

# 渤海湾盆地东营凹陷古近系深层油气成藏系统及勘探潜力

宋明水<sup>1</sup>,王永诗<sup>1</sup>,郝雪峰<sup>2</sup>,安天下<sup>2</sup>

(1. 中国石化胜利油田分公司, 山东 东营 257015; 2. 中国石化胜利油田分公司勘探开发研究院, 山东 东营 257015)

**摘要:** 东营凹陷是渤海湾盆地具有代表性的陆相断陷盆地, 深部层系勘探程度低, 丰深1、丰深斜101等井获得高产工业油气流, 显示了良好的勘探潜力。以东营凹陷古近系深层为对象, 在烃源岩分析基础上, 结合优质储层成因研究, 建立油气成藏模式, 明确深层勘探潜力方向。结果表明: 东营凹陷古近系深层的沙四下亚段及孔店组构成独立的含油气系统, 孔二段、沙四下亚段发育的盐湖(咸化)环境烃源岩具有排烃时期早、排烃时间长、效率高、生排烃周期长的特点, 为深层油气成藏系统提供了有利的油源条件; 咸化湖泊的多类型沉积体经历了酸-碱交替的成岩流体环境, 形成了以次生溶蚀孔隙为主的优质储层, 为深层油气成藏提供了良好的储集条件; 深层油气成藏系统的油气藏分布与断陷盆地结构、沉积储层发育和成藏动力系统具有良好的对应性, “自源型”及“他源型”油气成藏模式有序分布; 缓坡带红层和滩坝砂岩及陡坡带砂砾岩等不同类型油气藏是东营凹陷古近系深层重要的勘探领域。

**关键词:** 油气成藏系统; 勘探潜力; 深层; 古近系; 东营凹陷; 渤海湾盆地

**中图分类号:** TE122.3

**文献标识码:** A

## Petroleum systems and exploration potential in deep Paleogene of the Dongying Sag, Bohai Bay Basin

Song Mingshui<sup>1</sup>, Wang Yongshi<sup>1</sup>, Hao Xuefeng<sup>2</sup>, An Tianxia<sup>2</sup>

(1. Shengli Oilfield Company, SINOPEC, Dongying, Shandong 257015, China;

2. Petroleum Exploration and Production Research Institute, Shengli Oilfield Company, SINOPEC, Dongying, Shandong 257015, China)

**Abstract:** The Dongying Sag is a representative non-marine faulted depression in the Bohai Bay Basin. Two wells (FSh1 and FShX 101) drilled into the deep of the sag were tested with high rates of oil flow, revealing great exploration potential of deeper layers that have been relatively overlooked during years of intensive oil and gas exploration and development in the basin. This study, taking the deep Paleogene strata in the sag as an example, aims to assess the potential through oil and gas accumulation models established on analyses of source rocks and genesis of high-quality reservoirs in the sag. The results show that the Ek (Kongdian Formation) and lower Es<sup>4</sup> layers in the deep Paleogene constitute on their own an independent petroleum system. The source rocks in the Ek<sup>2</sup> and lower Es<sup>4</sup>, developed in a saline lake (salinized) environment are characterized by an early, long and efficient hydrocarbon expulsion and a long hydrocarbon generation-expulsion cycle, providing key components for the formation of a deep petroleum system. The multi-type sedimentary facies of the saline lake have experienced alternative modification of acidic and alkaline diagenetic fluids, and formed high-quality reservoirs mainly composed of secondary dissolution pores, which provided good reservoir conditions for the deep hydrocarbon accumulation. The distribution of oil/gas reservoirs in the deep layers corresponds well to the structure of faulted depression, the development of sedimentary reservoirs and the dynamic system of hydrocarbon accumulation. The “indigenous” and “non-indigenous” hydrocarbon accumulation patterns are orderly distributed. Different types of oil/gas reservoirs, such as red beds and beach bar sandstone in gentle slope zone, as well as sandy conglomerate in steep slope zone, are the focus of exploration in the deep Paleogene of Dongying Sag.

**Key words:** hydrocarbon accumulation system, exploration potential, deep strata, Paleogene, Dongying Sag, Bohai Bay Basin

收稿日期:2020-03-27; 修订日期:2021-10-06

第一作者简介:宋明水(1964—),男,博士、教授级高级工程师,油气勘探部署和石油地质。E-mail: Songmingshui. slyt@sinopec.com。

基金项目:国家科技重大专项(2016ZX05006-003);中国石化科技部项目(P18060-2, P19027-2, P21034-1)。

近10年来,国内各含油气盆地的勘探重点逐步向深部油气成藏系统转移,深层油气藏成为当前和未来油气勘探发展的重要领域之一<sup>[1-2]</sup>。中国渤海湾、松辽、鄂尔多斯、四川、准噶尔和塔里木等盆地在深层领域不断取得勘探成果,展示了深层油气的勘探潜力,对于老油区的资源接替和增储上产起到了重要的支撑作用<sup>[3]</sup>。不断拓展深层油气勘探领域,已成为中国陆上油气勘探开发必然的战略抉择<sup>[4-8]</sup>。目前深层油气成藏系统内基本地质要素及相互作用等认识面临诸多挑战,比如:深层烃源条件及资源潜力、油气来源,深层不同类型储集体在经历长期复杂成岩改造后的优质储层成因及预测,深层油气相态、成藏模式、保存条件及分布规律等问题制约了油气勘探<sup>[5-9]</sup>。

东营凹陷是渤海湾盆地中陆相断陷之一(图1)。本文提及的古近系深层,是指断陷初始期的沙河街组四段下亚段及孔店组含油气层系,参照国内深层划分标准<sup>[10]</sup>,埋深一般在3 500 m以下。以往勘探的主要对象为沙四上亚段及以上层系,经历了多年勘探后,主力层系探明程度均超过50%<sup>[11]</sup>。而作为非主要勘探对象的沙四下亚段及孔店组,资源发现程度低,虽然近期部署的丰深1、丰深斜101等井获得高产工业油气流,显示了良好的勘探潜力,但深层的烃源、储层、成藏模式等基础石油地质问题认识不清,制约了勘探向深部探索的过程。研究深层油气成藏系统特征及勘探潜力,有利

于全面认识盆地油气成藏规律和指导勘探实践<sup>[12-14]</sup>。因此,围绕上述问题,系统开展了古近系深层油气成藏系统中烃源岩发育背景、优质储层成因机制及油气成藏模式等方面的深入分析,明确了勘探潜力及有利勘探方向,建立了深层油气成藏模式,指导了油气勘探实践,为陆相断陷盆地深层油气勘探提供了借鉴。

## 1 古近纪成盆演化

### 1.1 构造演化特征

东营凹陷是在华北克拉通及古生界基底之上发育的中、新生代断陷盆地,经历了晚侏罗世至早白垩世初始裂陷、古近纪断陷及新近纪拗陷等3个成盆阶段<sup>[15-16]</sup>。古近系可细分为断陷初期(65~45 Ma)、断陷扩张期(45~35 Ma)及断陷衰退期(35~23 Ma)。孔店组—沙四下亚段沉积期(65~45 Ma),在NE-SW向区域应力场拉张作用下形成的陈南、石村等NW向正断层,控制了主要沉降中心和沉积中心的展布,东营凹陷表现为两个相对独立的沉积单元,即东营凹陷北部半地堑式断陷和博兴地堑式断陷;沙四上亚段—沙二下亚段沉积期(45~35 Ma),盆地区域应力场转变为NW-SE向拉张,并伴随郯庐断层右旋走滑作用,在裂陷初期控盆断层基础上,新发育了一批倾角较大的NE向和

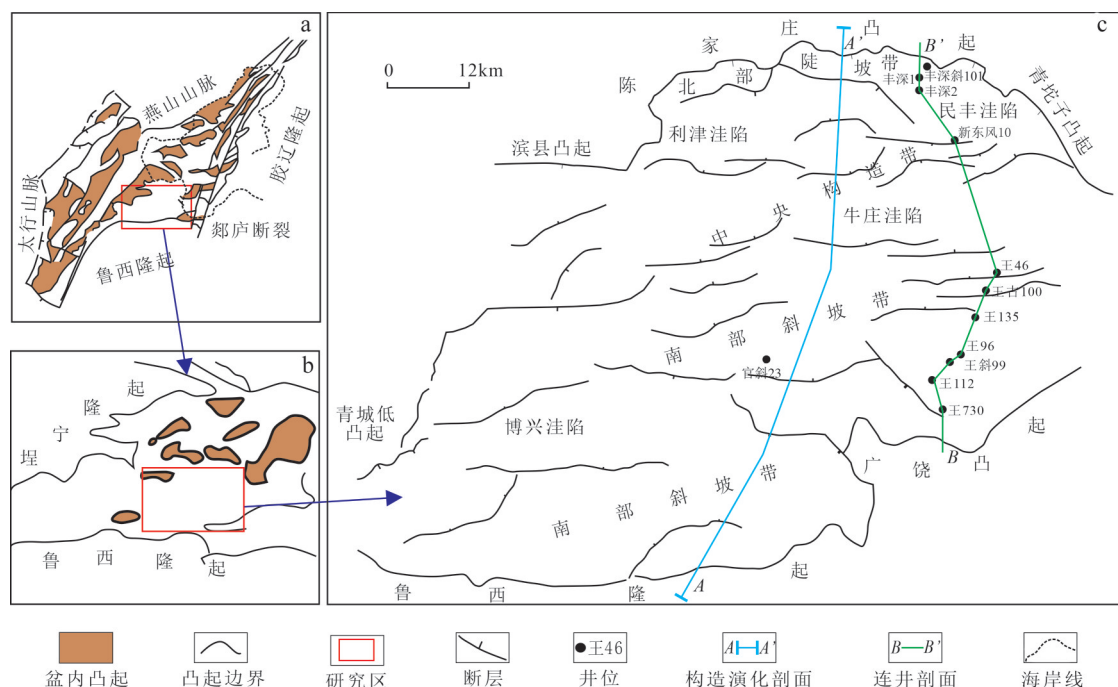


图1 东营凹陷古近系深层构造纲要

Fig. 1 Structure outline of deep Paleogene in the Dongying Sag

a. 渤海湾盆地; b. 济阳坳陷; c. 东营凹陷

EW向断层,受其控制形成了博兴、牛庄、利津和民丰等4个次级洼陷;后期在转换-伸展作用控制下发育了中央构造带<sup>[17-18]</sup>。沙二上亚段—东营组沉积期(35~23 Ma),盆地再次进入扩张沉降时期,但扩张沉降的幅度明显弱于断陷扩张期,形成浅断陷湖盆;东营组沉积时

期济阳坳陷沉积中心向北迁移至沾化凹陷;东营组沉积末期,东营凹陷随全区整体抬升而受到剥蚀(图2)。

## 1.2 气候及湖盆水体演化特征

为了明确古近系气候及水体演化特征,利用目前

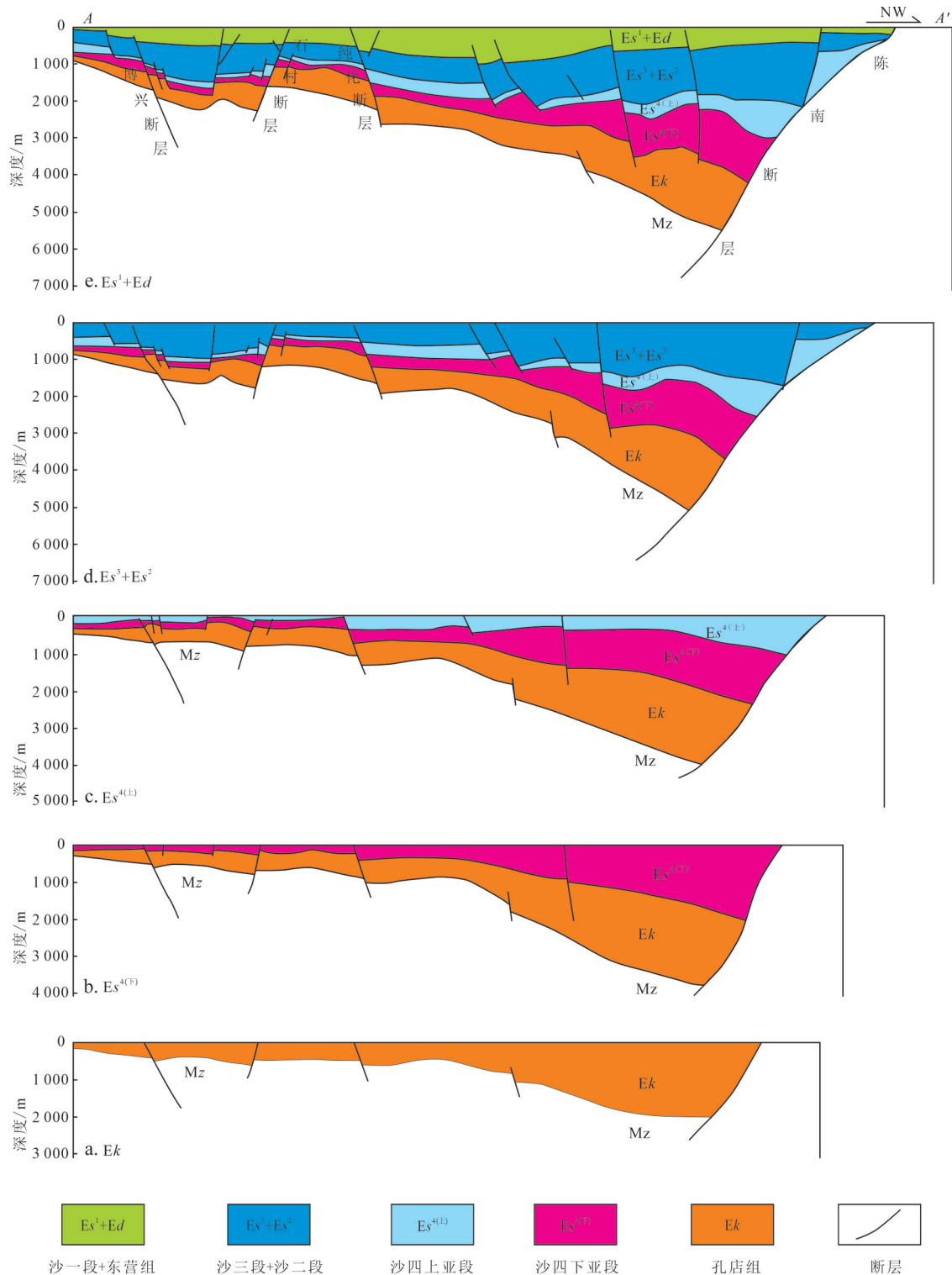


图2 东营凹陷古近系构造演化过程(剖面位置见图1)

Fig. 2 Tectonic evolution of the Paleogene in the Dongying Sag (see Fig. 1 for the location of the section)

较为认可的定量旋回地层学分析方法开展了地质年代的精确厘定<sup>[19-20]</sup>。前人研究表明,GR曲线对气候变化比较敏感,可以作为湖盆沉积环境及地层旋回性变化的替代指标<sup>[21]</sup>。选取单146井、郝科1井及胜科1井的自然GR曲线组成东营凹陷古近系总GR序列,首先对总GR序列预白化处理,去除加权平均趋势值,得到剩余值序列;接着对该剩余值进行多窗谱频分析<sup>[22]</sup>,即可获取古近系自然GR序列的405 ka天文调谐的时间序列;在此基础上,以最新的国际地质年代表中的古近系顶界的地质年龄(23.03 Ma)<sup>[23]</sup>为锚点,向下计算各层段的顶底界时间,最终建立了东营凹陷古生代“金钉子剖面”(图3)。根据重新厘定的各层段的地质时间,并匹配全球古气候演化过程来看,处于北纬40°以南的东营凹陷在古近纪断陷初期大气温度较高,呈先升后降趋势,拐点出现在距今约51 Ma,整体为异常干热气候条件;断陷扩张期,温度持续下降至距今34 Ma,为适宜气候条件;裂陷衰退期,在34~26 Ma主要为间冰期,26~23 Ma演变为潮热气候(图3)。

在前人对古近系古湖泊开放和封闭特征认识的基础上<sup>[24]</sup>,结合主要烃源岩发育层系气候演化过程,利用地层中能够反映沉积物成因来源的Fe、Ca、Mg、Na、K和Al元素的变化趋势,以及地层中能够反映水体盐度的石膏、盐岩的发育程度,重新建立了湖泊水体环境演化序列(图4)。认为在孔店组—沙四下亚段早期,化学成

因来源的Ca和Mg元素和陆源碎屑成因来源的K和Al元素含量的增加与减小交替变化,反映水体变化频繁,考虑到该时期为异常干热气候,地层中发育膏岩,判定其主要为间歇性盐水湖环境。沙四下亚段晚期Ca和Mg元素含量逐渐增多,而K和Al元素含量减小,表明水体稳定。同时Na元素含量高,地层中膏岩及盐岩较发育,表明盐度较高,认为其主要为永久性盐水湖环境。而在裂陷扩张阶段,由沙四上亚段时期到沙三中亚段时期,Ca和Mg元素含量呈稳定的减小趋势,而K和Al元素呈稳定的增高趋势,同时地层主要为暗色,膏岩和盐岩也逐渐变少,表明盐度逐渐降低,判定沙四上亚段时期为咸水湖,沙三下亚段时期为半咸-微咸水湖,沙三中亚段时期为微咸-淡水湖。

### 1.3 沉积充填特征

古近纪不同演化阶段的物源供给、水体环境及气候等因素共同控制了沉积充填特征。

孔店组—沙四下亚段沉积期,构造活动强烈、气候异常干热、盐湖水体频繁升降,盆地边部形成了冲积扇、漫湖三角洲、滩坝、近岸水下扇及扇三角洲等红色、紫红色粗碎屑沉积,勘探中通常称其为“红层”,是有利储层形成的基础。而在湖盆中央发育灰质泥岩、油页岩、盐岩及膏岩等盐湖相沉积物,是有利的烃源岩发育区。特别是在湖盆中央发育的分布广、厚度大(500 m

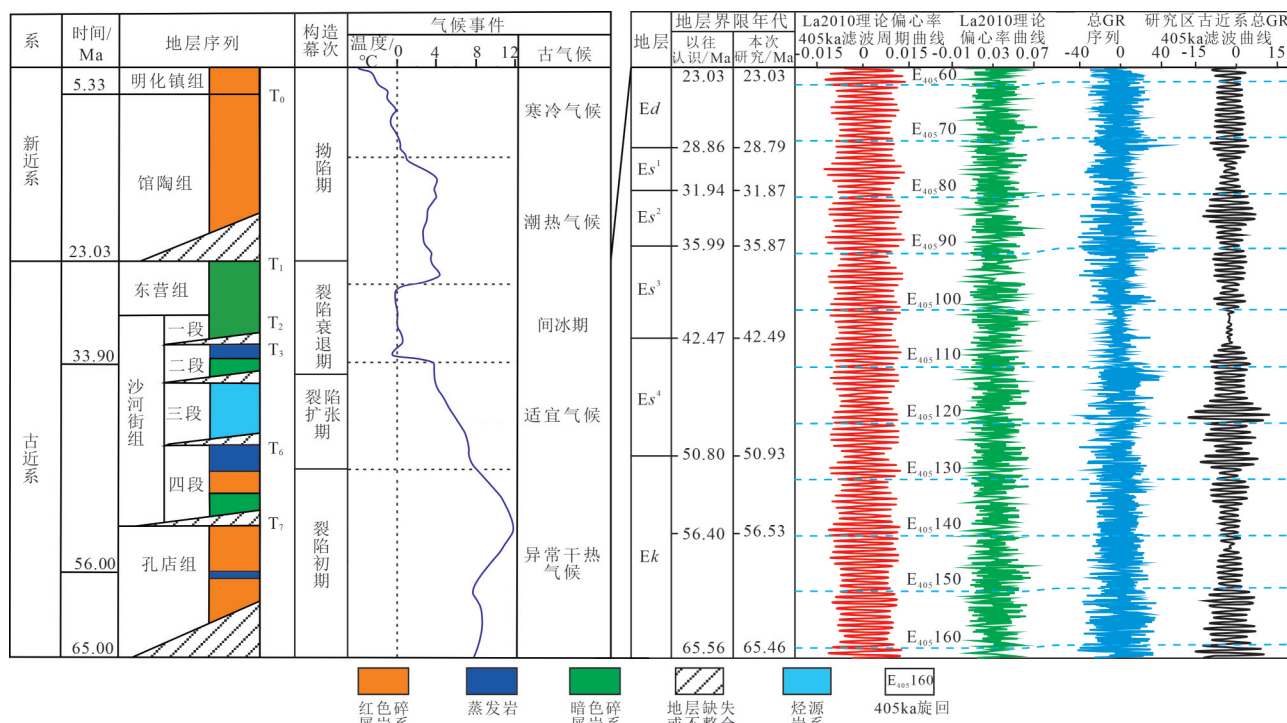


图3 东营凹陷古生代“金钉子”剖面及气候条件演化综合图

Fig. 3 The Paleozoic "gold nail" section and comprehensive chart showing climatic evolution in the Dongying Sag

以上)的稳定盐膏层,具有良好的封盖作用,为古近系深层独立油气成藏系统的形成提供了条件(图5)。沙四上亚段—沙二下亚段沉积期,气候条件潮湿,湖盆水体较深,物源供给充足,盆地的陡坡带发育近岸水下扇,扇三角洲等砂砾岩沉积,缓坡带由早期的冲积扇逐渐演变发育了大型三角洲、滨浅湖及滩坝等牵引流沉积,各洼陷发育大面积的半深湖—深湖相泥页岩沉积。

沙四上亚段—沙二下亚段是东营凹陷的主力烃源岩系和含油气层系。

2 古近系深层资源潜力

前期研究认为东营凹陷古近系油气成藏的烃源岩主要发育在沙四上亚段和沙三下亚段<sup>[24-25]</sup>;基于前述

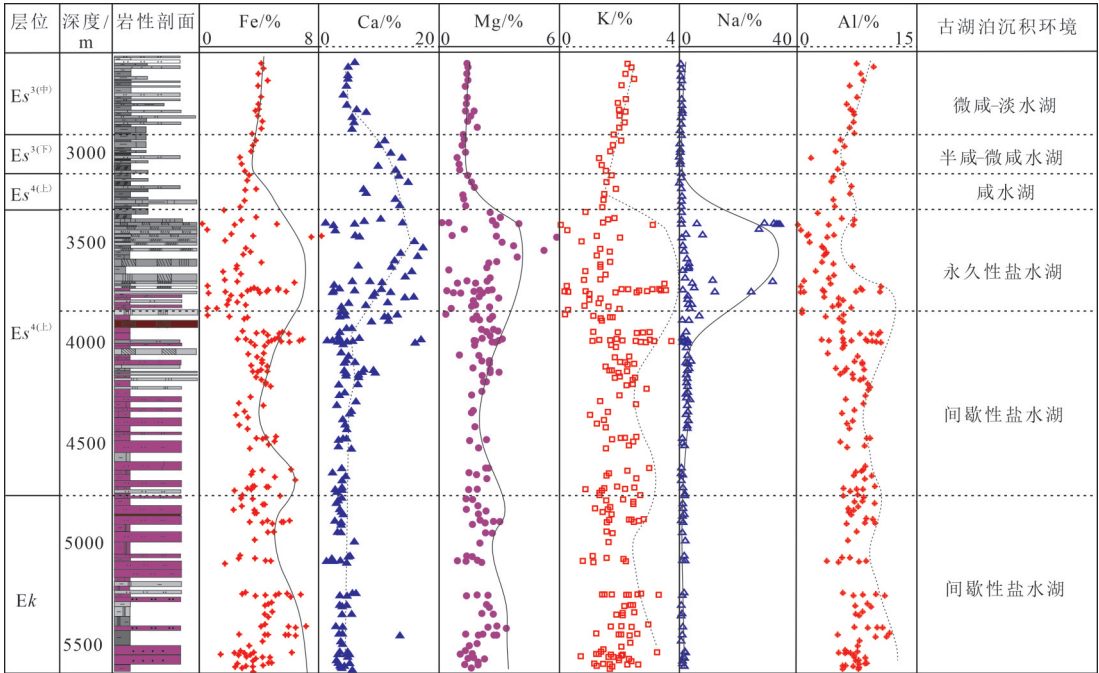


图 4 东营凹陷主要烃源岩发育层系古湖泊水体环境演化序列

Fig. 4 The evolution sequence of the ancient lake water environment of the main hydrocarbon source rocks in the Dongying Sag

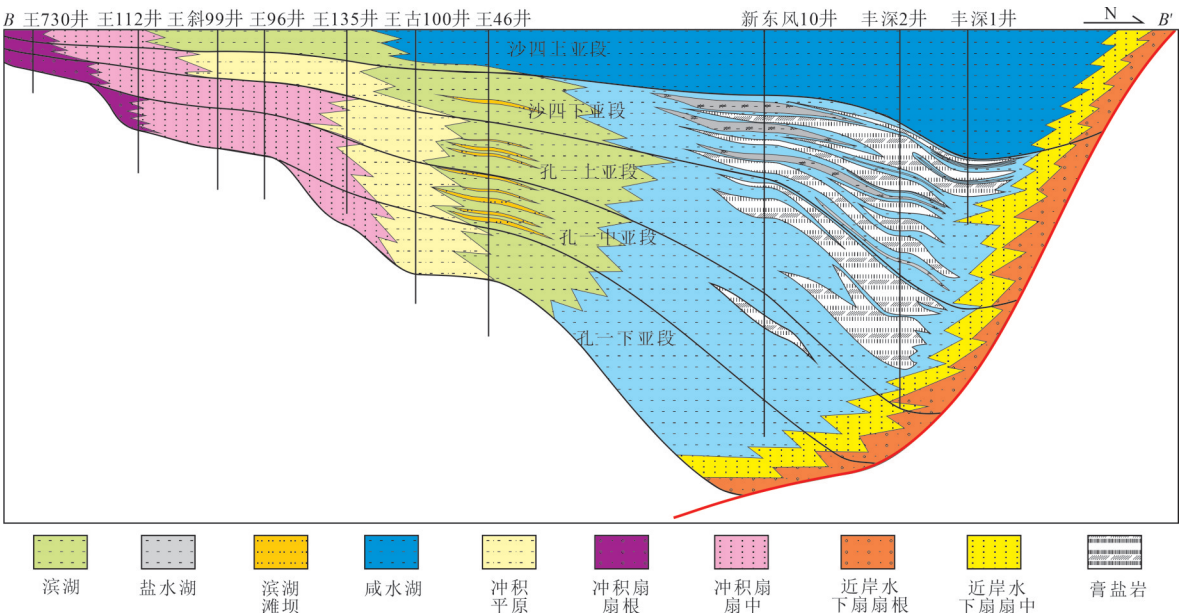


图 5 东营凹陷古近系深层咸化湖泊环境沉积充填模式(连井剖面位置见图 1)

Fig. 5 The sedimentary filling model for the deep Paleogene salinized lakes in the Dongying Sag (see Fig. 1 for the location of well-tie cross-section)

的古近纪湖盆演化、气候条件(图3)及湖盆水体环境的重新分析结果(图4),认为孔店组和沙四下亚段沉积时期的间歇—永久性盐湖较淡水湖泊也具有良好的烃源岩形成条件。盐湖(咸化)环境中主要发育蓝细菌等嗜盐生物,其古生产力水平生碳量约为 $1\,000\text{ g}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$ 明显高于淡水藻类的古生产力水平生碳量 $300\sim 400\text{ g}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$ ;同时,盐水(咸化)湖往往具备较好的封

闭性水文地质条件,能够隔绝外部的氧气,有利于沉积有机质的保存。依据钻井及取心样品测试,落实了孔二段及沙四下亚段两套咸化环境优质烃源岩的特征。不同层系烃源岩的发育地区、规模及地化特征存在差异(图6;表1)。

孔二段烃源岩为异常干热气候条件下局限半深湖—深湖相沉积,在NW向断层的控制下,主要分布于

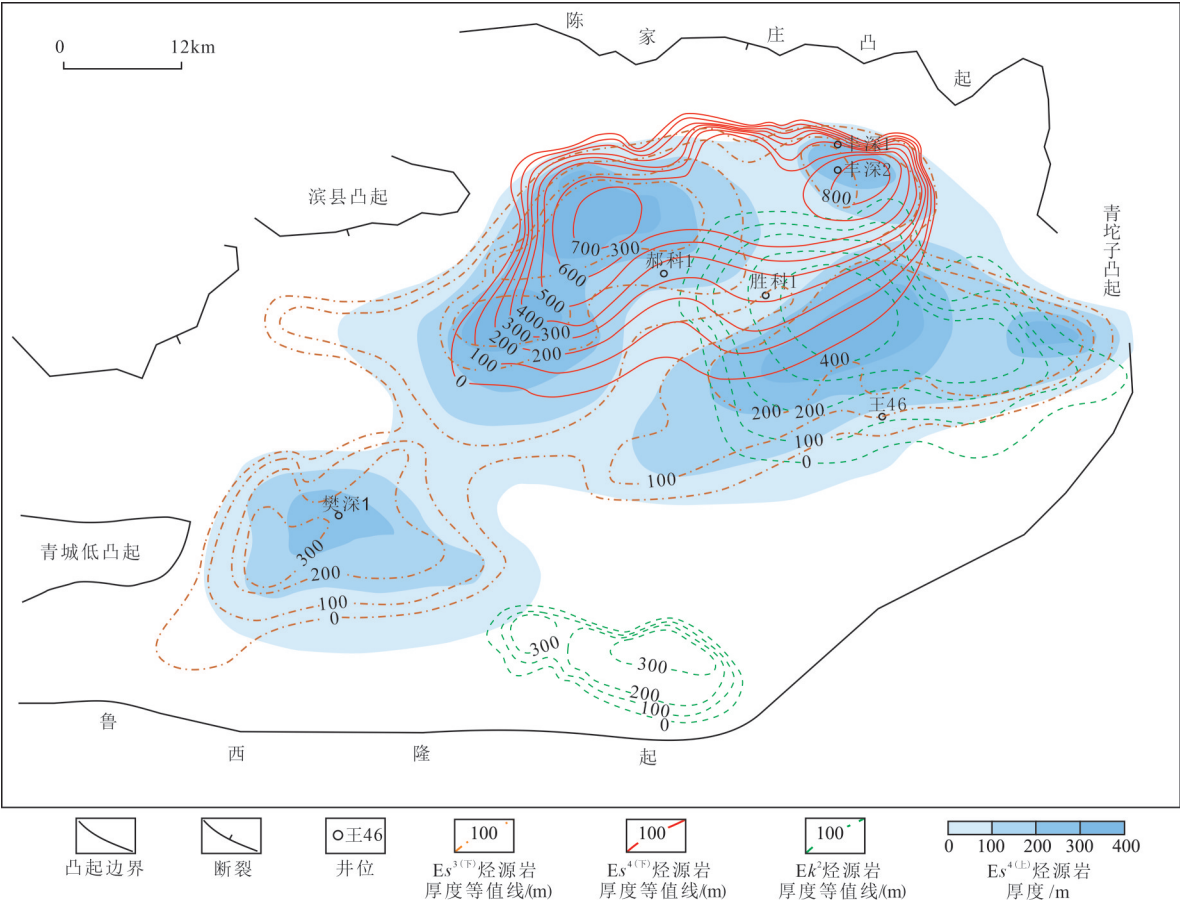


图6 东营凹陷不同层系咸化环境烃源岩分布

Fig. 6 Distribution of the source rocks deposited in a salinized environment in the Dongying Sag

表1 东营凹陷古近系深层烃源岩地化特征

Table 1 Geochemical characteristics of source rocks in deep Paleogene, Dongying Sag

| 层位    | 井号     | 岩性   | 有机质丰度指标            |                |                                           | $R_o/\%$           | 干酪根类型                          | 综合评价        | 分布区域      |
|-------|--------|------|--------------------|----------------|-------------------------------------------|--------------------|--------------------------------|-------------|-----------|
|       |        |      | TOC/%              | 氯仿沥青A含量/%      | $(S_1+S_2)/(\text{mg}\cdot\text{g}^{-1})$ |                    |                                |             |           |
| 沙四下亚段 | 上部 丰深1 | 钙质泥岩 | 0.30~3.50          | 0.30~0.90      | 0.90~8.20                                 | 0.90~1.30          | Ⅱ <sub>1</sub> -Ⅱ <sub>2</sub> | 成熟、优质烃源岩    | 民丰、利津     |
|       | 下部 丰深2 | 泥岩   | 0.30~0.80          | 0.10~0.20      | 0.20~0.90                                 | 1.10~1.30          | Ⅱ <sub>1</sub> -Ⅱ <sub>2</sub> | 高成熟、中等—差烃源岩 | 民丰、利津     |
| 孔二段   | 胜科1    | 灰黑色泥 | 0.07~0.94/<br>0.41 | 0.01~0.07/0.02 | 0.04~0.27/<br>0.05                        | 4.14~4.17/<br>4.12 | I-Ⅱ                            | 过成熟、中等烃源岩   | 牛庄洼陷、石村地区 |
|       | 王46    | 岩夹膏岩 | 0.05~1.16          | —              | 0.01~0.15                                 | 0.96~1.25          | I, Ⅱ-Ⅲ                         | 过成熟、中等烃源岩   | 牛庄洼陷、石村地区 |

注:部分数据来源于文献<sup>[25]</sup>。0.07~0.94/0.41含义为数据范围/平均值。

牛庄洼陷及石村等两个地区,厚度中心呈近北西向展布,最厚可达400 m以上(图6);岩性以灰黑色泥岩夹膏岩为主,有机质类型为Ⅰ、含量Ⅱ-Ⅲ型;有机碳(TOC)含量为0.05%~1.16%;氯仿沥青A含量为0.01%~0.07%,生烃潜量 $S_1+S_2$ 为0.01~0.27 mg/g,镜质体反射率 $R_o$ 为0.96%~4.17%,为过成熟、中等烃源岩(表1)。

沙四下亚段烃源岩分布面积较孔二段扩大,受陈南断层控制,主要分布于民丰和利津洼陷,厚度中心呈近东西向展布,最厚可达800 m以上,向盆缘减薄(图6)。纵向上受膏岩分隔,可分为沙四下亚段上部 and 下部两套烃源岩,上部烃源岩条件好于下部。上部岩性为钙质泥岩,有机质类型以Ⅱ<sub>1</sub>-Ⅱ<sub>2</sub>型为主,TOC为0.3%~3.5%,氯仿沥青A含量为0.3%~0.9%, $S_1+S_2$ 为0.9~8.2 mg/g, $R_o$ 为0.9%~1.3%,为成熟优质烃源岩;下部岩性为泥岩,有机质类型与上部近似,TOC为0.3%~0.8%,氯仿沥青A含量为0.1%~0.2%, $S_1+S_2$ 为0.2~0.9 mg/g, $R_o$ 为1.1%~1.3%,为高成熟、中等-差烃源岩(表1)。

与淡水环境相比,盐湖(咸化)湖泊环境烃源岩因富含无机元素,导致其活化能低于淡水环境烃源岩10~20 kJ/mol。模拟结果显示,在埋深2 500 m即可进入排烃门限,具有排烃时期早、排烃时间长、效率高、生排烃周期长的特点<sup>[26]</sup>。油源对比结果显示,在东营凹陷北部陡坡带盐家地区多口井钻遇的高产工业油气流均来自于深层烃源岩,最新一轮资源量评价结果显示东营凹陷古近系深层石油资源量近 $6.5 \times 10^8$  t。综上所述,古近系盐湖(咸化)环境发育的优质烃源岩能够为深层油气成藏提供资源基础。

### 3 深层优质储层成因

#### 3.1 深层流体场演化过程

##### 3.1.1 碱性流体演化过程

水体性质影响陆源碎屑沉积的成岩演化过程,现代盐湖研究显示,水体碱性与盐度呈正相关关系<sup>[27]</sup>。东营凹陷古近系断陷初期盐湖的碱卤水控制了成岩早期的碱性流体环境,而受蒸发浓缩形成的膏岩层(图5)热演化控制了后期碱性成岩流体环境。随埋深的增加,石膏的演化过程为石膏—生石膏( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ )—熟石膏( $\text{CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$ )—硬石膏( $\text{CaSO}_4$ ),各阶段的演化主要受控于古温度的变化,对应的温度界限分别为42,90和150℃;整个演化过程中伴随着吸附水和束缚

水的脱出,产生的碱性流体进入到储集层中,促使碱性环境的成岩作用发生<sup>[28-29]</sup>。不同时期碱性流体成岩环境对古近系深层优质储层的形成有两方面作用:一是成岩早期的碳酸盐胶结,抑制了后期压实作用的进一步进行;二是能够为后来有机酸溶蚀形成次生孔隙提供物质条件。

##### 3.1.2 酸性流体演化过程

烃源岩中的干酪根在热演化中会形成短链羧酸等有机酸,其过程主要发生在60~140℃的温度区间,并且在75~90℃时,热解形成的短链羧酸浓度达到最高峰;但在80~120℃时最有利于有机酸的保存,低于80℃时,形成的有机酸会被细菌分解,高于120℃时,有机酸则脱羧形成烃类和 $\text{CO}_2$ 等产物,在高于160℃时会全部转化为 $\text{CO}_2$ <sup>[17-18]</sup>。烃源岩的热演化生成有机酸的排出,是成岩环境中的酸性流体主要来源。东营凹陷古近系发育的沙三下亚段、沙四上亚段、沙四下亚段及孔二段烃源岩的埋藏史和热演化史分析认为,自孔二段烃源岩(52.7 Ma)进入排酸阶段开始,4套烃源岩先后在不同阶段发生热演化排酸,相互叠加控制了古近系深层酸性流体浓度的演化<sup>[30]</sup>。也正是由于多期酸性流体的生成,为古近系深层不同类型的储集体在经历早期碳酸盐胶结、后期持续深埋压实作用过程中发生硅酸盐及碳酸盐矿物溶解形成次生溶蚀孔隙提供了可能。

#### 3.2 深层酸、碱共控优质储层成因模式

古近系深层沉积的红层、砂砾岩及滩坝和浊积岩等类型储层,岩性主要为长石岩屑砂岩、岩屑长石砂岩和岩屑砂岩,具有岩石类型多、组分复杂、成分成熟度低、高岩屑和高钙质的特点<sup>[18]</sup>。在咸化湖盆初始水体条件、膏岩层与烃源岩热演化等因素共同控制下,古近系深部储集体普遍经历了酸-碱交替的流体作用过程,形成了深层以次生溶蚀孔隙为主的优质储层(图7),为油气成藏提供了良好的储集条件,但不同类型储集体经历的酸、碱性流体充注过程及有利储层的成因机制存在差异。

##### 3.2.1 缓坡带红层优质储层成因模式

缓坡带红层经历的流体演化过程为碱性—弱酸性—碱性—酸性—弱酸性,发育压实作用/石膏胶结/碳酸盐胶结—早期碳酸盐胶结物溶蚀/长石溶蚀/石英次生加大等酸性成岩作用—碳酸盐胶结物/长石溶蚀作用,储集空间主要为酸性条件下长石及碳酸盐胶结物溶蚀孔

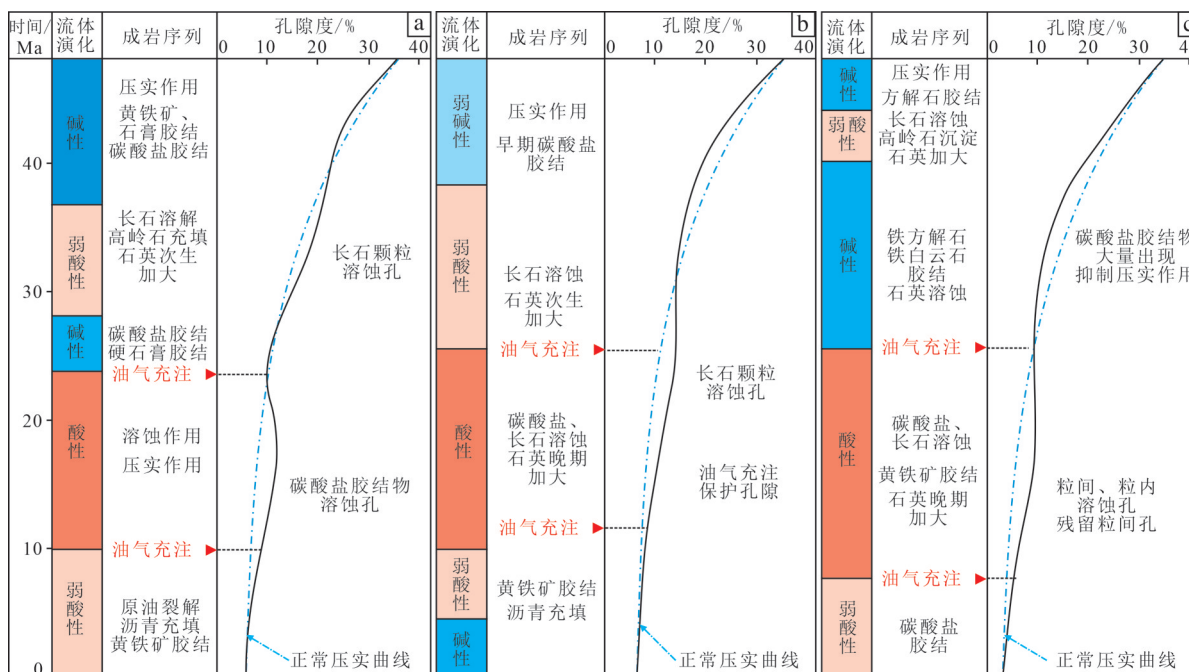


图7 东营凹陷古近系深层优质储层成因模式

Fig. 7 Genetic models of high-quality reservoirs in deep Paleogene, Dongying Sag

a. 缓坡带被断层切割红层砂体; b. 缓坡带滩坝砂体; c. 陡坡带深层砂砾岩体扇中亚相砂体

(图7a,图8a—c)。镜下薄片统计显示,埋深在3 500 m以下有利储层的次生溶蚀孔隙的体积分数可达60%以上<sup>[18, 31-33]</sup>;此外,被断层切割的厚层红层砂体,上部酸性溶蚀作用要强于下部,使得储集物性上部较下部好。

### 3.2.2 缓坡带滩坝优质储层成因模式

缓坡带滩坝经历的流体演化过程为弱碱性—弱酸性—酸性—弱酸性—碱性,发育压实作用/少量碳酸盐胶结物—早期碳酸盐胶结物溶蚀/长石溶蚀/石英次生加大—碳酸盐胶结物、长石等溶蚀作用/黄铁矿胶结/晚期石英次生加大(图7b,图8d—f)。由于缺乏有利于碳酸盐胶结物形成的钙质物质,所以在弱碱性流体环境形成的碳酸盐胶结物相对较少<sup>[27]</sup>。而被断层切割的滩坝砂岩,因能够接受周围泥岩热演化产生的有机酸,发育长石溶蚀孔等类型次生孔隙,可形成有利储层。

### 3.2.3 陡坡带砂砾岩体优质储层成因模式

陡坡带深层砂砾岩的扇根亚相储层在背部控盆断层的沟通作用下,长期接受深层膏岩热演化形成的碱性流体,流体演化过程为碱性—弱酸性—碱性—碱性,发育早期压实及泥质胶结物的重结晶、后期碳酸盐胶结和少量的酸性溶蚀(图8g);而扇中亚相紧邻烃源岩和膏岩层,不断经历酸性与碱性流体的交替注入,流体环境演化过程为碱性—弱酸性—碱性—酸性—弱酸

性,发育早期压实作用/碳酸盐胶结作用—长石溶蚀/石英加大等酸性溶蚀作用—铁方解石胶结作用—晚期碳酸盐溶蚀、长石溶蚀/黄铁矿胶结及石英晚期加大—沥青充填、碳酸盐胶结等成岩序列(图7c,图8h,i)。有利的储集空间为碳酸盐胶结物、长石等矿物的次生溶蚀孔隙,增孔量可达8.7%<sup>[18]</sup>。

## 4 深层油气成藏模式

古近系深层良好的烃源岩条件、有利储层发育条件和封盖条件,决定了其独立的含油气系统。按照油气来源不同可划分为“自源型”和“他源型”油气藏。

### 4.1 深层油气藏特征

钻探结果显示,古近系深层油气藏具有“来源多、类型多、相态多”等特点(表2)。油源对比已证实的为深层供烃的源岩层系有沙三下亚段、沙四上亚段、沙四下亚段及孔二段等4套烃源岩;发育构造、构造—岩性、地层及岩性等4类油气藏类型;油气呈裂解气、凝析油气和常规油气等相态类型;虽埋藏深,但储层物性较好,具备较高产能,如丰深1井钻遇的砂砾岩油藏,在沙四下亚段4 316~4 313 m井段测试获日产油81.7 t、日产气 $11.8 \times 10^4 \text{ m}^3$ 的高产工业油气流。

4.2 油气成藏模式及分布序列

“自源型”油气成藏模式:指古近系深层中“源”、“藏”属于同一层系的成藏模式,油源来自盐下的烃源岩[ $E_k^2$ 和 $E_s^{4(下)}$ ],储层为陡坡带砂砾岩和深洼区盐湖环境储集体,储集层紧邻或处在烃源岩之中,油气藏类型以岩性类为主(图9)。这类油气藏一般埋深较大,储层物性是

油气富集高产的关键因素。由于烃源岩埋藏深、油气演化程度高,同时受膏岩层封隔,超压发育,油气充满程度高,油气并存且以气为主、油层与干层或气层与干层互层特点。以陡坡带盐家地区沙四下亚段砂砾岩体油气藏为例,丰深斜 101 井(图 1)在沙四下亚段 4 525 ~ 4 552 m 井段试油,获得日产油 16. 95 t、日产气 30 550 m<sup>3</sup>的高产工业油气流,气层孔隙度最低可达 4. 2 %,向上逐渐

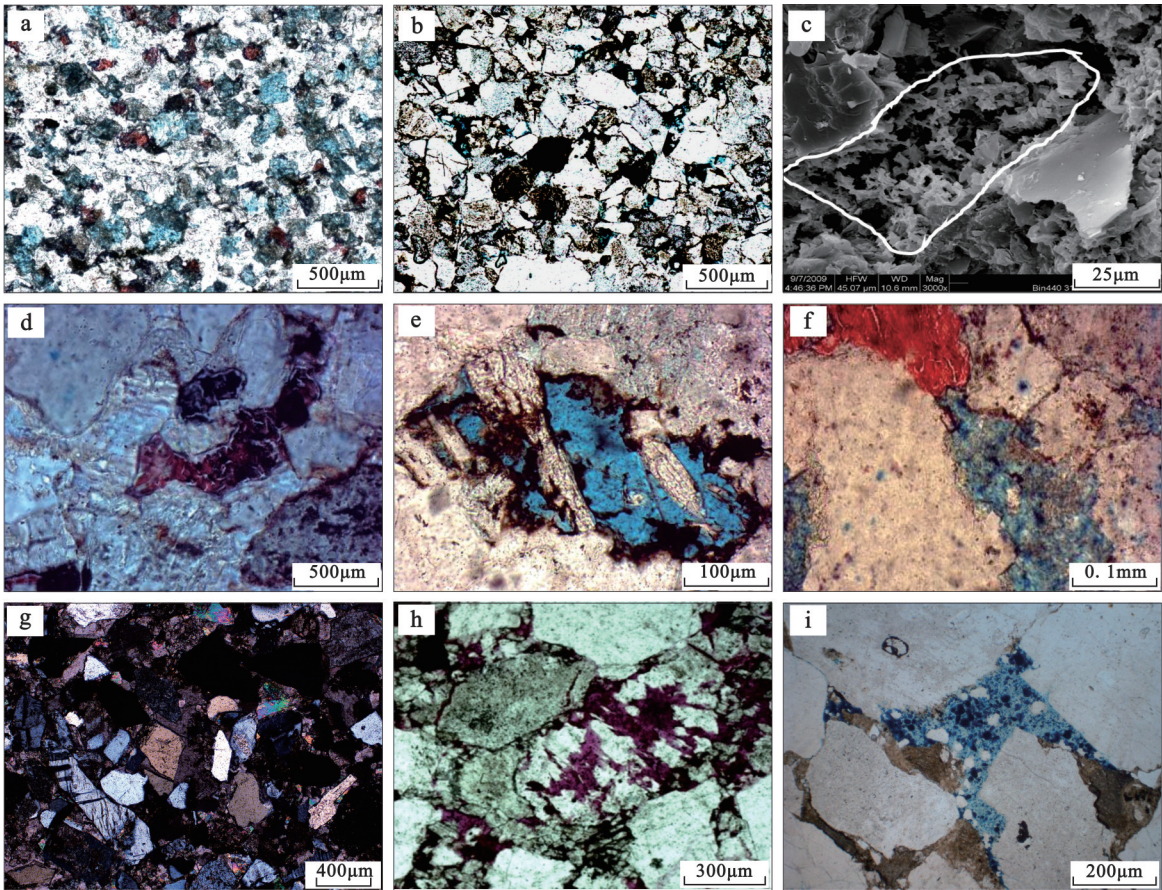


图8 东营凹陷古近系深层优质储层微观特征

Fig. 8 Microscopic images showing high-quality reservoirs in deep Paleogene, Dongying Sag

a. 官 12 井,埋深 3 321. 40 m,红层,方解石胶结孔隙;b. 樊深 1 井,埋深 3 582. 40 m,红层,白云石溶解;c. 樊深 1 井,埋深 4 056. 70 m,红层,碳酸盐胶结;d. 利 671 井,埋深 4 215. 66 m,滩坝砂,铁白云石、方解石胶结;e. 利 57 井,埋深 4 161. 15 m,滩坝砂,长石颗粒溶蚀;f. 利 671 井,埋深 3 917. 47 m,滩坝砂,长石溶蚀为高岭石;g. 丰深 10 井,埋深 3 822. 40 m,砂砾岩,白云石致密胶结;h. 永 928 井,埋深 3 757. 10 m,砂砾岩,长石溶蚀成骨架状;i. 坨 465 井,埋深 4 786. 53 m,砂砾岩,胶结物及颗粒发生溶蚀形成次生孔隙

表 2 东营凹陷古近系深层已发现油气藏特征

Table 2 Characteristics of discovered oil/gas reservoirs in deep Paleogene, Dongying Sag

| 井号      | 试油深度/m        | 构造位置 | 储集类型 | 油藏类型  | 油源           | 试油产量                                                   | 原油性质    |
|---------|---------------|------|------|-------|--------------|--------------------------------------------------------|---------|
| 丰深 1    | 4 316 ~ 4 313 | 陡坡带  | 砂砾岩  | 岩性    | $E_s^{4(上)}$ | 日产油 81. 7 t, 日产气 11. 80×10 <sup>4</sup> m <sup>3</sup> | 常规油、裂解气 |
| 新利深 1   | 4 220 ~ 4 237 | 陡坡带  | 砂砾岩  | 构造-岩性 | $E_s^{4(下)}$ | 日产油 99 t, 日产气 25. 63×10 <sup>4</sup> m <sup>3</sup>    | 常规油、裂解气 |
| 丰深斜 101 | 4 525 ~ 4 552 | 陡坡带  | 砂砾岩  | 岩性    | $E_s^{4(下)}$ | 日产油 16. 95 t, 日产气 3. 06×10 <sup>4</sup> m <sup>3</sup> | 凝析油气    |
| 高 94    | 3 776 ~ 3 789 | 缓坡带  | 红层滩坝 | 构造-岩性 | $E_s^{4(上)}$ | 日产油 5. 75 t                                            | 常规油     |
| 樊 154   | 3 500 ~ 3 522 | 缓坡带  | 滩坝   | 构造-岩性 | $E_s^{4(上)}$ | 日产油 12. 50 t                                           | 常规油     |
| 利 67    | 4 007 ~ 4 092 | 缓坡带  | 滩坝   | 岩性    | $E_s^{4(上)}$ | 日产油 83. 40 t                                           | 常规油     |
| 高 946   | 3 647 ~ 3 657 | 缓坡带  | 红层   | 构造-岩性 | $E_s^{4(上)}$ | 日产油 18. 30 t                                           | 常规油     |
| 高 945   | 3 704 ~ 3 718 | 缓坡带  | 红层   | 构造-岩性 | $E_s^{4(上)}$ | 日产油 7. 84 t                                            | 常规油     |

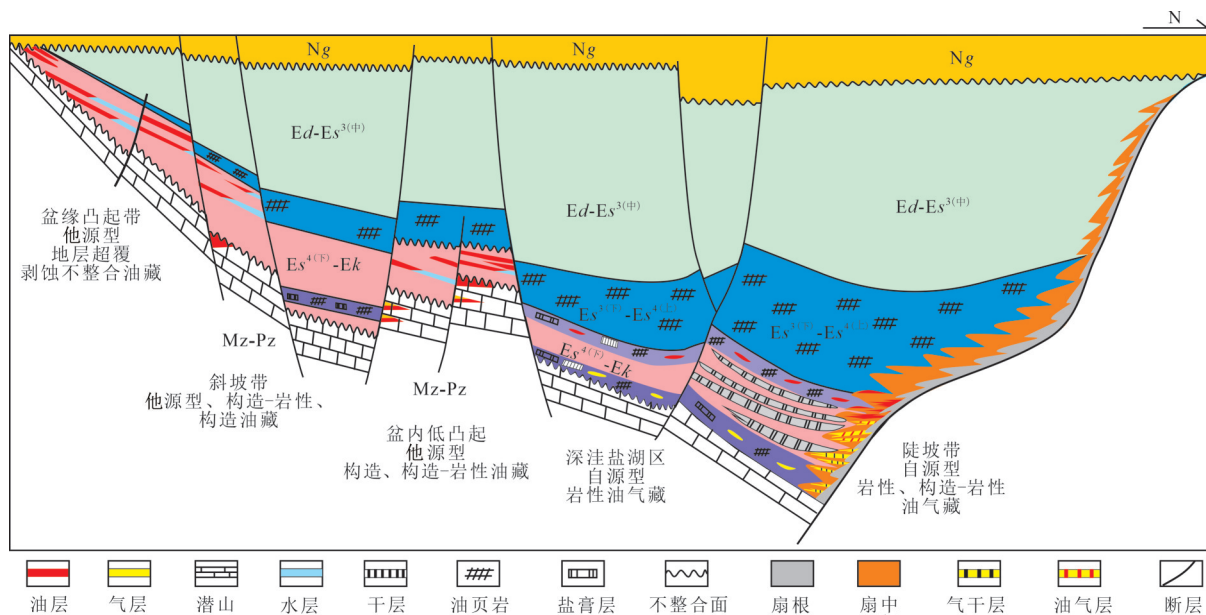


图9 东营凹陷古近系深层油气成藏模式

Fig. 9 Hydrocarbon accumulation models in deep Paleogene, Dongying Sag

过渡为油气层。

“他源型”油气成藏模式:指古近系深层中“源”、“藏”分属于不同层系的成藏模式。油源来自盐膏层上部  $Es^3$  和  $Es^{4(上)}$  及盐下的  $Es^{4(下)}$  和  $Ek^2$ , 储层为缓坡漫湖和河流相沉积的红层储集体;发育构造油藏、构造-岩性油藏、地层油藏等3种油藏类型。这类油气藏远离油源,油源断层断距决定了上升盘含油层段,储层品质决定油气富集部位(图9)。该类油藏整体呈高凝固点、低胶质、低沥青质特点,且原油凝固点和粘度由洼陷带向盆缘逐渐降低,存在边底水,含油高度在60~100 m。以南部缓坡带陈官庄地区孔店组红层油藏为例,官斜23井(图1)在孔一段3 155~3 139.8 m井段试油,日产油4.23 t,含水62.2%;密度为0.919 8 g/cm<sup>3</sup>,粘度为550 mPa·s,凝固点高达42℃。

古近系深层油气成藏系统的油气藏分布与断陷盆地结构、沉积储层发育和成藏动力系统具有良好的对应性,“自源型”及“他源型”油气成藏模式有序分布。由盆缘带—缓坡带—深洼带—陡坡带,油气藏分布序列依次为:盆缘带“他源型”地层超覆油藏、剥蚀不整合油藏;斜坡带“他源型”构造-岩性油藏、构造油藏;深洼区“自源型”岩性油气藏;陡坡带“自源型”岩性、构造-岩性油气藏。(图9)。

## 5 深层油气勘探潜力

东营凹陷深层在盐湖(咸化)烃源岩、酸-碱共控

成因优质储层及有利输导条件的配置下,古近系深层的缓坡带红层、滩坝砂及陡坡带砂砾岩均具有良好的油气成藏条件和勘探潜力。

### 5.1 缓坡带红层勘探潜力

缓坡带沙四下亚段—孔店组“红层”可形成受断层切割的断块圈闭和地层圈闭,通过油源断层与烃源岩侧向对接的圈闭是有利的油气聚集场所。按照“源岩—储层—断层—圈闭”等成藏要素相互匹配思路,鼻状构造背景上的断块油藏,构造-岩性油藏是有利勘探领域。

### 5.2 缓坡带滩坝砂勘探潜力

缓坡带沙四下—孔店组滩坝砂岩多紧邻或包裹于沙四下亚段烃源岩中,能够形成“自源型”油气藏,其富集程度受超压、有效储层及断层发育等因素控制<sup>[33]</sup>。在砂体精细刻画基础上,邻近超压中心的厚层滩坝砂形成构造-岩性油藏是有利勘探领域。

### 5.3 陡坡带深层砂砾岩勘探潜力

陡坡带深层砂砾岩体紧邻深层烃源岩,发育“自源”型油气藏,酸-碱流体交替控制下的成岩圈闭以及构造-岩性类圈闭是油气有利的聚集场所。油气的富集受扇中有利相带和断层封闭能力控制。在深层砂砾岩有利相带精细刻画基础上,凝析-裂解的岩性油气藏是有利勘探领域。

## 6 结论

1)古近系深层成盆演化及沉积充填为深层油气成藏系统形成提供了烃源层、有利储层及封盖层等基本物质条件。

2)盐湖(咸化)环境下发育的孔二段、沙四下亚段优质烃源岩,具有古生产力高、排烃时期早、排烃效率高、周期长的特点,能够为深层油气成藏系统形成提供资源基础。

3)古近系深层咸化湖泊的储集体普遍经历了酸-碱交替的成岩环境,能够在深部形成以次生溶蚀孔隙为主要储集空间的有效储层,为油气成藏提供了良好的储集条件。

4)古近系深层油气成藏系统主要发育“自源型”和“他源型”两类油气成藏模式,油气藏分布与断陷盆地结构、沉积储层发育和成藏动力系统具有良好的对应性。缓坡带红层“他源型”构造油藏,缓坡带滩坝砂“自源型”构造-岩性油藏及陡坡带砂砾岩“自源型”凝析岩性油气藏是下步有利的勘探领域。

致谢:编辑部老师及审稿专家在文章最终成文过程中提出了宝贵的修改意见,在此一并表示衷心感谢。

## 参考文献

- [1] 邹才能,张光亚,陶士振,等. 全球油气勘探领域地质特征、重大发现及非常规石油地质[J]. 石油勘探与开发,2010,37(2): 129-145.  
Zou Caineng, Zhang Guangya, Tao Shizhen, et al. Geological features, major discoveries and unconventional petroleum geology in the global petroleum exploration [J]. Petroleum Exploration and Development, 2010, 37(2): 129-145.
- [2] 贾承造,庞雄奇. 深层油气地质理论研究进展与主要发展方向[J]. 石油学报, 2015, 36(12): 1457-1469.  
Jia Chengzao, Pang Xiongqi. Research processes and main development directions of deep hydrocarbon geological theories [J]. Acta Petrolei Sinica, 2015, 36(12): 1457-1469.
- [3] 何治亮,马永生,朱东亚,等. 深层-超深层碳酸盐岩储层理论技术进展与攻关方向[J]. 石油与天然气地质,2021,42(3):533-546.  
He Zhiliang, Ma Yongsheng, Zhu Dongya, et al. Theoretical and technological progress and research direction of deep and ultra-deep carbonate reservoirs [J]. Oil & Gas Geology, 2021, 42(3): 533-546.
- [4] 张春林,姚泾利,李程善,等. 鄂尔多斯盆地深层寒武系碳酸盐岩储层特征与主控因素[J]. 石油与天然气地质,2021,42(3): 604-614.  
Zhang Chunlin, Yao Jingli, Li Chengshan, et al. Characteristics of deep Cambrian carbonate reservoirs in the Ordos Basin and main control factors[J]. Oil & Gas Geology, 2021, 42(3): 604-614.
- [5] 马永生,蔡勋育,赵培荣. 深层、超深层碳酸盐岩油气储层形成

- 机理研究综述[J]. 地学前缘,2011,18(4):181-192.  
Ma Yongsheng, Cai Xunyu, Zhao Peirong. The research status and advances in porosity evolution and diagenesis of deep carbonate reservoir [J]. Earth Science Frontiers, 2011, 18(4):181-192.
- [6] 翟光明,王世洪,何文渊. 近十年全球油气勘探热点趋向与启示[J]. 石油学报,2012,33(S1):14-19.  
Zhai Guangming, Wang Shihong, He Wenyuan. Hotspot trend and enlightenment of global ten-year hydrocarbon exploration [J]. Acta Petrolei Sinica, 2012, 33(S1): 14-19.
- [7] 王永诗,李友强. 胜利油田东部探区“十二五”中后期勘探形势与对策[J]. 油气地质与采收率,2014,21(4):5-9+111.  
Wang Yongshi, Li Youqiang. The exploration situation and countermeasures in the late 12th Five-Year Plan in the eastern area of Shengli oilfield, Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2014, 21(4): 5-9+111.
- [8] 宋明水. 济阳坳陷勘探形势与展望[J]. 中国石油勘探,2018, 23(3):11-17.  
Song Mingshui. The exploration status and outlook of Jiyang depression [J]. China Petroleum Exploration, 2018, 23(3): 11-17.
- [9] 吴聿元,陈贞龙. 延川南深部煤层气勘探开发面临的挑战 and 对策[J]. 油气藏评价与开发, 2020, 10(4): 1-11.  
Wu Yuyuan, Chen Zhenlong. Challenges and countermeasures for exploration and development of deep CBM of South Yanchuan [J]. Reservoir Evaluation and Development, 2020, 10(4): 1-11.
- [10] 李阳,薛兆杰,程喆,等. 中国深层油气勘探开发进展与发展方向[J]. 中国石油勘探,2020,25(21):45-57.  
Li Yang, Xue Zhaojie, Cheng Zhe, et al. Progress and development directions of deep oil and gas exploration and development in China [J]. China Petroleum Exploration, 2020, 25(21): 45-57.
- [11] 宋明水,李友强. 济阳坳陷油气精细勘探评价及实践[J]. 中国石油勘探,2020,25(1):93-101.  
Song mingshui, Li Youqiang. Evaluation and practice of fine petroleum exploration in the Jiyang depression [J]. China Petroleum Exploration, 2020, 25(1): 93-101.
- [12] 张东东,刘文汇,王晓峰,等. 深层油气藏成因类型及其特征[J]. 石油与天然气地质,2021,42(5):1169-1180.  
Zhang Dongdong, Liu Wenhui, Wang Xiaofeng, et al. Genetic types and characteristics of deep oil and gas plays [J]. Oil & Gas Geology, 2021, 42(5): 1169-1180.
- [13] 徐洪,杨玉峰. 费尔干纳盆地超深层油气成藏系统[J]. 石油实验地质, 2014, 36(4):450-458.  
Xu Hong, Yang Yufeng. Ultra-deep petroleum accumulation systems in Fergana Basin [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2014, 36(4): 450-458.
- [14] 达江,宋岩,洪峰,等. 准噶尔盆地南缘前陆盆地油气成藏系统划分研究[J]. 天然气地球科学, 2006(4): 452-455.  
Da Jiang, Song Yan, Hong Feng, et al. Division of hydrocarbon accumulation system in the southern Junggar foreland basin [J]. Natural Gas Geoscience, 2006(4): 452-455.
- [15] 刘惠民,张顺,包友书,等. 东营凹陷页岩油储集地质特征与有效性[J]. 石油与天然气地质,2019, 40(3): 512-523.  
Liu Huimin, Zhang Shun, Bao Youshu, et al. Geological characteristics and effectiveness of the shale oil reservoir in Dongying sag [J]. Oil & Gas Geology, 2019, 40(3): 512-523.
- [16] 张伟忠,张云银,查明,等. 渤海湾盆地东营凹陷扭张断裂成因模式及控藏作用[J]. 石油与天然气地质, 2019, 40(2):

- 262-270.
- Zhang Weizhong, Zhang Yunyin, Zha Ming, et al. Genetic model of transtensional faults in Dongying Depression, Bohai Bay Basin, and its controls over hydrocarbon accumulation[J]. *Oil & Gas Geology*, 2019, 40(2): 262-270.
- [17] 王永诗, 郝雪峰, 胡阳. 富油凹陷油气分布有序性与富集差异性—以渤海湾盆地济阳坳陷东营凹陷为例[J]. *石油勘探与开发*, 2018, 45(5): 785-794.
- Wang Yongshi, Hao Xuefeng, Hu Yang. Orderly distribution and differential enrichment of hydrocarbon in oil-rich sags: A case study of Dongying sag, Jiyang depression, Bohai bay basin, East China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2018, 45(5): 785-794.
- [18] 王永诗, 王勇, 朱德顺, 等. 东营凹陷北部陡坡带砂砾岩优质储层成因[J]. *中国石油勘探*, 2016, 21(2): 28-36.
- Wang Yongshi, Wang Yong, Zhu Deshun, et al. Genetic mechanism of high-quality glutenite reservoirs at the steep slope in northern Dongying sag[J]. *China Petroleum Exploration*, 2016, 21(2): 28-36.
- [19] Laskar J, Robutel P, Joutel F, et al. A long term numerical solution for the insolation quantities of the Earth[J]. *Astronomy and Astrophysics*, 2004, 428(1): 261-285.
- [20] Laskar J, Fienga A, Gastineau M, et al. La2010: a new orbital solution for the long term motion of the Earth[J]. *Astronomy and Astrophysics*, 2011, 532: 17.
- [21] 吴欣松, 郭娟娟, 黄永建, 等. 松辽盆地晚白垩世古气候变化的测井替代指标[J]. *古地学报*, 2011, 13(1): 103-110.
- Wu Xinsong, Guo Juanjuan, Huang Yongjian, et al. Well logging proxy of the Late Cretaceous palaeoclimate change in Songliao Basin[J]. *Journal of Palaeogeography*, 2011, 13(1): 103-110.
- [22] 黄春菊. 旋回地层学和天文年代学及其在中生代的研究现状[J]. *地学前缘*, 2014, 21(2): 48-66.
- Huang Chunju. The current status of cyclostratigraphy and astrochronology in the Mesozoic[J]. *Earth Frontiers*, 2014, 21(2): 48-66.
- [23] Gradstein F M, Ogg J G, Hilgen F J. The geologic time scale[J]. *Newsletters on Stratigraphy*, 2012, 45(2): 171-188.
- [24] 刘庆, 张林晔, 王茹, 等. 湖相烃源岩原始有机质恢复与生排烃效率定量研究—以东营凹陷古近系沙河街组四段优质烃源岩为例[J]. *地质论评*, 2014, 60(4): 877-883.
- Liu Qing, Zhang Linye, Wang Ru, et al. Recovery of original organic matter content and quantitatively study of generation and expulsion efficiency for lacustrine hydrocarbon source rocks: A case study of the excellent source rocks of the Palaeocene E<sub>2-3</sub>s<sup>4</sup>, Dongying Sag[J]. *Geological Review*, 2014, 60(4): 877-883.
- [25] 巢前, 蔡进功, 周祺盛, 等. 东营凹陷沙河街组 Es<sub>3</sub>/Es<sub>4</sub> 烃源岩热解特征及生烃差异研究[J]. *高校地质学报*, 2017, 23(4): 688-696.
- Chao Qian, Cai Jingong, Zhou Qisheng, et al. Characteristics of rock-eval pyrolysis and hydrocarbon generation for source rocks of Eocene Shahejie third and fourth members, Dongying depression[J]. *Geological Journal of China Universities*, 2017, 23(4): 688-696.
- [26] 赵悦, 蔡进功, 谢奥博, 等. 淡水和咸水湖相泥质烃源岩不同赋存态有机质的地球化学特征[J]. *石油实验地质*, 2018, 40(5): 705-715.
- Zhao Yue, Cai Jingong, Xie Aobo, et al. Geochemical investigation of organic matter of various occurrences released via sequential treatment of two argillaceous source rock samples from fresh and saline lacustrine environments[J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2018, 40(5): 705-715.
- [27] 李继岩, 宋国奇, 王晓蕾, 等. 不同沉积环境形成的储层成岩差异性研究—以东营凹陷王家岗地区红层与博兴洼陷灰层滩坝为例[J]. *天然气地球科学*, 2015, 26(2): 269-276.
- Li Jiyang, Song Guoqi, Wang Xiaolei, et al. Study on the differences of diagenetic evolution under different sedimentary environment: take an example of the Red-beds of Wangjiagang, Dongying sag and oligocene gray-beds beach-bar of Boxing sag[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2015, 26(2): 269-276.
- [28] 陈波, 张顺存, 孙国强, 等. 准噶尔盆地车拐斜坡区储层碳酸盐胶结物碳氧同位素特征及其成因[J]. *油气藏评价与开发*, 2020, 10(4): 101-106.
- Chen Bo, Zhang Shuncun, Sun Guoqiang, et al. Characteristics and formation mechanism of Carbonate cementation in Che-Guai slope area, Junggar Basin[J]. *Reservoir Evaluation and Development*, 2020, 10(4): 101-106.
- [29] 李继岩. 渤海湾盆地东营凹陷东段红层储层成岩环境时空演化及成岩孔隙演化[J]. *石油与天然气地质*, 2017, 38(1): 90-97.
- Li Jiyang. Temporal-spatial evolution of diagenetic environment and diagenesis pore evolutionary process of red beds in the eastern Dongying sag, Bohai bay basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2017, 38(1): 90-97.
- [30] 刘鑫金, 刘惠民, 宋国奇, 等. 济阳坳陷东营三角洲前缘斜坡重力流成因砂体特征及形成条件[J]. *中国石油大学学报(自然科学版)*, 2017, 41(4): 36-45.
- Liu Xinjin, Liu Huimin, Song Guoqi, et al. Characteristics and formation condition of gravity flow developing in low-lying slope zone of Dongying delta in Jiyang depression[J]. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)*, 2017, 41(4): 36-45.
- [31] 贾光华. 东营凹陷南坡古近系红层砂体储层特征及控制因素[J]. *东北石油大学学报*, 2013, 37(3): 48-58+126-127.
- Jia Guanghua. Reservoir characteristic and control factors of Palaeogene red sandstones in southern slope of Dongying sag[J]. *Journal of Northeast Petroleum University*, 2013, 37(3): 48-58+126-127.
- [32] 王永诗, 王勇, 郝雪峰, 等. 深层复杂储集体优质储层形成机理与油气成藏—以济阳坳陷东营凹陷古近系为例[J]. *石油与天然气地质*, 2016, 37(4): 490-498.
- Wang Yongshi, Wang Yong, Hao Xuefeng, et al. Genetic mechanism and hydrocarbon accumulation of quality reservoir in deep and complicated reservoir rocks: A case from the Palaeogene in Dongying Sag, Jiyang Depression[J]. *Oil & Gas Geology*, 2016, 37(4): 490-498.
- [33] 郝雪峰. 东营凹陷沙三—沙四段砂岩储层超压成因与演化[J]. *石油与天然气地质*, 2013, 34(2): 167-173.
- Hao Xuefeng. Overpressure genesis and evolution of sandstone reservoirs in the 3rd and 4th members of Shahejie formation, the Dongying depression[J]. *Oil & Gas Geology*, 2013, 34(2): 167-173.

(编辑 张亚雄)