, 23: 921.
- Hao F, Zhou X H, Zhu Y M, Yang Y Y. 2011. Lacustrine source rock deposition in response to co-evolution of environments and organisms controlled by tectonic subsidence and climate, Bohai Bay Basin, China. *Organic Geochemistry*, 42: 323-339.
- Jiang Z X, Wang J H, Fulthorpe C S, Liu L A, Zhang Y F, Liu H M. 2018. A quantitative model of paleowind reconstruction using subsurface lacustrine longshore bar deposits: an attempt. *Sedimentary Geology*, 371: 1-15.
- Katz B, Lin F. 2014. Lacustrine basin unconventional resource plays: key

- differences. *Marine and Petroleum Geology*, 56: 255–265.
- Kong X X, Jiang Z X, Ju B S, Liang C, Cai Y, Wu S Q. 2022. Fine-grained carbonate formation and organic matter enrichment in an Eocene saline rift lake (Qianjiang Depression): constraints from depositional environment and material source. *Marine and Petroleum Geology*, 138: 105534.
- Kong X X, Jiang Z X, Cai Y. 2023. Orbital and sub-orbital pacing of mudstones in the Dongying Depression, Eastern China: implications for middle Eocene East Asian climate evolution. *GSA Bulletin*, 135: 3024–3042.
- Kong X X, Jiang Z X, Wu S Q, Ge T Y. 2024. Stepwise astronomical tuning of obliquity-driven evaporite cycles in an Eocene salt lake (Jianghan Basin, Hubei Province, China): implications for middle Eocene East Asian monsoon-like climate evolution. *GSA Bulletin*, 136: 3277–3290.
- 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 characteristics. *AAPG Bulletin*, 101: 1835–1858.
- Licht A, van Cappelle M, Abels H A, Ladant J B, Trabucho-Alexandre J, France-Lanord C, Donnadiou Y, Vandenberghe J, Rigaudier T, Lécuyer C, Terry D Jr, Adriaens R, Boura A, Guo Z, Soe A N, Quade J, Dupont-Nivet G, Jaeger J J. 2014. Asian monsoons in a late Eocene greenhouse world. *Nature*, 513: 501–506.
- McLennan S M. 1993. Weathering and global denudation. *Journal of Geology*, 101: 295–303.
- Nesbitt H W, Young G M. 1982. Early Proterozoic climates and plate motions inferred from major element chemistry of lutites. *Nature*, 299: 715–717.
- Pi D H, Liu C Q, Shields-Zhou G A, Jiang S Y. 2013. Trace and rare earth element geochemistry of black shale and kerogen in the early Cambrian niutitang formation in Guizhou Province, South China: constraints for redox environments and origin of metal enrichments. *Precambrian Research*, 225: 218–229.
- Quan C, Liu Y S, Utescher T. 2012. Eocene monsoon prevalence over China: a paleobotanical perspective. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 365: 302–311.
- Wang J H, Jiang Z X, Xian B Z, Chen J, Wang X B, Xu W M, Liu H. 2018. A method to define the palaeowind strength from lacustrine parameters. *Sedimentology*, 65: 461–491.
- Wei W, Lu Y C, Ma Y Q, Zhang J Y, Song H Y, Chen L, Liu H M, Zhang S P. 2021. Nitrogen isotopes as paleoenvironmental proxies in marginal-marine shales, Bohai Bay Basin, NE China. *Sedimentary Geology*, 421: 105963.
- Westerhold T, Marwan N, Drury A J, Liebrand D, Agnini C, Anagnostou E, Barnet J S K, Bohaty S M, De Vleeschouwer D, Florindo F, Frederichs T, Hodell D A, Holbourn A E, Kroon D, Lauretano V, Littler K, Lourens L J, Lyle M, Pälike H, Röhl U, Tian J, Wilkens R H, Wilson P A, Zachos J C. 2020. An astronomically dated record of Earth's climate and its predictability over the last 66 million years. *Science*, 369: 1383–1387.
- Wu F L, Fang X M, Yang Y B, Dupont-Nivet G, Nie J S, Fluteau F, Zhang T, Han W X. 2022. Reorganization of Asian climate in relation to Tibetan Plateau uplift. *Nature Reviews Earth & Environment*, 3: 684–700.
- Zachos J, Pagani M, Sloan L, Thomas E, Billups K. 2001. Trends, rhythms, and aberrations in global climate 65 Ma to present. *Science*, 292: 686–693.

(责任编辑 李新坡; 英文审校 徐 杰)