

文章编号: 0253-2697(2023)07-1058-14 DOI:10.7623/syxb202307003

# 盆地结构控制下的地层压力-流体-储集性 协同演化及控藏作用

——以东营凹陷古近系为例

王永诗<sup>1</sup> 郝雪峰<sup>2</sup> 安天下<sup>2</sup> 张鹏飞<sup>2</sup> 熊伟<sup>2</sup> 秦峰<sup>2</sup>

(1. 中国石油化工股份有限公司胜利油田分公司 山东东营 257001;

2. 中国石油化工股份有限公司胜利油田分公司勘探开发研究院 山东东营 257015)

**摘要:**油气成藏是地层压力、流体、储集性及其协同演化作用的结果。东营凹陷成藏动力学过程及油气藏原始状态相对完整,基于古近系地层压力场、流体场、储集物性现今特征及其演化过程研究,建立了东营凹陷地层压力-流体-储集性协同演化模式,明确了其控藏作用。在构造活动、沉积作用的控制下,东营凹陷地层压力经历了“升高—降低—升高”的演化过程,成岩流体性质表现为“酸、碱交替”,沉积构造和成岩流体作用控制形成了不同成因类型的有效储层。在断陷盆地结构控制下,东营凹陷陡坡带发育“常压/弱超压—碱/酸—中/低孔(少量高孔)”协同演化模式,洼陷带发育“超压—酸性—中/低孔”协同演化模式,缓坡带发育“常压—弱碱/弱酸—中/高孔”协同演化模式。地层压力、流体和储集性的协同演化模式与断陷盆地结构、油气藏类型及属性的有序分布具有良好的成因对应性,控制了不同类型油气藏的差异富集。陡坡带深层高充满度的岩性气藏、凝析油气藏和洼陷带向陡坡带过渡部位的中—高充满度油藏是有利的预探方向,缓坡带油气运移路径上的岩性-构造油藏及地层油藏是有利的评价增储方向。地层压力、流体和储集性协同演化及其匹配成藏模式可作为断陷盆地油气成藏基本原理的有效补充,是研究油气藏分布有序性差异富集的基础和关键,对于深化陆相断陷盆地油气成藏机理、开展油藏分布规律研究和指导勘探实践具有重要意义。

**关键词:**古近系;地层压力;流体;储集性;协同演化;差异成藏;东营凹陷

中图分类号:TE122.2

文献标识码:A

## Co-evolution of formation pressure, fluid, and reservoir property under the control of basin structure and its controlling effect on reservoir accumulation: a case study of Paleogene in Dongying depression

Wang Yongshi<sup>1</sup> Hao Xuefeng<sup>2</sup> An Tianxia<sup>2</sup> Zhang Pengfei<sup>2</sup> Xiong Wei<sup>2</sup> Qin Feng<sup>2</sup>

(1. Sinopec Shengli Oilfield Company, Shandong Dongying 257001, China; 2. Research Institute of Exploration and Development, Sinopec Shengli Oilfield Company, Shandong Dongying 257015, China)

**Abstract:** Hydrocarbon accumulation is attributed to the formation pressure, fluid, reservoir property and their co-evolutionary effect. The dynamic reservoiring process and the original state of oil and gas reservoirs in Dongying depression are relatively complete. Based on investigating the current characteristics and evolution process of pressure field, fluid field and reservoir properties of Paleogene, the paper establishes the formation pressure-fluid-reservoir property co-evolutionary model of Dongying depression and makes clear its controlling effect on reservoir accumulation. Under the control of tectonic activity and sedimentation, the formation pressure in Dongying depression has undergone an evolutionary process of “rise-fall-rise”. The properties of diagenetic fluid are characterized by acid-alkali alternation. The effective reservoirs of different genetic types have been developed under the control of depositional fabric and diagenetic fluid action. Under the control of fault basin, the development of steep slope belt, depression belt, and gentle slope belt in Dongying depression demonstrate the co-evolutionary mode of “normal pressure/weak overpressure, alkali/acid, and medium/low porosity (less occurrence of high porosity)”, “overpressure, acid, and medium/low porosity”, and “normal pressure, weak alkali/acid, and medium-/high-porosity pores”, respectively. The co-evolutionary mode of formation pressure, fluid and reservoir property has a good correspondence with the structure of fault basin, types of oil and gas reservoirs and ordered distribution of properties in terms of genesis, and controls the differential enrichment of different types of oil and gas reservoirs. Lithologic gas

**基金项目:**国家科技重大专项(2016ZX05006、2016ZX05006-003)和中国石油化工股份有限公司科技攻关项目“济阳东部深层砂砾岩油气富集机制与勘探方向”(P21034-1)资助。

**第一作者:**王永诗,男,1964年6月生,2004年获中国矿业大学(北京)博士学位,现为中国石油化工集团有限公司高级专家、教授级高级工程师,主要从事石油地质研究与油气勘探管理工作。Email:wangysh623@sina.com

**通信作者:**安天下,男,1986年7月生,2008年获中国石油大学(华东)学士学位,现为中国石油化工股份有限公司胜利油田分公司勘探开发研究院油气勘探主任师、副研究员,主要从事石油天然气地质研究工作。Email:tianxia-041@163.com

reservoirs and condensate oil and gas reservoirs with high hydrocarbon-filling degree in the deep layer of steep slope belt, and reservoirs with medium-high hydrocarbon-filling degree in the transition area from depression belt to steep slope belt indicate a favorable pre-exploration direction; lithological structural and stratigraphic reservoirs on the hydrocarbon migration pathway in the gentle slope belt can provide a favorable direction for the evaluation of increasing reserves. The co-evolutionary mode of formation pressure, fluid and reservoir property and its corresponding accumulation mode are an effective supplement to the basic principles of oil and gas accumulation in fault basins, and both the basis for and the key to studying the ordered distribution and differential enrichment of oil and gas reservoirs, which take on significance in exploring the deep mechanism of oil and gas accumulation in continental fault basins, studying the distributions laws of reservoirs, and guiding exploration practice.

**Key words:** Paleogene; formation pressure; fluid; reservoir property; co-evolution; differential accumulation; Dongying depression

引用:王永诗,郝雪峰,安天下,张鹏飞,熊伟,秦峰.盆地结构控制下的地层压力-流体-储集性协同演化及控藏作用——以东营凹陷古近系为例[J].石油学报,2023,44(7):1058-1071,1150.

Cite:WANG Yongshi,HAO Xuefeng,AN Tianxia,ZHANG Pengfei,XIONG Wei,QIN Feng.Co-evolution of formation pressure, fluid, and reservoir property under the control of basin structure and its controlling effect on reservoir accumulation: a case study of Paleogene in Dongying depression[J].Acta Petrolei Sinica,2023,44(7):1058-1071,1150.

探索油气成藏机理、发现更多油气一直是石油地质学家的追求<sup>[1-4]</sup>。自1907年中国陆上第1口油井(延1井)成功钻探以来<sup>[5]</sup>,在110余年的勘探实践中,中国地质学家和勘探家不断发展和完善陆相油气成藏理论,提出了以“陆相生油理论”<sup>[6]</sup>、“源控论”<sup>[7]</sup>、“油气复式聚集理论”<sup>[8-10]</sup>、“隐蔽油藏勘探理论”<sup>[11-13]</sup>和“油气分布有序性”<sup>[14-16]</sup>等为代表的陆相断陷盆地油气成藏理论,指导中国油气勘探不断取得新发现<sup>[17-19]</sup>。

20世纪60年代末,中国学者提出了油气藏形成的6大要素——生、储、盖、圈、运、保,建立了成藏体系的认识<sup>[20]</sup>;20世纪90年代以来,陆相断陷盆地的含油气系统<sup>[21-22]</sup>、成藏动力学<sup>[23-27]</sup>、油气充注机理<sup>[28-32]</sup>等成为地质研究的热点;目前油气藏研究的重点逐渐由静态要素的刻画发展为动态成藏过程的恢复,由要素本身转到要素之间的协同演化。近年来,研究人员不断尝试从成藏要素动态匹配的角度去揭示油气成藏机理,但研究多集中在单类油藏或区带尺度。在盆地结构及其演化的控制下,选用哪些地质要素来表征“生、储、盖、圈、运、保”的内在联系,如何在“时间—空间”的角度实现这些要素的量化统一,如何揭示盆地尺度下油气有序分布、差异富集的内在机制等问题成为盆地油气成藏机理研究新的热点和难点。

东营凹陷是中国东部典型的断陷型含油气盆地<sup>[33]</sup>,自1961年华8井勘探发现以来,至今已经历了60余年的勘探开发历程<sup>[17]</sup>,截至2021年底,累计探明石油地质储量 $26 \times 10^8$  t,探明程度为55.8%。“十三五”(2015—2020年)国家科技重大专项资源评价结果显示<sup>[34]</sup>,东营凹陷常规油气剩余资源量为 $21 \times 10^8$  t,在勘探程度高的成熟层系和勘探程度较低的“三新”(新类型、新层系、盆缘小洼陷)领域仍有较大的勘探潜力<sup>[17,35-36]</sup>。东营凹陷古近纪构造活动以初始裂陷和断陷为主,新近纪构造活动以坳陷作用为主,在成藏期烃

源岩与圈闭的空间相对位置稳定;油气成藏具有多期、单向、连续充注的特点,油气运移路径和成藏动力具有继承性<sup>[16]</sup>,油藏的原始状态保存相对完整。基于东营凹陷长期的勘探实践和油气成藏规律研究,笔者认为含油气盆地的生、储、盖、圈、运、保等油气成藏要素的联系就是地层压力、流体、空间(储集性)及其相互作用和联系。以东营凹陷古近系为例,基于地层压力场、流体场、储集物性及其演化过程的系统研究,探索了断陷盆地压力-流体-储集性协同演化关系及其控藏作用,总结油气成藏与富集规律,建立断陷盆地油气分布及预测模式,以期对东营凹陷和地质背景类似的断陷盆地的油气勘探提供指导和参考。

## 1 区域地质概况

东营凹陷地处渤海湾盆地东南端的济阳坳陷内部<sup>[37]</sup>,是在太古界—古生界基底上发育的中生代—新生代箕状断陷—坳陷复合盆地,南接鲁西隆起和广饶凸起,北部为陈家庄凸起,西侧以青城低凸起为界与惠民凹陷相隔,东临垦东—青坨子凸起,面积约为 $5\,600$  km<sup>2</sup>,是济阳坳陷面积最大的次级凹陷,内部的牛庄、博兴、利津和民丰4个次级洼陷是主要生烃中心<sup>[38]</sup>。东营凹陷整体表现为北断南超、北陡南缓的半地堑结构<sup>[39]</sup>,古近系自北向南划分为陡坡带、洼陷带、缓坡带、凸起带等构造单元(图1、图2)。

东营凹陷新生代经历了初始裂陷期、断陷期、构造抬升期及坳陷期4期构造演化。在古构造、古物源、古气候的共同控制下,东营凹陷新生代地层发育较为齐全。古近系主要发育盐湖—咸水—半咸水—微咸水—淡水湖盆的陆源碎屑岩充填沉积[图1(b)],自下而上依次为孔店组、沙河街组、东营组。其中,孔店组自下而上划分为孔店组三段(孔三段)、孔店组二段(孔二段)和孔店组一段(孔一段),沙河街组划分为沙河街组

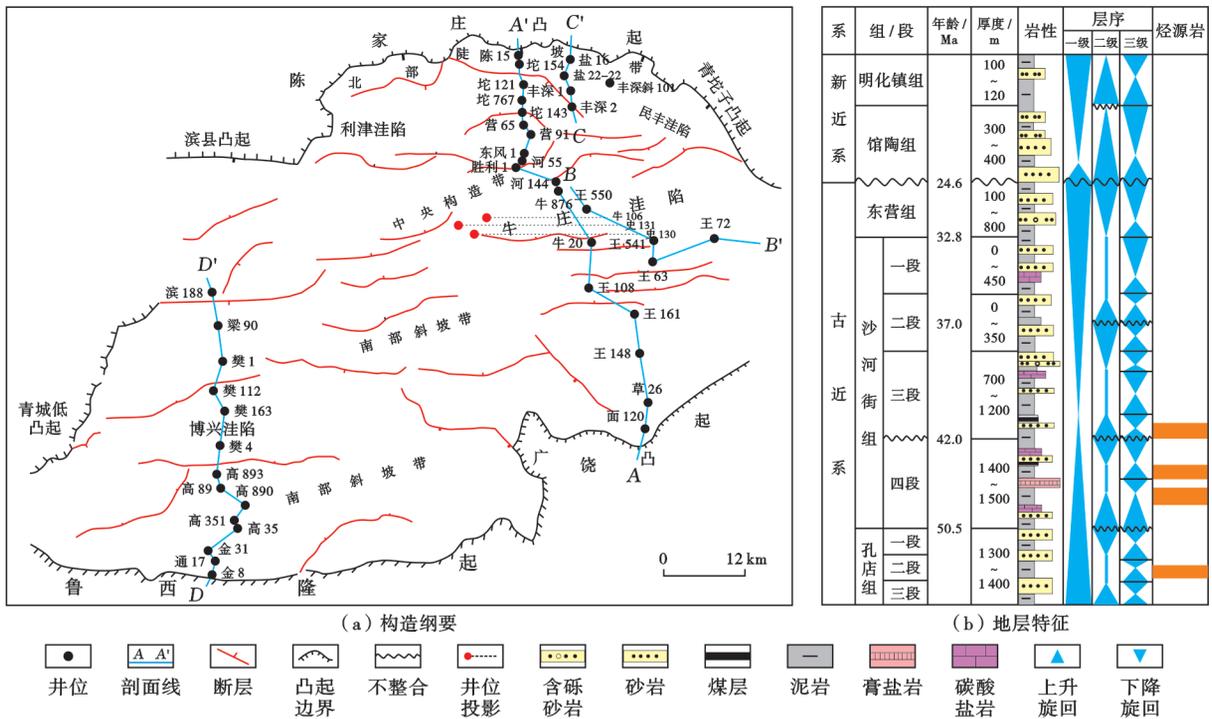
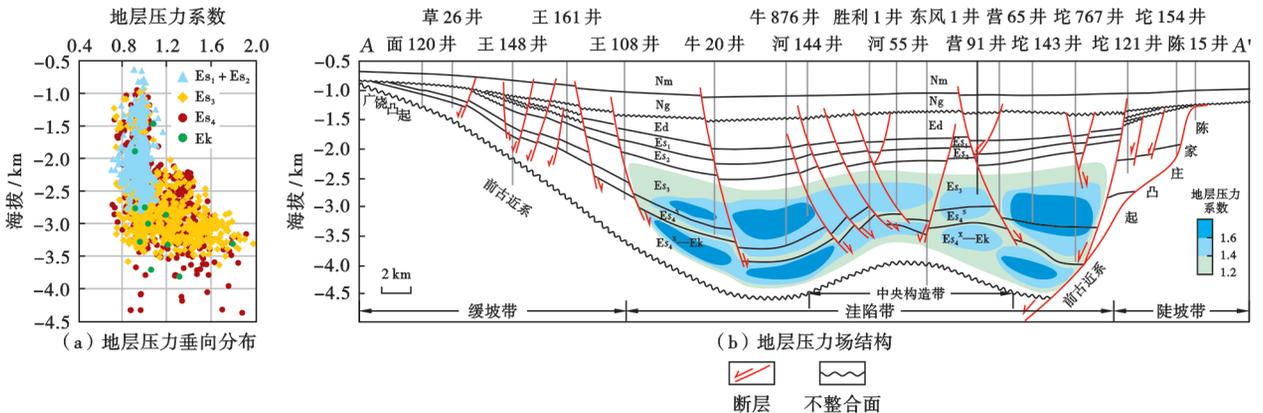


图1 东营凹陷构造位置、构造纲要与新生代地层特征

Fig. 1 Tectonic location, structure outline and Cenozoic stratigraphic characteristics of Dongying sag



注: Nm—明化镇组; Ng—馆陶组; Ed—东营组; Es<sub>1</sub>—沙一段; Es<sub>2</sub>—沙二段; Es<sub>3</sub>—沙三段; Es<sub>4</sub><sup>S</sup>—沙四段上亚段; Es<sub>4</sub><sup>X</sup>—沙四段下亚段; Es<sub>4</sub>—沙四段; Ek—孔店组。

图2 东营凹陷古近系现今地层压力场结构特征(剖面位置见图1)

Fig. 2 Structural characteristics of present formation pressure field of Paleogene in Dongying sag

四段(沙四段)、沙河街组三段(沙三段)、沙河街组二段(沙二段)和沙河街组一段(沙一段)。新近系主要发育馆陶组、明化镇组砂泥岩沉积。

## 2 地层压力、流体、储集性特征及演化

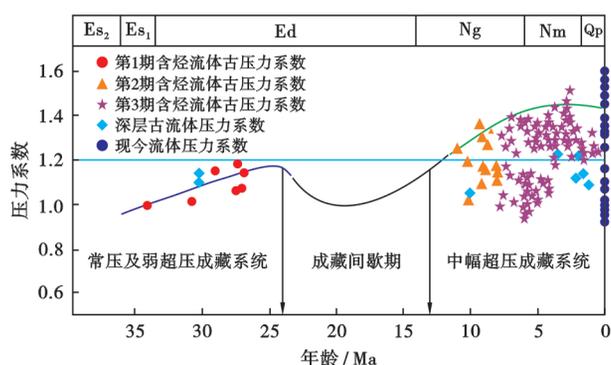
### 2.1 现今地层压力场特征及演化

地层超压是油气成藏的主要动力,受渤海湾盆地结构控制,盆地内各拗陷普遍发育生烃增压成因的超压场<sup>[40-41]</sup>。东营凹陷古近系烃源岩发育,自下而上依

次为孔二段盐湖—沼泽相泥岩、沙四段下亚段盐湖相泥岩、沙四段上亚段咸水湖相泥岩和沙三段下亚段半咸—微咸水湖相泥岩<sup>[33]</sup>[图1(b)]。其中,沙四段下亚段烃源岩干酪根类型以Ⅱ<sub>1</sub>型、Ⅱ<sub>2</sub>型为主,有效厚度为200~250m;沙四段上亚段烃源岩干酪根类型以Ⅰ型为主,有效厚度为150~250m;沙三段下亚段烃源岩干酪根类型以Ⅰ型和Ⅱ<sub>1</sub>型为主,有效厚度为200~300m。东营凹陷古近系4套烃源岩在热演化过程中不断发生流体膨胀作用,控制了地层流体压力的演化

和现今分布。

目前,地层压力系数 1.1 和 1.2 常用来分别作为划分常压与弱超压、弱超压与超压系统的界限值<sup>[27-28]</sup>。基于 300 余口钻井实测地层压力数据统计,东营凹陷古近系开始发育超压系统对应的深度约为 2200 m<sup>[42]</sup>,随着埋藏深度增加,地层压力系数逐渐增大,埋深 3500 m 对应地层压力系数可达 1.8[图 2(a)]。受凹陷内沙四段下亚段顶部盐膏层分隔作用的影响[图 1(b)],东营凹陷纵向上发育盐上沙三段中亚段—沙四段上亚段超压系统和盐下沙四段下亚段—孔店组超压系统[图 2(b)]。横向上,超压系统在牛庄、利津、民丰和博兴 4 个次级洼陷内部均有发育<sup>[43]</sup>,以控注断层作为边界。以流体包裹体测试结果和现今地层压力场为约束,开展盆地模拟分析地层压力场演化过程,结果表明,受盆地“沉降—抬升—沉降”构造演化的影响,东营凹陷古近系地层压力经历了升高、降低、升高 3 期演化。沙一段沉积开始至东营组沉积早—中期,伴随盆地沉降,古近系出现欠压实现象,烃源岩开始生烃,凹陷内开始大面积发育弱超压;东营组沉积晚期,受东营运动抬升影响,烃源岩生烃增压作用减弱,地层压力释放变为常压;东营运动以来,随着凹陷进一步沉降,烃源岩生烃作用逐渐增强,超压强度逐渐增加、超压范围逐渐增大,形成现今的压力场分布特征(图 3)。



注: Qp—第四系; Nm—明化镇组; Ng—馆陶组; Ed—东营组; Es<sub>1</sub>—沙一段; Es<sub>2</sub>—沙二段。

图 3 东营凹陷古近系地层压力演化过程

Fig. 3 Evolution process of Paleogene formation pressure in Dongying sag

## 2.2 现今流体场特征及演化

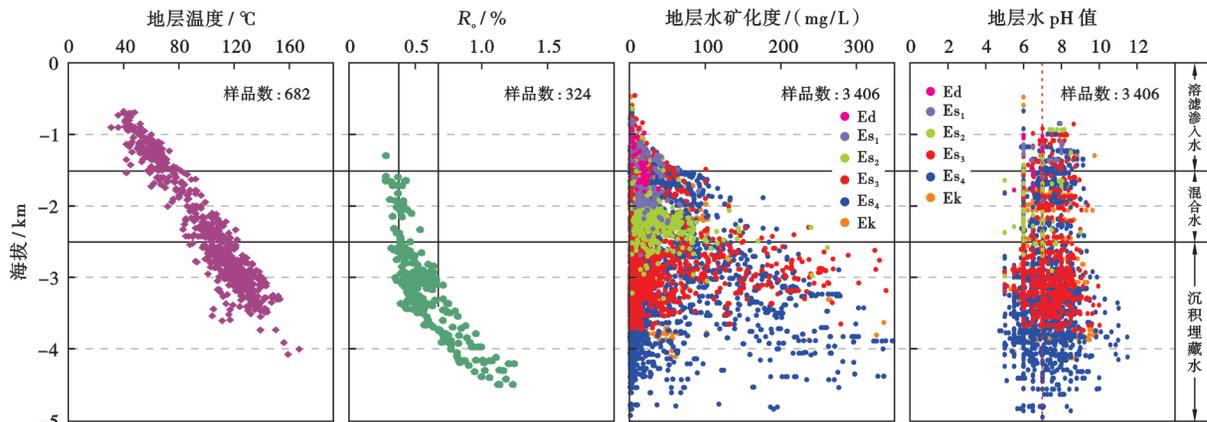
现今流体场是古地层流体被外源注入流体、深部热液、有机流体混入和复杂“水-岩”作用等因素综合影响的结果<sup>[44]</sup>。基于 3406 个样品点实测地层水的矿化度、酸碱度等水化学参数和 682 个地温数据、324 个烃源岩镜质体反射率( $R_o$ )数据,将东营凹陷现今古近系地层流体划分为 3 类:①溶滤渗入水,埋深在 0~1500 m,

矿化度为 0~100 mg/L,呈弱酸性或弱碱性;②混合水,由溶滤渗入水和深部沉积埋藏水混合形成,埋深在 1500~2500 m,矿化度为 100~200 mg/L,酸碱度略大于溶滤渗入水;③湖相沉积埋藏水,埋深大于 2500 m,矿化度普遍大于 200 mg/L,酸碱度较溶滤渗入水明显增加。平面上,地层水呈单一、渐变环状分布,由洼陷中心向盆缘,地层水由湖相沉积埋藏水过渡为混合水,再过渡为溶滤渗入水<sup>[45]</sup>(图 4)。

现今地层流体场特征可以反映盆地古成岩流体的分布及演化过程。研究认为,东营凹陷成岩流体经历了酸、碱交替变化过程,不同流体环境下岩石矿物发生的溶解及沉淀等作用决定了储层成岩序列和储集物性。断陷早期盐湖环境中形成的石膏在成岩过程中逐渐脱水转化为硬石膏,这是碱性流体的重要来源之一<sup>[46]</sup>(图 5)。当地温大于 50 °C 时,石膏即开始进入缓慢转化阶段;80~100 °C 时,石膏进入快速脱水阶段;100~140 °C 是石膏大规模脱碱性水阶段;地温超过 140 °C,石膏基本转化为硬石膏,不再生成碱性水<sup>[46]</sup>。在准同生期,碱性流体可导致沉积物发生早期碳酸盐胶结作用,抑制压实作用、保护原生孔隙,并为成岩后期的酸性溶蚀提供物质基础。断陷作用鼎盛期,沙四段下亚段、沙四段上亚段和沙三段下亚段的盐湖相、咸水—半咸水相烃源岩在热演化过程中生成有机酸、CO<sub>2</sub>,这是酸性流体的重要来源<sup>[47]</sup>(图 5)。当地温在 60~140 °C 时,烃源岩中干酪根发生降解,生成的羧酸进入地层后控制流体的酸度;地温在 80~120 °C 是有机酸最佳的保存阶段;当地温大于 120 °C 时,羧酸会逐渐转化为 CO<sub>2</sub><sup>[48]</sup>。基于膏岩成岩演化排碱和烃源岩生烃演化排酸的规律,以丰深 1 井为例,通过埋藏史分析,建立了储层在流体“酸、碱交替”控制下的成岩演化序列(图 5)。受盆地结构控制,不同构造带控制下的沉积体系之间或同一沉积体系内部不同相带的流体酸碱性质演化特征存在差异。东营凹陷盐家地区陡坡带近岸水下扇扇根亚相受边界控盆断层沟通的影响,成岩流体以碱性流体为主;扇中亚相早期受膏岩层生成的碱性流体影响明显,后期受烃源岩热演化生成的酸性流体影响,呈“酸、碱交替”的流体演化过程。

## 2.3 现今储集性特征及演化

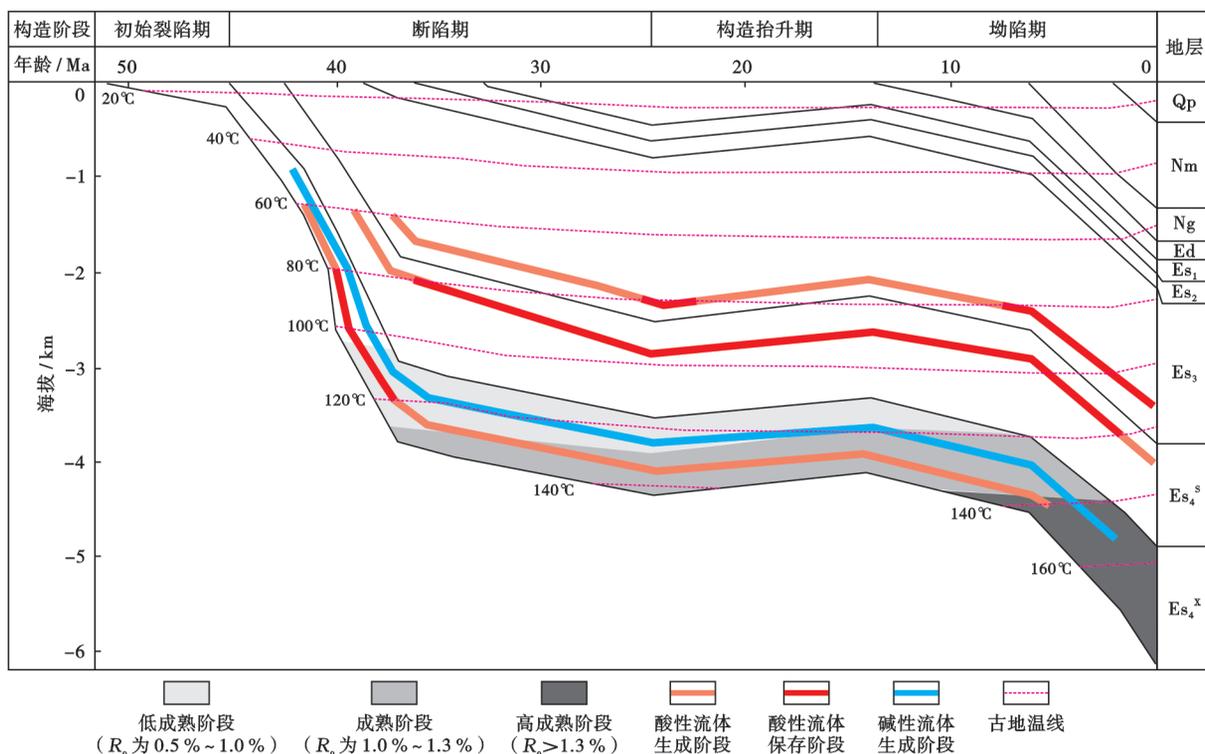
受古构造、古气候和古物源的共同控制,东营凹陷古近系主要发育 4 类有利油气储集体:陡坡带砂砾岩体、洼陷带三角洲—浊积砂体、缓坡带三角洲砂体和滩坝砂体<sup>[49-53]</sup>。岩石薄片鉴定和高压压汞测试分析结果表明,古近系不同类型储集体的储集空间及物性差异明显(表 1),其中,储集物性受控于沉积组构和成岩流体改造。



注:Ed—东营组;Es<sub>1</sub>—沙一段;Es<sub>2</sub>—沙二段;Es<sub>3</sub>—沙三段;Es<sub>4</sub>—沙四段;Ek—孔店组。

图4 东营凹陷古近系现今地层流体特征

Fig. 4 Current fluid characteristics of Paleogene in Dongying sag



注:Qp—第四系;Nm—明化镇组;Ng—馆陶组;Ed—东营组;Es<sub>1</sub>—沙一段;Es<sub>2</sub>—沙二段;Es<sub>3</sub>—沙三段;Es<sub>4</sub><sup>s</sup>—沙四段上亚段;Es<sub>4</sub><sup>x</sup>—沙四段下亚段。

图5 东营凹陷丰深1井古近系酸性流体和碱性流体演化

Fig. 5 Evolution of Paleogene acidic fluid and alkaline fluid of Well Fengshen 1 in Dongying sag

表1 东营凹陷古近系主要储集体储集物性

Table 1 Physical properties of main Paleogene reservoirs in Dongying sag

| 类型    | 发育区带 | 发育层位    | 孔隙度/%          | 孔隙类型        | 数据来源      |
|-------|------|---------|----------------|-------------|-----------|
| 砂砾岩   | 陡坡带  | 沙三段、沙四段 | 10.0~17.0/13.5 | 浅层以原生孔隙为主   | 文献[46,48] |
|       |      |         | 5.0~10.0/7.5   | 中—深层以次生孔隙为主 | 文献[46-48] |
| 浊积岩   | 洼陷带  | 沙三段、沙四段 | 8.0~25.0/16.5  | 原生孔隙、次生孔隙   | 文献[47-48] |
| 三角洲砂体 | 缓坡带  | 沙二段、沙三段 | 15.0~30.0/22.5 | 原生孔隙为主      | 文献[47-48] |
| 滩坝砂   | 缓坡带  | 沙四段上亚段  | 10.0~25.0/17.5 | 原生孔隙、次生孔隙   | 文献[46-47] |

注:“/”后为平均值。

在不同区带成岩流体演化过程分析的基础上,以不同类型储集体中能够聚集并产出工业油气流或产水的储层作为有效储层,选取典型岩心样品,基于岩石薄片观察,重新分析了储层成岩序列,利用反演回剥方法恢复了储集物性演化过程(图6)。认为陡坡带砂砾岩体经历了碱性和酸性成岩流体的交替作用,其中,扇根亚相储集物性持续变差,扇中亚相早期在碱性流体作用下形成的碳酸盐胶结可抑制压实、保护原生孔隙结构,并在后期酸性流体溶蚀作用下形成次生孔隙<sup>[47,54]</sup>。“酸、碱交替”控制了陡坡带砂砾岩有效储层的发育,垂向上,浅层有效储集空间以原生孔隙为主,孔隙度多在10%~17%;中—深层有效储集空间以次

生溶蚀孔隙为主,孔隙度可达5%~10%[表1、图6(a)]。洼陷带浊积砂体经历了早期弱碱性、后期持续酸性的成岩流体环境,砂体内部溶蚀孔隙发育,孔隙度多在8%~25%[表1、图6(b)],但距泥岩较近的砂岩“边部”胶结作用强烈<sup>[48]</sup>。缓坡带三角洲砂体经历了弱碱与弱酸成岩流体的交替作用,成岩作用强度相对较弱,有效储集空间以原生孔隙为主,孔隙度多在15%~30%[表1、图6(c)]。靠近盆缘部位的缓坡带滩坝砂体受成岩流体和压实作用改造强度均较弱,储集空间以原生孔隙为主;近洼陷部位的缓坡带滩坝砂体经历了较强的压实和胶结作用,储集空间以溶蚀成因的次生孔隙为主,孔隙度多在10%~25%(表1)。

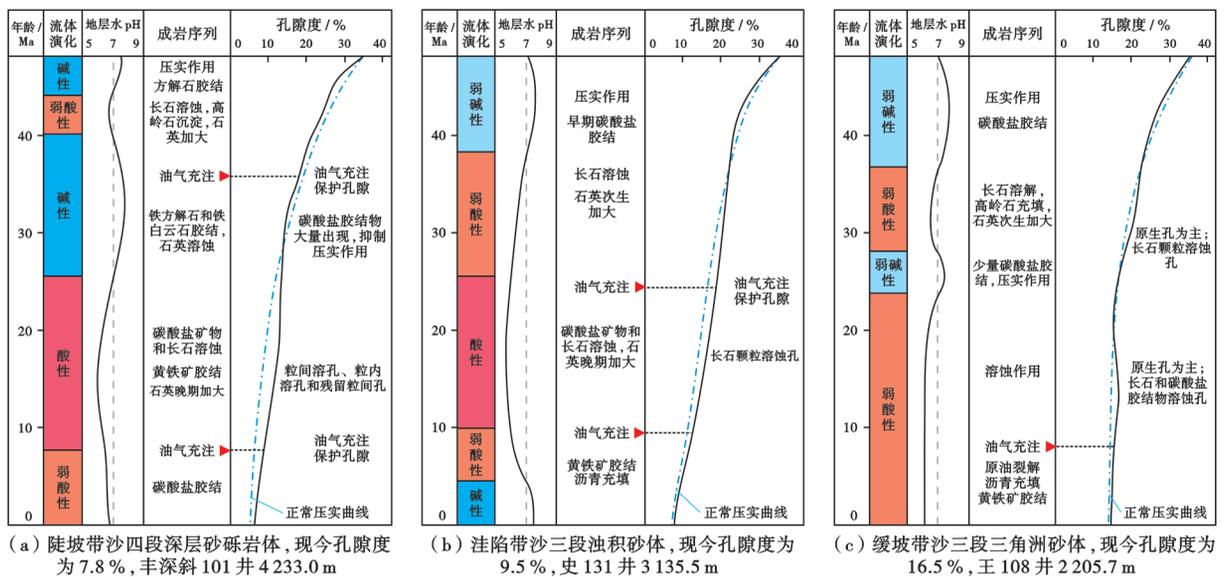


图6 东营凹陷古近系优质储层的成因模式

Fig. 6 Genetic model of high quality Paleogene reservoirs in Dongying sag

### 3 地层压力-流体-储集性协同演化

油气成藏的本质是盆地构造变动、沉积充填过程中,在地层超压、浮力等不同驱动力背景下,储层在不同性质流体作用下进行成岩演化和物性演化,含烃流体在不同类型储集空间运移、聚集和赋存的过程,是地层压力、流体、储集性及其协同演化作用的结果。

#### 3.1 地层压力-流体-储集性的归一化表征

在地质研究中,地质要素或地质作用的不同表征参数往往具有不同的量纲和单位,为消除各类要素和参数之间量纲差异的影响,实现数据之间的可对比,需要进行数据归一化处理,使各指标处于同一数量级<sup>[55]</sup>。离差标准化(min-max normalization)是较常用的归一化方法,通过对原始数据线性处理消除单位的影响,使结果值映射到0~1之间<sup>[55-57]</sup>。

东营凹陷古近系各类地质参数资料丰富,能够满

足归一化处理对样品数据数量的要求。选取古近系实钻探井的地层压力测试数据、地层水pH值测试数据和岩心孔隙度数据进行数值归一化处理。

$$C_{p*} = (C_p - C_{p_{\min}}) / (C_{p_{\max}} - C_{p_{\min}}) \quad (1)$$

$$p_{H*} = (p_H - p_{H_{\min}}) / (p_{H_{\max}} - p_{H_{\min}}) \quad (2)$$

$$\phi_* = (\phi - \phi_{\min}) / (\phi_{\max} - \phi_{\min}) \quad (3)$$

#### 3.2 地层压力-流体-储集性协同演化模式

在断陷盆地构造演化控制下,地层压力、流体性质和储集物性协同演化:伴随膏岩的脱水和不同层系烃源岩的生烃作用,断陷初期发育的盐湖、咸化湖沉积和断陷鼎盛期发育的淡水湖沉积的地层压力、流体性质(酸碱度、水型、离子浓度)等发生多幕有序演化,不同性质流体作用控制了不同类型有效储层的发育(图7)。在超压驱动下,油气从烃源岩排出后与地层流体混合并运移,最终在有效储层中聚集成藏。

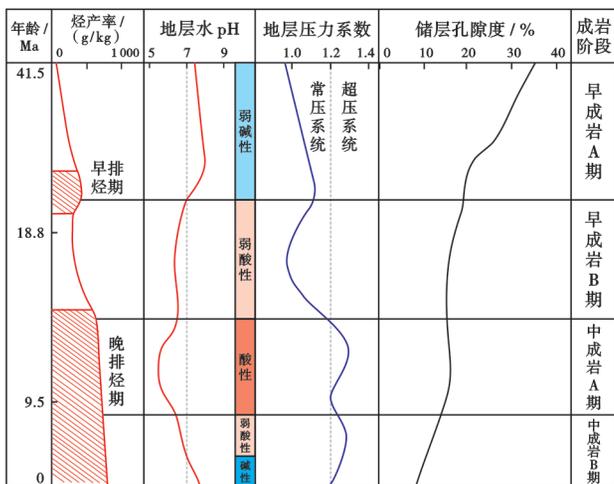


图7 东营凹陷沙三段中亚段浊积岩油藏地层压力-流体-储集性协同演化过程

Fig. 7 Co-evolution process of pressure, fluid and reservoir property of turbidite reservoir of middle submember of Member 3 of Shahejie Formation in Dongying sag

综合东营凹陷的盆地结构和不同构造带的现今地层压力、流体性质、储集性的归一化结果及其协同演化与匹配关系,选取18口井,采用地质要素归一化方法,建立了不同构造带的“地层压力-流体-储集性”协同演化模式(图8)。其中,陡坡带发育“常压/弱超压—碱/酸—中/低孔(少量高孔)”协同演化模式,洼陷带发育“超压—酸性—中/低孔”协同演化模式,缓坡带发育“常压—弱碱/弱酸—中/高孔”协同演化模式。断陷盆地不同构造带的协同演化模式与油气充满度具良好对应关系(图8)。对比地层压力、流体性质、储集物性的归一化结果和盆地结构、油气分布特征可以看出,盆地结构(陡坡、洼陷、斜坡和控带断裂)不仅控制了断陷盆地沉积体系类型及分布,也控制了地层压力、流体性质与储集物性及其匹配模式在盆地中的位置变化[如图8(b)中的A1点和B1点],证明了地层压力-流体-储集性协同演化机理的客观性。

## 4 地层压力-流体-储集性协同演化模式的控藏作用

### 4.1 协同演化模式控制油气有序分布

断陷盆地油气分布的有序性是指在盆地构造格局及沉积充填控制下,圈闭类型、输导体系、储集条件、源-储配置等油气成藏要素有序发育,决定了不同构造带不同类型油藏的分布[图8(a)]。前人通过解剖已发现的油气藏,从盆地尺度提出了断陷盆地油气藏的有序分布模式<sup>[15-16]</sup>。

地层压力、流体和储集性的协同演化模式控制了

断陷盆地内油气藏的有序分布。陡坡带“常压/弱超压—碱/酸—中/低孔(少量高孔)”协同演化模式控制了砂砾岩岩性油气藏、构造油藏和地层类油藏的发育;洼陷带“超压—酸性—中/低孔”协同演化模式控制了浊积岩岩性类油藏的发育;缓坡带“常压—弱碱/弱酸—中/高孔”协同演化模式控制了三角洲/滩坝砂岩岩性-构造、构造和地层类油藏的发育。盆地尺度上,在断陷盆地结构控制下,地层压力-流体-储集性协同演化模式与不同油气藏类型的空间分界位置一致[图8(a)、图8(b)],与各类油气藏特征也具有良好的对应关系。洼陷带浊积岩油藏的含油饱和度、排驱压力、中值压力和充满度相对最高,向陡坡带、缓坡带方向,油藏含油饱和度等参数均有序减小<sup>[15]</sup>[图8(c)]。

### 4.2 协同演化模式控制油气的差异富集

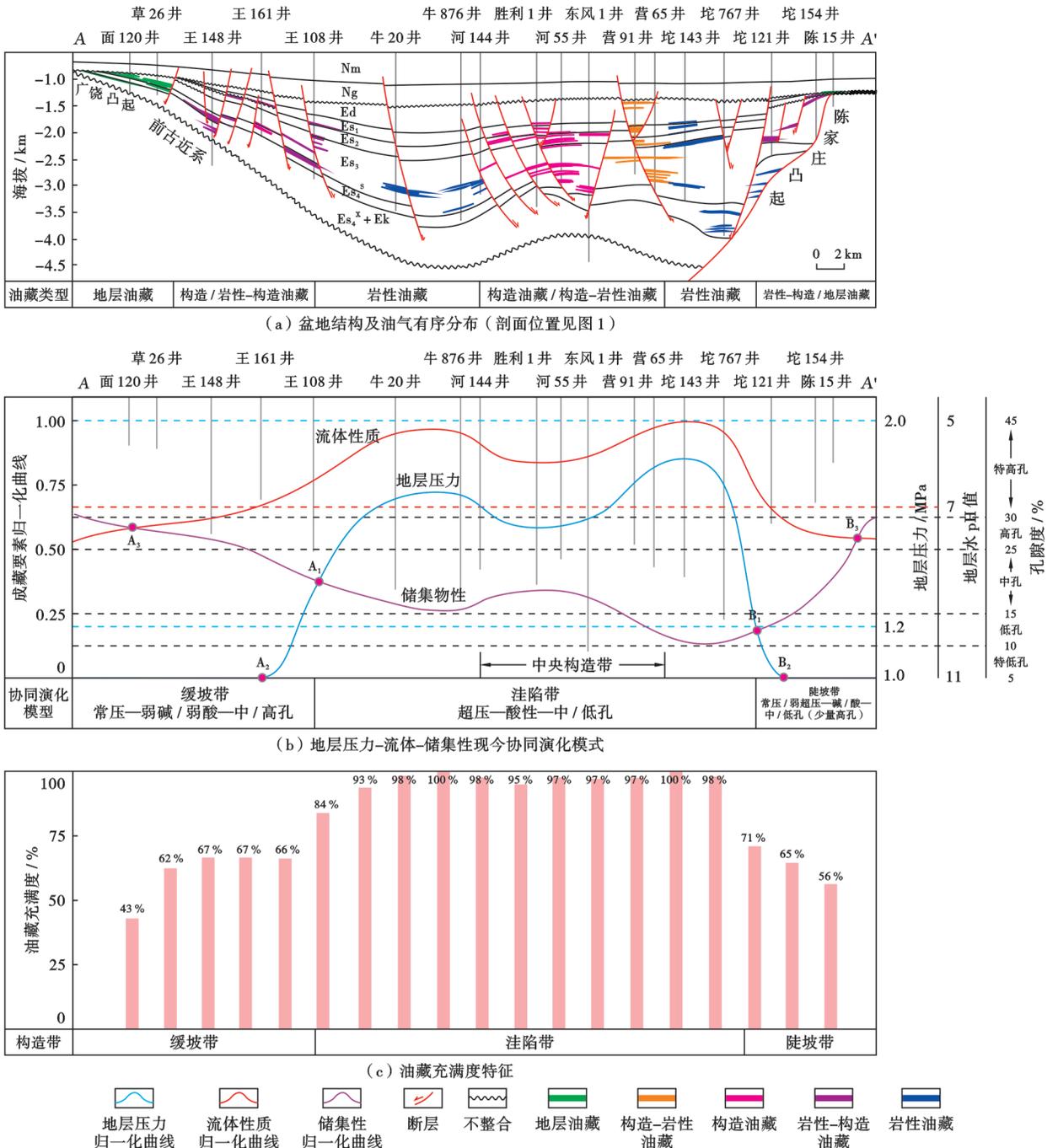
断陷盆地不同构造带地层压力-流体-储集性的协同演化模式控制油气藏类型及其属性有序分布,也表明了其对不同构造带内不同类型油藏的差异富集具有控制作用。

#### 4.2.1 陡坡带砂砾岩油气藏

东营凹陷北部陡坡带发育一系列近岸水下扇和扇三角洲砂砾岩体<sup>[47,49]</sup>,其构造位置邻近洼陷带优质烃源岩,油气成藏条件优越,是重要的勘探对象。陡坡带砂砾岩由深部向浅部依次发育高充满度油气藏和凝析气藏、中等充满度油藏、低充满度油藏[图8(a)、图9]。陡坡带砂砾岩发育“常压/弱超压—碱/酸—中/低孔(少量高孔)”协同演化模式[图8(b)],其中,深部超压充注与酸、碱流体两期交替匹配,控制了高充满度气藏及凝析油气藏的形成;中—浅部常压-浮力充注与高孔隙度储层匹配,控制了低充满度油藏的形成。以丰深1井为例,该井沙四段下亚段砂砾岩油藏经历2期油气充注:第1期距今约36 Ma,沙四段下亚段烃源岩成熟供烃,充注压力最大时地层压力系数达1.25,储层孔隙度约为20%;第2期充注时,地层压力系数增大至约1.30,储层孔隙度约为12%(图9)。相较而言,盐16井钻遇的浅层沙四段下亚段砂砾岩油藏的原油来自沙三段下亚段烃源岩,仅观测到1期流体包裹体,测压结果显示其形成于常压地层背景。因此,油气充注动力和酸、碱交替的流体环境与有效储层的协同匹配控制了陡坡带不同充满度油气藏的差异分布。

#### 4.2.2 洼陷带浊积岩油藏

洼陷带浊积岩夹在烃源岩层系内部,具有优越的成藏条件。恢复油气成藏期浊积岩储层的古地层压力和古孔隙度演化过程,对比不同充满度油藏的压力、流体和储集物性协同演化过程可以发现,“超压—酸性—中/低孔”协同演化模式控制了洼陷带油藏的差异富



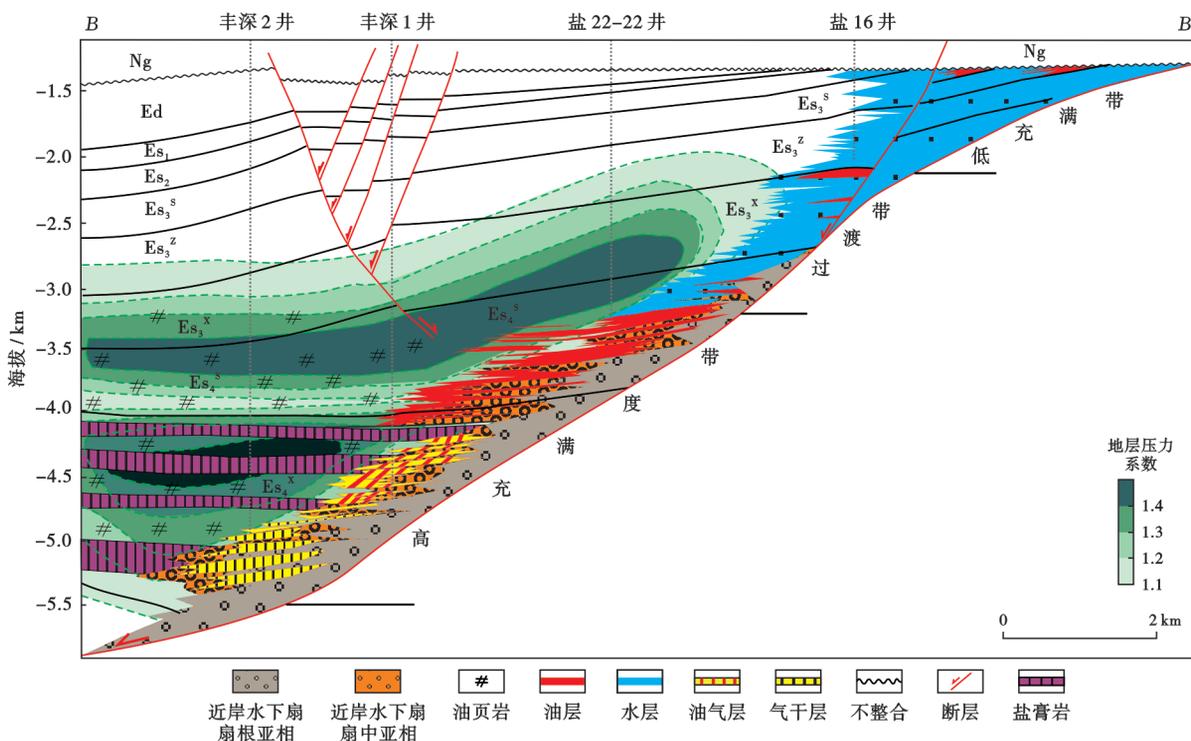
注: Nm—明化镇组; Ng—馆陶组; Ed—东营组; Es<sub>1</sub>—沙一段; Es<sub>2</sub>—沙二段; Es<sub>3</sub>—沙三段; Es<sub>4</sub><sup>S</sup>—沙四段上亚段; Es<sub>4</sub><sup>X</sup>—沙四段下亚段; Ek—孔店组; A<sub>2</sub>—盆地缓坡带向盆缘过渡的第二坡折断层发育位置; B<sub>2</sub>—盆地陡坡带向盆缘过渡的第二坡折断层发育位置; A<sub>3</sub>—盆地缓坡带与盆缘凸起的分界位置; B<sub>3</sub>—盆地陡坡带与盆缘凸起的分界位置。

图 8 东营凹陷古近系地层压力-流体-储集性现今协同演化模式与盆地结构、油气有序分布对应关系

Fig. 8 Corresponding relationship between current co-evolution model of Paleogene pressure-fluid-reservoir property and basin structure and orderly distribution of oil and gas in Dongying sag

集[图 8(b)]。其中,注陷中心发育高充满度油藏,地层压力高,油气充注动力强且充注时间早。以牛 106 井浊积岩油藏为例,该井共识别出两期油气充注,第 1 期距今 24.0 Ma,充注压力系数达 1.62,储层物性好,孔隙度约为 21%;第 2 期充注距今 9.5~1.5 Ma,充注

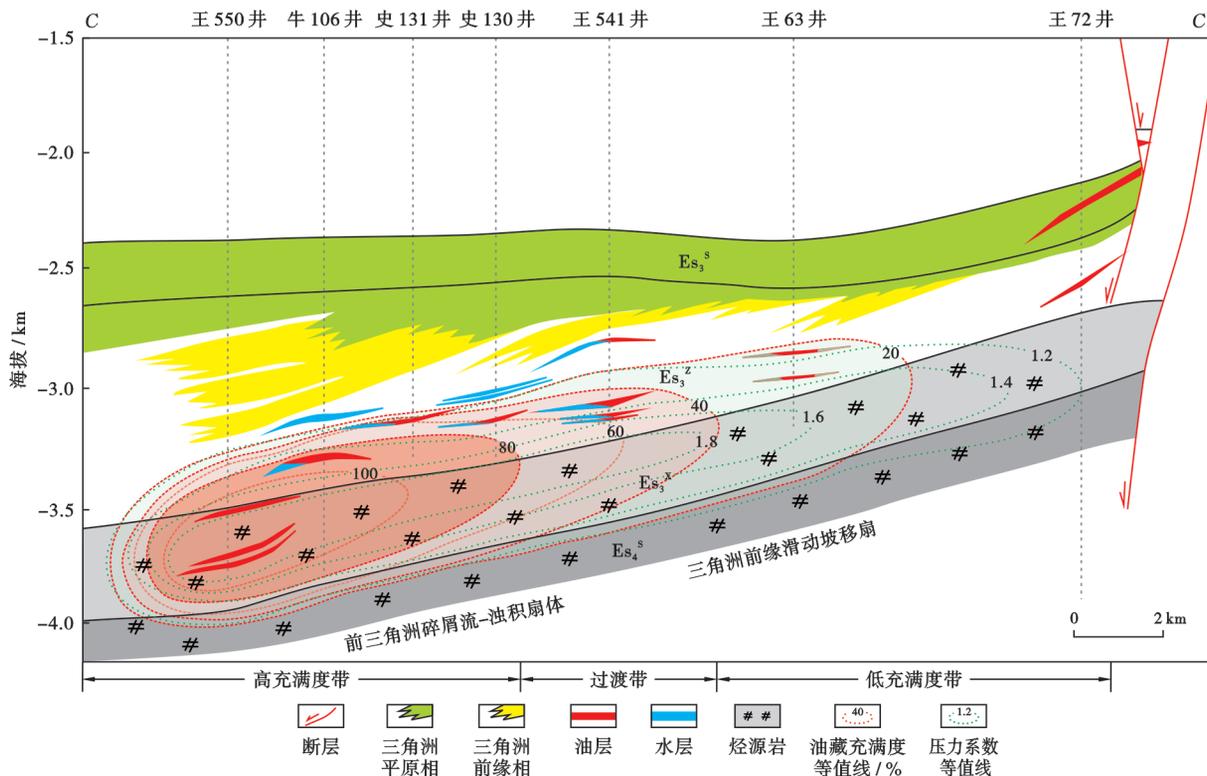
压力系数达 1.71,孔隙度约为 13%,两期油气充注控制油藏充满度可达 80%~100%(图 10)。注陷边部为中、低充满度油藏,地层压力较低。以王 63 井(图 10)浊积岩油藏为例,距今约 24 Ma,该区古近系地层压力系数约为 1.30,该时期未发生油气充注;距今 6 Ma,该



注: Nm—明化镇组; Ng—馆陶组; Ed—东营组; Es<sub>1</sub>—沙一段; Es<sub>2</sub>—沙二段; Es<sub>3</sub><sup>s</sup>—沙三段上亚段; Es<sub>3</sub><sup>z</sup>—沙三段中亚段; Es<sub>3</sub><sup>x</sup>—沙三段下亚段; Es<sub>4</sub><sup>s</sup>—沙四段上亚段; Es<sub>4</sub><sup>x</sup>—沙四段下亚段。

图9 东营凹陷盐家地区陡坡带砂砾岩体不同充满意度油气藏差异富集特征(剖面位置见图1)

Fig. 9 Differential enrichment characteristics of glutenite reservoirs with different filling degrees in the steep slope zone of Yanjia area, Dongying sag



注: Es<sub>3</sub><sup>s</sup>—沙三段上亚段; Es<sub>3</sub><sup>z</sup>—沙三段中亚段; Es<sub>3</sub><sup>x</sup>—沙三段下亚段; Es<sub>4</sub><sup>s</sup>—沙四段上亚段。

图10 东营凹陷牛庄洼陷带沙三段中亚段一下亚段浊积岩不同充满意度油藏差异富集特征(剖面位置见图1)

Fig. 10 Differential enrichment characteristics of turbidite reservoirs with different filling degrees of the middle and lower submembers of Member 3 of Shahejie Formation in Niuzhuang subsag, Dongying sag

区古近系地层压力达到 1.48,孔隙度约为 16%,发生单期油气充注,油藏充满度仅为 20%~40%<sup>[58]</sup>。因此,洼陷带不同部位的浊积岩油藏受控于超压期次及大小、酸性流体与有效储层的协同匹配,形成了现今不同充满度岩性油藏的差异富集特征。

#### 4.2.3 缓坡带构造油藏和地层类油藏

缓坡带主要发育沙四段上亚段滩坝砂和沙三段一沙二段大型三角洲沉积<sup>[50-51]</sup>。在地质演化过程中,缓坡带长期以常压系统为主(图 11),浮力是油气充注的主要动力。受益缘外部流体注入和洼陷带内部流体的影响,缓坡带成岩流体呈弱酸与弱碱交替演化;储层埋藏浅,受成岩流体影响小,储集物性整体较好。对比不同充满度的油藏可以发现,缓坡带相对高充满度的岩性-构造类油藏往往发育在油源断层、正向构造等形成的油气优势运移路径上(图 11、图 12),具有圈闭闭合高度大、以浮力为主的充注动力强<sup>[59]</sup>、储集物性好等特征,油藏较为富集;低充满度的构造油藏、地层油藏发育在远源的油气运移路径上,储集物性变差,圈闭幅度变小,以浮力为主的油气充注动力弱,导致油藏充满度低。因此,在缓坡带油气优

势运移路径上,充注动力(浮力)的大小与储集物性的协同演化控制了不同类型油藏的差异富集。

#### 4.3 协同演化模式指导下的勘探实践

东营凹陷地层压力、流体与储集物性的协同演化模式及其对油气差异富集规律的控制作用,决定了不同区带的勘探评价思路。按照地层压力、流体与储集物性的匹配原则,以断陷盆地结构控制下的协同演化模式确定有利区带及主要油气藏类型,以区带油气成藏模式确定油气藏主控因素及勘探靶区,进一步基于主控因素剖析和储集物性分析部署井位。随着勘探程度的不断提高,断陷盆地陡坡带的勘探重点转向深层砂砾岩高充满度气藏及凝析油气藏<sup>[60]</sup>,在扇中亚相砂砾岩体精细刻画的基础上,评价受超压、油气充注和流体演化控制的有效储层,优选超压背景下的有利相带。基于该思路部署钻探的丰深斜 101 井、丰深斜 11 井等井相继获得成功,其中,丰深斜 11 井在 4 309.5~4 467.0 m 段进行组合缝网压裂,试油获得高产油气流,8 mm 油嘴产油量为 81.7 t/d、产气量为 42 854 m<sup>3</sup>/d,发现了深层凝析油气藏规模储量阵地。

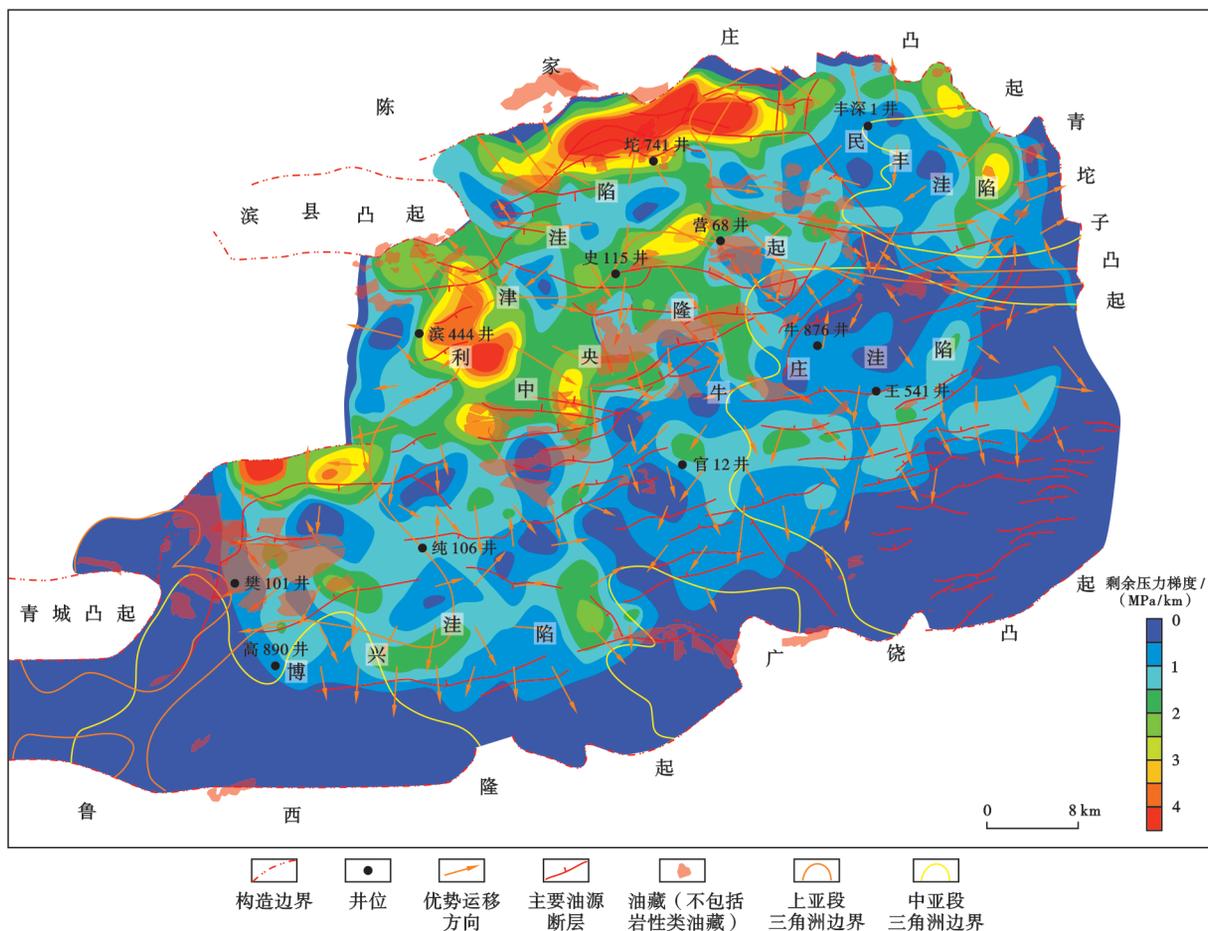
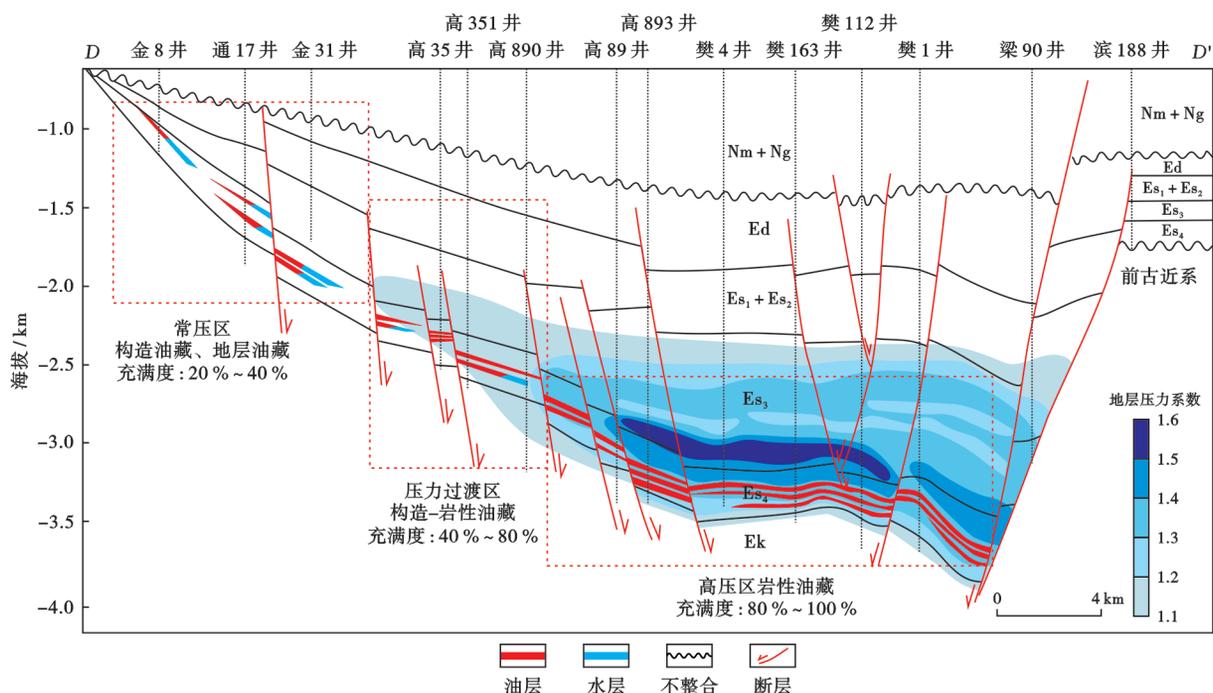


图 11 东营凹陷沙三段三角洲沉积体系与地层压力梯度、优势运移路径、油源断层及油藏分布

Fig. 11 Distribution of delta system, pressure gradient, dominant migration path, oil source fracture and reservoir of Member 3 of Shahejie Formation in Dongying sag



注: Nm—明化镇组; Ng—馆陶组; Ed—东营组; Es<sub>1</sub>—沙一段; Es<sub>2</sub>—沙二段; Es<sub>3</sub>—沙三段; Es<sub>4</sub>—沙四段; Ek—孔店组。

图 12 东营凹陷博兴地区缓坡带沙四段上亚段滩坝砂不同充满度油藏差异富集特征(剖面位置见图 1)

Fig. 12 Differential enrichment characteristics of beach bar sand reservoirs with different filling degrees of upper submember of Member 4 of Shahejie Formation in the gentle slope zone of Boxing area, Dongying sag

断陷盆地洼陷带勘探重点转向深层高充满度岩性油藏和洼陷带与陡坡带过渡区中等充满度的构造-岩性油藏,通过分析深层超压、流体和储集物性演化过程,在滑塌浊积扇、砂质碎屑流等不同砂体类型精细刻画的基础上<sup>[50,52]</sup>,优选超压背景下的有利岩性体。基于该思路相继部署钻探的营 104、史平 147 等井均取得成功,最高产油量达 44.1 t/d,不断扩大了东营凹陷洼陷带浊积岩岩性油藏的含油面积。

断陷盆地缓坡带的勘探重点转向较深层的滩坝砂岩油藏和较浅层的岩性-构造油藏、地层油藏,在圈闭精细刻画基础上,以油气藏有序分布为指导,分析超压、流体及储集物性的演化过程,叠合评价有利的构造背景和物性较好的储层,优选较深层具超压环境的滩坝砂岩和较浅层的岩性-构造、地层圈闭。基于该思路部署钻探的樊斜 42、草斜 336 等井相继钻探成功,实现了含油连片。2015—2020 年,以盆地地层压力-流体-储集性协同演化模式及其对油气差异成藏的控制机理为指导,以高精度储层地球物理预测技术为支撑,在东营凹陷古近系新增油气地质储量  $2.2 \times 10^8$  t,实现了勘探重点有序转移和规模效益增储。

## 5 结论

(1) 盆地结构及其演化过程和古沉积环境共同控

制了东营凹陷古近系沉积充填序列及成藏要素的演化规律。古近系地层压力受控于生烃增压作用,经历了“升高—降低—升高”的演化过程;断陷早期咸化湖盆碱性水体、膏岩层热演化排碱与烃源岩热演化排酸相互叠加,控制了不同构造带“酸、碱交替”的成岩流体差异演化;不同构造带的砂砾岩沉积在不同类型成岩流体作用下,形成不同成因类型的有效储层。

(2) 东营凹陷陡坡带发育“常压/弱超压—碱/酸—中/低孔(少量高孔)”协同演化模式,洼陷带发育“超压—酸性—中/低孔”协同演化模式,缓坡带发育“常压—弱碱/弱酸—中/高孔”协同演化模式。地层压力-流体-储集性协同演化模式与东营凹陷的断陷结构具有良好的成因对应性,控制了不同类型圈闭中油气的有序分布和差异富集。

(3) 东营凹陷陡坡带砂砾岩由深部向浅部依次发育高充满度油气藏和凝析气藏、中等充满度油藏、低充满度油藏,油气富集受控于油气充注动力和酸、碱交替的流体环境与有效储层的协同匹配。洼陷带中心发育高充满度浊积岩油藏,边部发育中、低充满度浊积岩油藏,油气富集受控于超压期次及大小、酸性流体与有效储层的协同匹配。缓坡带发育构造油藏和地层类油藏,油气富集受控于优势运移路径上的充注动力(浮力)与圈闭储集物性的协同匹配。

(4) 依据地层压力、流体与储集性的协同演化模式及其对油气差异富集规律的控制作用,认为东营凹陷陡坡带深层高充满度岩性气藏、凝析油气藏和洼陷带向陡坡带过渡部位的中—高充满度油藏是有利的预探方向,缓坡带油气运移路径上的岩性-构造油藏和地层油藏是有利的评价增储方向。

**符号注释:**  $C_{p\_max}$ —地层压力系数样本最大值;  $C_{p\_min}$ —地层压力系数样本最小值,  $C_p$ —地层压力系数;  $C_{p*}$ —地层压力系数归一化结果;  $p_{H\_max}$ —地层水样品的最大 pH 值,  $p_{H\_min}$ —地层水样本的最小 pH 值;  $p_H$ —地层水 pH 值;  $p_{H*}$ —地层水 pH 值归一化结果;  $\phi_{max}$ —储层孔隙度样本的最大值;  $\phi_{min}$ —储层孔隙度样本的最小值;  $\phi$ —储层孔隙度;  $\phi^*$ —储层孔隙度归一化结果。

### 参 考 文 献

- [1] SURDAM R C. Seals, Traps, and the petroleum system[M]. AAPG Memoir, 1997, 67: 31-48, 57-84.
- [2] 贾承造, 邹才能, 杨智, 等. 陆相油气地质理论在中国中西部盆地的重大进展[J]. 石油勘探与开发, 2018, 45(4): 546-560. JIA Chengzao, ZOU Caineng, YANG Zhi, et al. Significant progress of continental petroleum geology theory in basins of central and western China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2018, 45(4): 546-560.
- [3] 孙龙德, 邹才能, 朱如凯, 等. 中国深层油气形成、分布与潜力分析[J]. 石油勘探与开发, 2013, 40(6): 641-649. SUN Longde, ZOU Caineng, ZHU Rukai, et al. Formation, distribution and potential of deep hydrocarbon resources in China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2013, 40(6): 641-649.
- [4] 胡朝元. 生油区控制油气田分布——中国东部陆相盆地进行区域勘探的有效理论[J]. 石油学报, 1982(2): 9-13. HU Chaoyuan. Source bed controls hydrocarbon habitat in continental basins, East China[J]. Acta Petrolei Sinica, 1982(2): 9-13.
- [5] 何登发, 李德生, 童晓光, 等. 中国沉积盆地油气立体综合勘探论[J]. 石油与天然气地质, 2021, 42(2): 265-284. HE Dengfa, LI Desheng, TONG Xiaoguang, et al. Integrated 3D hydrocarbon exploration in sedimentary basins of China[J]. Oil & Gas Geology, 2021, 42(2): 265-284.
- [6] 黄第藩, 李晋超, 周翥虹, 等. 陆相有机质演化和成烃机理[M]. 北京: 石油工业出版社, 1984. HUANG Difan, LI Jinchao, ZHOU Zhuhong, et al. Evolution and mechanism of hydrocarbon generation of terrestrial organic matter[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1984.
- [7] 胡朝元. “源控论”适用范围量化分析[J]. 天然气工业, 2005, 25(10): 25-27. HU Chaoyuan. Research on the appliance extent of “source control theory” by semi-quantitative statistics characteristics of oil and gas migration distance[J]. Natural Gas Industry, 2005, 25(10): 25-27.
- [8] 胡见义, 徐树宝, 童晓光. 渤海湾盆地复式油气聚集区(带)的形成和分布[J]. 石油勘探与开发, 1986, 13(1): 1-8. HU Jianyi, XU Shubao, TONG Xiaoguang. Formation and distribution of complex petroleum accumulation zones in Bohaiwan Basin[J]. Petroleum Exploration and Development, 1986, 13(1): 1-8.
- [9] 陈景达. 渤海湾盆地的复式油气聚集带——以辽河西部、廊固和东濮三个凹陷为例[J]. 石油大学学报, 1988, 12(3): 41-51. CHEN Jingda. Multiple oil-gas accumulation zones in Bohai Bay Basin[J]. Journal of the University of Petroleum, China, 1988, 12(3): 41-51.
- [10] 田在艺, 史卜庆, 罗平, 等. 渤海湾盆地复式油气聚集带高勘探程度区进一步挖潜的领域[J]. 石油学报, 2002, 23(3): 2-5. TIAN Zaiyi, SHI Buqing, LUO Ping, et al. Future potential exploration domains in composite oil-gas accumulation zones of Bohai Bay Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2002, 23(3): 2-5.
- [11] 袁选俊, 譙汉生. 渤海湾盆地富油气凹陷隐蔽油气藏勘探[J]. 石油与天然气地质, 2002, 23(2): 130-133. YUAN Xuanjun, QIAO Hansheng. Exploration of subtle reservoir in prolific depression of Bohai Bay Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2002, 23(2): 130-133.
- [12] 李丕龙, 张善文, 宋国奇, 等. 断陷盆地隐蔽油气藏形成机制——以渤海湾盆地济阳拗陷为例[J]. 石油实验地质, 2004, 26(1): 3-10. LI Pilog, ZHANG Shanwen, SONG Guoqi, et al. Forming mechanism of subtle oil pools in fault basins-taking the Jiyang depression of the Bohaiwan Basin as an example[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2004, 26(1): 3-10.
- [13] 张善文. 济阳拗陷第三系隐蔽油气藏勘探理论与实践[J]. 石油与天然气地质, 2006, 27(6): 731-740. ZHANG Shanwen. Exploration theory and practice of the Tertiary subtle reservoirs in Jiyang depression[J]. Oil & Gas Geology, 2006, 27(6): 731-740.
- [14] 翟光明, 王建君. 论油气分布的有序性[J]. 石油学报, 2000, 21(1): 1-9. ZHAI Guangming, WANG Jianjun. Petroleum exploration the regularity of oil deposits' distribution[J]. Acta Petrolei Sinica, 2000, 21(1): 1-9.
- [15] 郝雪峰, 尹丽娟, 林璐. 济阳拗陷油藏类型及属性分布有序性[J]. 油气地质与采收率, 2016, 23(1): 8-13. HAO Xuefeng, YIN Lijuan, LIN Lu. Ordered distribution of reservoir type and its attributes in Jiyang depression[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2016, 23(1): 8-13.
- [16] 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——以渤海湾盆地济阳拗陷东营凹陷为例[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.
- [17] 王永诗. 济阳拗陷不同领域油气勘探思路与方向[J]. 油气地质与采收率, 2021, 28(5): 1-12. WANG Yongshi. Ideas and directions for oil and gas exploration in different fields of Jiyang depression, Bohai Bay Basin, China[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2021, 28(5): 1-12.
- [18] 胡朝元. 对松辽盆地油气藏形成和分布规律的初步认识[J]. 大庆石油地质与开发, 1989, 8(2): 1-17. HU Chaoyuan. A preliminary knowledge of hydrocarbon accu-

- mulation & its distributional regularity in Song Liao Basin[J]. *Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing*, 1989, 8(2): 1-17.
- [19] 赵文智, 胡素云, 郭绪杰, 等. 油气勘探新理念及其在准噶尔盆地的实践成效[J]. *石油勘探与开发*, 2019, 46(5): 811-819.  
ZHAO Wenzhi, HU Suyun, GUO Xujie, et al. New concepts for deepening hydrocarbon exploration and their application effects in the Junggar Basin, NW China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2019, 46(5): 811-819.
- [20] 姚光庆. 成油体系与成藏动力学研究的层次分析[J]. *勘探家*, 1999, 4(2): 12-14.  
YAO Guangqing. Hierarchy analysis of petroleum system and dynamics of reservoir formation[J]. *Petroleum Explorationist*, 1999, 4(2): 12-14.
- [21] 许浩, 汤达祯, 尹微, 等. 含油气系统中流体地质作用及其油气地质意义[J]. *油气地质与采收率*, 2006, 13(2): 39-42.  
XU Hao, TANG Dazhen, YIN Wei, et al. Geological function of fluid and its oil-gas geological significance in petroleum system[J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2006, 13(2): 39-42.
- [22] 宋国奇. 成藏理论研究中的系统论——从“含油气系统”谈起[J]. *石油与天然气地质*, 2003, 24(2): 111-115.  
SONG Guoqi. Systematology in research of reservoiring theory: discussion from petroleum system[J]. *Oil & Gas Geology*, 2003, 24(2): 111-115.
- [23] 郝芳, 邹华耀, 姜建群. 油气成藏动力学及其研究进展[J]. *地学前缘*, 2000, 7(3): 11-21.  
HAO Fang, ZOU Huayao, JIANG Jianqun. Dynamics of petroleum accumulation and its advances[J]. *Earth Science Frontiers*, 2000, 7(3): 11-21.
- [24] 郝芳, 孙永传, 李思田, 等. 活动热流体对有机质热演化和油气生成作用的强化[J]. *地球科学-中国地质大学学报*, 1996, 21(1): 68-72.  
HAO Fang, SUN Yongchuan, LI Sitian, et al. Enhancement of organic maturation and petroleum generation by hydrothermal fluids[J]. *Earth Science-Journal of China University of Geosciences*, 1996, 21(1): 68-72.
- [25] 金晓辉, 林壬子, 任延广, 等. 松辽盆地北部深层天然气成藏动力系统及空间分布特征[J]. *石油实验地质*, 2005, 27(3): 260-264.  
JIN Xiaohui, LIN Renzi, REN Yanguang, et al. Reservoir-forming dynamic system and distribution of deep-seated natural gas in the northern part of Songliao Basin[J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2005, 27(3): 260-264.
- [26] 侯建国, 林承焰, 姚合法, 等. 断陷盆地成藏动力系统特征与油气分布规律——以苏北盆地为例[J]. *中国海上油气*, 2004, 16(6): 361-364.  
HOU Jianguo, LIN Chengyan, YAO Hefa, et al. Dynamic hydrocarbon accumulation systems and hydrocarbon distribution in rifted basin: a case of North Jiangsu Basin[J]. *China Offshore Oil and Gas*, 2004, 16(6): 361-364.
- [27] 郝芳, 邹华耀, 倪建华, 等. 沉积盆地超压系统演化与深层油气成藏条件[J]. *地球科学-中国地质大学学报*, 2002, 27(5): 610-615.  
HAO Fang, ZOU Huayao, NI Jianhua, et al. Evolution of overpressured systems in sedimentary basins and conditions for deep oil/gas accumulation[J]. *Earth Science-Journal of China University of Geosciences*, 2002, 27(5): 610-615.
- [28] 郝芳, 董伟良. 沉积盆地超压系统演化、流体流动与成藏机理[J]. *地球科学进展*, 2001, 16(1): 79-85.  
HAO Fang, DONG Weiliang. Evolution of fluid flow and petroleum accumulation in overpressured systems in sedimentary basins[J]. *Advance in Earth Sciences*, 2001, 16(1): 79-85.
- [29] 邱贻博. 东营凹陷超压结构及控制因素[J]. *中国石油勘探*, 2018, 23(3): 28-34.  
QIU Yibo. Overpressure structure in Dongying sag and its controlling factors[J]. *China Petroleum Exploration*, 2018, 23(3): 28-34.
- [30] 张照录, 王华, 杨红. 含油气盆地的输导体系研究[J]. *石油与天然气地质*, 2000, 21(2): 133-135.  
ZHANG Zhaolu, WANG Hua, YANG Hong. Study on passage system of petroliferous basins[J]. *Oil & Gas Geology*, 2000, 21(2): 133-135.
- [31] 卓勤功, 宁方兴, 荣娜. 断陷盆地输导体系类型及控藏机制[J]. *地质论评*, 2005, 51(4): 416-422.  
ZHUO Qingong, NING Fangxing, RONG Na. Types of passage systems and reservoir-controlling mechanisms in rift basins[J]. *Geological Review*, 2005, 51(4): 416-422.
- [32] 陈欢庆, 朱筱敏, 张功成, 等. 海相断陷盆地输导体系分类及组合模式特征: 以琼东南盆地古近系陵水组为例[J]. *地学前缘*, 2021, 28(1): 282-294.  
CHEN Huanqing, ZHU Xiaomin, ZHANG Gongcheng, et al. Classification and combination model characteristics of pathway system in marine faulted basin: taking the Paleogene Lingshui Formation, Qiongdongnan Basin as an example[J]. *Earth Science Frontiers*, 2021, 28(1): 282-294.
- [33] 宋明水, 王永诗, 郝雪峰, 等. 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[J]. *石油与天然气地质*, 2021, 42(6): 1243-1254.  
SONG Mingshui, WANG Yongshi, HAO Xuefeng, et al. Petroleum systems and exploration potential in deep Paleogene of the Dongying sag, Bohai Bay Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2021, 42(6): 1243-1254.
- [34] 宋明水, 王学军, 林会喜, 等. 2019年胜利油田东部探区中深部层系资源评价报告[R]. 东营: 中国石油化工股份有限公司胜利油田分公司勘探开发研究院.  
SONG Mingshui, WANG Xuejun, LIN Huixi, et al. Evaluation report of middle and deep strata resources in east exploration area of Shengli oilfield in 2019[R]. Dongying: Exploration and Development Research Institute, Shengli Oilfield Company, Sinopec.
- [35] 王永诗, 李友强. 胜利油区东部探区“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.  
WANG Yongshi, LI Youqiang. The exploration situation and countermeasures in the late 12th Five-Year Plan in the eastern area of Shengli oilfield[J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2014, 21(4): 5-9.
- [36] 宋明水, 李友强. 济阳拗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.
- [37] 刘海宁, 操应长, 韩宏伟, 等. 台阶式断坡带砾岩体沉积过程模拟及其勘探启示——以东营凹陷胜坨地区沙河街组四段上亚段为例[J]. *石油学报*, 2022, 43(9): 1269-1283.

- LIU Haining, CAO Yingchang, HAN Hongwei, et al. Sedimentary process simulation and exploration implication of glutenite body in stepped fault-ramp zone; a case study of the upper sub-member of Member 4 of Shahejie Formation in Shengtuo area of Dongying sag[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2022, 43(9): 1269-1283.
- [38] 彭军, 杨一茗, 刘惠民, 等. 陆相湖盆细粒混积岩的沉积特征与成因机理——以东营凹陷南坡陈官庄地区沙河街组四段上亚段为例[J]. *石油学报*, 2022, 43(10): 1409-1426.
- PENG Jun, YANG Yiming, LIU Huimin, et al. Sedimentary characteristics and genetic mechanism of fine-grained hybrid sedimentary rocks in continental lacustrine basin; a case study of the upper sub-member of Member 4 of Shahejie Formation in Chenguanzhuang area, southern slope of Dongying sag[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2022, 43(10): 1409-1426.
- [39] 包友书, 王永诗, 李政, 等. 济阳拗陷深层沙河街组四段轻质油—凝析气成藏条件[J]. *石油学报*, 2021, 42(12): 1615-1624.
- BAO Youshu, WANG Yongshi, LI Zheng, et al. Accumulation conditions for deep light oil and condensate gas from Member 4 of Shahejie Formation in Jiyang depression[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2021, 42(12): 1615-1624.
- [40] 蒋有录, 王鑫, 于倩倩, 等. 渤海湾盆地含油气凹陷压力场特征及与油气富集关系[J]. *石油学报*, 2016, 37(11): 1361-1369.
- JIANG Youlu, WANG Xin, YU Qianqian, et al. Pressure field characteristics of petroliferous depressions and its relationship with hydrocarbon enrichment in Bohai Bay Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2016, 37(11): 1361-1369.
- [41] 何生, 宋国奇, 王永诗, 等. 东营凹陷现今大规模超压系统整体分布特征及主控因素[J]. *地球科学-中国地质大学学报*, 2012, 37(5): 1029-1042.
- HE Sheng, SONG Guoqi, WANG Yongshi, et al. Distribution and major control factors of the present-day large-scale overpressured system in Dongying depression[J]. *Earth Science-Journal of China University of Geosciences*, 2012, 37(5): 1029-1042.
- [42] 郝雪峰. 东营凹陷沙三一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.
- [43] 王永诗, 邱贻博. 济阳拗陷超压结构差异性及其控制因素[J]. *石油与天然气地质*, 2017, 38(3): 430-437.
- WANG Yongshi, QIU Yibo. Overpressure structure dissimilarity and its controlling factors in the Jiyang depression[J]. *Oil & Gas Geology*, 2017, 38(3): 430-437.
- [44] 张善文, 张林晔, 包友书, 等. 东营凹陷地层流体特征与油气成藏[J]. *石油勘探与开发*, 2012, 39(4): 394-405.
- ZHANG Shanwen, ZHANG Linye, BAO Youshu, et al. Formation fluid characteristics and hydrocarbon accumulation in the Dongying sag, Shengli oilfield[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2012, 39(4): 394-405.
- [45] 熊伟. 陆相断陷湖盆地下水来源及演化——以东营凹陷为例[J]. *油气地质与采收率*, 2019, 26(3): 20-30.
- XIONG Wei. Source and evolution of underground hot water in faulted lacustrine basin; a case study of Dongying sag[J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2019, 26(3): 20-30.
- [46] 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——以济阳拗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.
- [47] 王永诗, 高阳, 方正伟. 济阳拗陷古近系致密储集层孔喉结构特征与分类评价[J]. *石油勘探与开发*, 2021, 48(2): 266-278.
- WANG Yongshi, GAO Yang, FANG Zhengwei. Pore throat structure and classification of Paleogene tight reservoirs in Jiyang depression, Bohai Bay Basin, China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2021, 48(2): 266-278.
- [48] 操应长, 杨田, 宋明水, 等. 陆相断陷湖盆低渗透碎屑岩储层特征及相对优质储层成因——以济阳拗陷东营凹陷古近系为例[J]. *石油学报*, 2018, 39(7): 727-743.
- CAO Yingchang, YANG Tian, SONG Mingshui, et al. Characteristics of low-permeability clastic reservoirs and genesis of relatively high-quality reservoirs in the continental rift lake basin; a case study of Paleogene in the Dongying sag, Jiyang depression[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2018, 39(7): 727-743.
- [49] 鲜本忠, 王璐, 刘建平, 等. 东营凹陷东部始新世三角洲供给型重力流沉积特征与模式[J]. *中国石油大学学报: 自然科学版*, 2016, 40(5): 10-21.
- XIAN Benzong, WANG Lu, LIU Jianping, et al. Sedimentary characteristics and model of delta-fed turbidites in Eocene eastern Dongying depression[J]. *Journal of China University of Petroleum*, 2016, 40(5): 10-21.
- [50] 邓世彪, 关平, 张鹏飞. 东营凹陷青南地区沙四上亚段物源沉积体系与滩坝分布[J]. *沉积学报*, 2017, 35(3): 561-576.
- DENG Shibiao, GUAN Ping, ZHANG Pengfei. Provenance, sedimentary system and beach bar distribution of the Upper Es<sub>4</sub> in Qingnan area, Dongying depression[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2017, 35(3): 561-576.
- [51] 刘鑫金, 刘惠民, 宋国奇, 等. 东营凹陷洼陷斜坡带坡移扇沉积特征及展布模式[J]. *油气地质与采收率*, 2016, 23(4): 1-10.
- LIU Xinjin, LIU Huimin, SONG Guoqi, et al. Sedimentary characteristics and distribution pattern of the slope-shifting fan in the low-lying slope zone of Dongying sag[J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2016, 23(4): 1-10.
- [52] 赵文, 何生, 郭小文, 等. 东营凹陷中央背斜带沙三段砂岩石英次生加大边发育特征及其指示意义[J]. *地球科学*, 2020, 45(9): 3487-3501.
- ZHAO Wen, HE Sheng, GUO Xiaowen, et al. Characteristics of quartz overgrowth in sandstones from Es<sub>3</sub> interval central anticlinal belt in Dongying depression and its significance[J]. *Earth Science*, 2020, 45(9): 3487-3501.
- [53] 操应长, 金杰华, 王艳忠, 等. 东营凹陷北带古近系沙四段砂砾岩体沉积特征及沉积模式[J]. *沉积与特提斯地质*, 2014, 34(4): 13-23.
- CAO Yingchang, JIN Jiehua, WANG Yanzhong, et al. Sedimentary characteristics and model for the sandstones and conglomerates in the 4th Member of the Palaeogene Shahejie Formation, northern Dongying depression, Shandong[J]. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 2014, 34(4): 13-23.