

渤海湾盆地束鹿凹陷“牙刷状”油藏成藏特征与模式

吕传炳¹, 庞雄奇^{2,3}, 马奎友^{2,3}, 庞宏^{2,3}, 火勋港^{2,3}, 付亮亮¹, 张心罡^{2,3}, 梁星如^{1,2}, 吴松^{2,3}

[1. 中国石油华北油田公司, 河北任丘 062552; 2. 油气资源与探测国家重点实验室, 北京 102249;

3. 中国石油大学(北京)地球科学学院, 北京 102249]

摘要:冀中坳陷束鹿凹陷具有良好的油气成藏条件,然而实际勘探中许多直井无法获得工业产能。以束鹿凹陷车城油田沙河街组“牙刷状”油藏为研究对象,从储层特征、隔夹层特征、盖层特征、油气来源及运移路径,综合分析了“牙刷状”油藏成藏条件及成藏过程,并总结了其成藏模式。研究表明:“牙刷状”油藏富集于优势砂地比储层中,油藏间被盖层分隔成不同的压力系统,油藏内被相对致密的砂岩隔夹层分隔成一系列压力系统相同的储集单元;断层是“牙刷状”油藏成藏的平面运移及垂向运移主要通道。该地区存在两期油气充注,第一期原油充注是“牙刷状”油藏的主要油气来源,且该期充注的油气沿同期发育的断层运移至地表浅层并散失,使得油气层厚度随深度变浅逐渐减小;油气运移方向与优质储层展布方向大致垂直,导致油藏集中发育在油气运移方向上的断层圈闭中,形成了一系列“牙刷状”油藏。文章系统论述了“牙刷状”油藏的成因机制,为研究区后续勘探开发工作提供可靠的理论基础。

关键词:油源条件;储层特征;储-盖组合;运移路径;成藏模式;“牙刷状”油藏;束鹿凹陷;渤海湾盆地

中图分类号:TE122.3

文献标识码:A

Characteristics and reservoiring patterns of “teeth-brush-shaped” oil pools in the Shulu Sag, Bohai Bay Basin

Lyu Chuanbing¹, Pang Xiongqi^{2,3}, Ma Kuiyou^{2,3}, Pang Hong^{2,3}, Huo Xungang^{2,3},Fu Liangliang¹, Zhang Xingang^{2,3}, Liang Xingru^{1,2}, Wu Song^{2,3}

[1. Huabei Oilfield Company, PetroChina, Renqiu, Hebei 062552, China; 2. State Key Laboratory of Petroleum Resources and Prospecting, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China; 3. College of Geoscience, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China]

Abstract: The Shulu Sag in Jizhong Depression possesses all the necessary factors for hydrocarbon to accumulate. However, many vertical wells drilled there failed to yield any industrial oil/gas flow. This paper takes the “teeth-brush-shaped” reservoirs in the Shahejie Formation, Checheng oilfield, Shulu Sag as study subject to crack the enigma. The characteristics, barrier bed features, cap rock features, oil and gas sources and migration paths for the reservoirs are investigated to analyze the conditions and process of hydrocarbon accumulation and summarize reservoiring patterns. The results shows that the “teeth-brush-shaped” oil pools occur with a high net-to-gross ratio, and adjacent oil pools are segmented into different pressure systems by cap rocks, while single oil pool is compartmentalized into a series of reservoir units of the same pressure system by relatively tight sandstone barriers. Faults were the major vertical and lateral migration pathways for hydrocarbon. Two stages of hydrocarbon charging occurred in the area with the first stage being the main contributor of hydrocarbons to the reservoirs. However, some of the hydrocarbons were dissipated while moving upward to the shallower layers along faults, resulting in a gradually thinning reservoirs with decreasing depth. With the migration direction roughly perpendicular to the distribution direction of reservoirs with dominant net-to-gross ratio, hydrocarbons tend to accumulate in fault traps along migration pathways, forming a series of “teeth-brush-shaped” oil pools. The genetic mechanism of the oil pools revealed by the study can be used as a reliable theoretical basis for subsequent exploration and development in the study area.

收稿日期:2021-01-11;修订日期:2022-03-14。

第一作者简介:吕传炳(1964—),男,教授级高级工程师,油田地质及油藏评价。E-mail: pjb_lcb@petrochina.com.cn。

基金项目:中国石油天然气股份有限公司科技重大专项(2017E-1504)。

Key words: oil source conditions, reservoir characteristics, reservoir-seal assemblage, migration pathway, “teeth-brush-shaped” oil pool, reservoiring pattern, Shulu Sag, Bohai Bay Basin

引用格式: 吕传炳, 庞雄奇, 马奎友, 等. 渤海湾盆地束鹿凹陷“牙刷状”油藏成藏特征与模式[J]. 石油与天然气地质, 2022, 43(3): 566-581. DOI: 10.11743/ogg20220307.

Lyu Chuanbing, Pang Xiongqi, Ma Kuiyou, et al. Characteristics and reservoiring patterns of “teeth-brush-shaped” oil pools in the Shulu Sag, Bohai Bay Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2022, 43(3): 566-581. DOI: 10.11743/ogg20220307.

渤海湾盆地是中国最主要的含油气盆地之一, 广泛发育富油气凹陷和区带^[1-3], 其中束鹿凹陷就是一个典型的富油气凹陷^[4]。束鹿凹陷具有良好的油气成藏条件^[5-6], 但是其油气勘探程度一直不高, 截至2014年, 凹陷内部的油气探明程度仅有30%^[7], 因此束鹿凹陷成为了华北油田增产增储的重要目标之一。华北油田近些年在束鹿凹陷车城油田取得了辉煌的勘探成果, 截至2019年, 在凹陷南部斜坡带钻探新井192口, 产能达到 38.40×10^4 t, 新增探明地质储量 $2\,093 \times 10^4$ t。然而勘探的过程是曲折的, 在勘探的前期, 许多勘探开发直井钻遇的油层厚度低, 资源规模小, 油气产量衰减严重, 勘探实践与地质认识存在极大的差异, 说明以往的地质认识是不全面、不具体的。后来经过详尽的地质分析, 认识到研究区“牙刷

状”油藏的特殊分布模式, 并基于此指导勘探, 最终使一个老油田实现了增产增储。

在一系列断层控制的断鼻构造中, 油层主要沿断棱分布, 开发井距油水边界近, 油水系统复杂, 形成了油层长短不一的“牙刷状”油藏^[8]。束鹿凹陷典型的“牙刷状”油藏剖面图如图1所示。根据新的地质认识, 在凹陷内赵76断块的沙河街组二段(E_s^2)和沙河街组三段(E_s^3)新增含油面积0.22 km², 新增石油地质储量 270.02×10^4 t。本文以束鹿凹陷车城油田沙河街组“牙刷状”油藏为研究对象, 通过测井、岩心、地震、原油性质、源岩地球化学资料等, 从储层条件、隔夹层发育情况、盖层条件、油源条件及油气运移条件5方面, 系统地论述了其成藏过程与机制, 并构建了其成藏模式, 以期更好地总结勘探实践成果, 指导未来勘探。

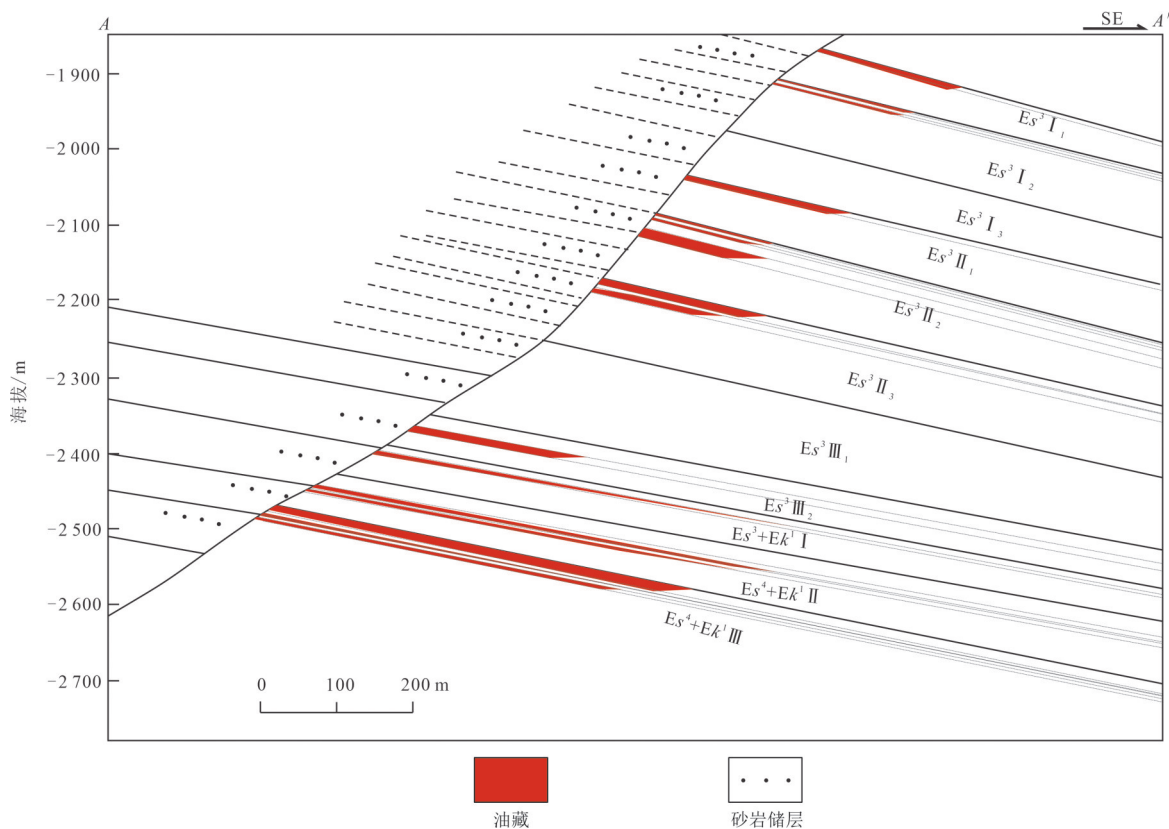


图1 束鹿凹陷赵76断块“牙刷状”油藏成藏模式

Fig. 1 Reservoiring pattern of “teeth-brush-shaped” oil pools in the Zhao 76 fault block, Shulu Sag
(I, II, III为油组编号。)

1 区域地质概况

1.1 地质背景

渤海湾盆地是发育在华北克拉通之上的断陷湖相盆地^[9],盆地面积约为 $20 \times 10^4 \text{ km}^2$,是中国最主要的含油气盆地之一^[10]。束鹿凹陷位于冀中坳陷的南部,其勘探面积约为 700 km^2 。束鹿凹陷不同地区发育的油气藏不尽相同,凹陷北段和中段主要发育地层和岩性油气藏。而凹陷中南段的车城油田则主要发育“牙刷状”油藏(图2)。车城油田位于束鹿凹陷中南部,古近系、新近系发育齐全,自下而上可以分为古近系的孔店组、沙河街组、东营组以及新近系的馆陶组、明化镇组和平原组。其中沙河街组三段(沙三段, E_s^3)与一段(E_s^1)是研究区最为主要的烃源岩^[11],同时沙一段发育的一套辫状河三角洲砂岩储层也使得沙河街组成为了中深层勘探的最主要目标之一,而馆陶组和明化镇组发育广泛分布的泥岩可以作为油气的区域性盖层。

1.2 构造特征

束鹿地区共经历了3期构造运动,分别为早期构造运动(沙河街时期),中期构造运动(东营末期至馆陶初期)及晚期构造运动(明化镇末期)^[12-14]。其中早期构造运动又可细分为2个期次。第一期构造运动主要发生在断陷开始至沙三中、下亚段沉积之前,在这一时期形成的断层较少,多表现为张性断层,断距较大;此外,该期形成的断层对湖盆基底地貌的改变起到了至关重要的作用,形成了古潜山构造,对沙三下亚段的沉积有明显的控制作用。第二期构造运动始于沙三段沉积末期,在沙三上亚段至沙一段沉积期间活动最为强烈,这一时期形成的断层密度大,但断距相对较小,断层的产状浅部陡、深部缓,呈Y字型和反Y字型的断层样式^[12]。中期构造运动是束鹿凹陷以及冀中坳陷在东营末期经历的一次大规模断陷活动,主要发生于东营末期持续至馆陶中期结束^[13]。这一时期形成的断层主要分布在凹陷中心部位,密度大,在凹陷周边断层也有所发育,但密度小,这一期断层性质与第一期断层相近。晚期构造运动发育时期为新近纪以后,此阶段束鹿凹陷整体进入拗陷期,自下而上发育了馆陶组和明化镇组,与前两期构造运动相比整个凹陷断陷活动有所减弱。但在凹陷东部的新河断裂等局部地区断裂活动依然较强^[14],这一时期的

断裂发育局限,仅在凹陷东部边缘的新河断裂地区密度较高,对凹陷内部的构造格局影响甚微,主要为正断层(图3)。

2 储层特征

2.1 储层物源

物源供给是控制沉积体系展布及储集层分布规律的重要因素之一,物源分析工作在明确物源位置,沉积物搬运路径,砂岩储层展布方向有重要意义^[15]。现阶段,国内外学者共提出了包括沉积展布法、重矿物含量分析法、碎屑成分含量法、同位素测年法、裂变径迹分析法以及地球化学分析法6种方法在内的多种物源分析方法^[15]。结合实际情况,本文采用可获取大量原始数据的碎屑成分含量法,对研究区物源供给方向进行分析。碎屑成分含量法原理在于:组成岩石的各矿物组分(主要为石英、长石及岩屑)抗风化侵蚀的能力不同,从而导致随着搬运距离的增加,相对稳定矿物(石英)的含量相对增加,相对不稳定矿物(长石和岩屑)的含量会相对减少。从而通过分析平面上相对稳定矿物与相对不稳定矿物比值的变化规律即可揭示物源供给方向^[16]。

由岩屑成分含量在平面的分布规律可知,束鹿凹陷车城油田沙河街组储层具有明显的东北、西北和西南3物源特征。西北物源方向:由车城油田西北部向东南方向,沙河街组储层石英含量呈现明显的增加趋势,至凹陷东部石英含量可达岩石总矿物含量的61%。东北物源方向:由车城油田东北部的晋100井向西南部的晋98井,石英含量由小于50%逐渐增加至60%以上(图4)。东北、西北两物源在车城油田中部晋98井区及晋94井区有弱混合趋势(图4)。除此之外,西南部的晋58井区也存在向东北方向石英含量逐渐增大的趋势,但其展布面积十分局限且稳定性差,仅在沙二段、沙三段有沉积物供给迹象,沙一段则未见明显沉积物供给(图4)。可见,车城油田沙河街组主要物源供给来自于其东北、西北两个方向。

2.2 沉积相特征

束鹿地区车城油田沙河街组整体属于三角洲-湖泊相沉积体系,由 E_s^3 到 E_s^1 三角洲相整体表现为由三角洲平原亚相到前三角洲亚相的演变,其展布方向与物源供给方向高度一致,在3个物源供给方向形成3个展布趋势不同的沉积体系(图5)。西北物源方向沉积

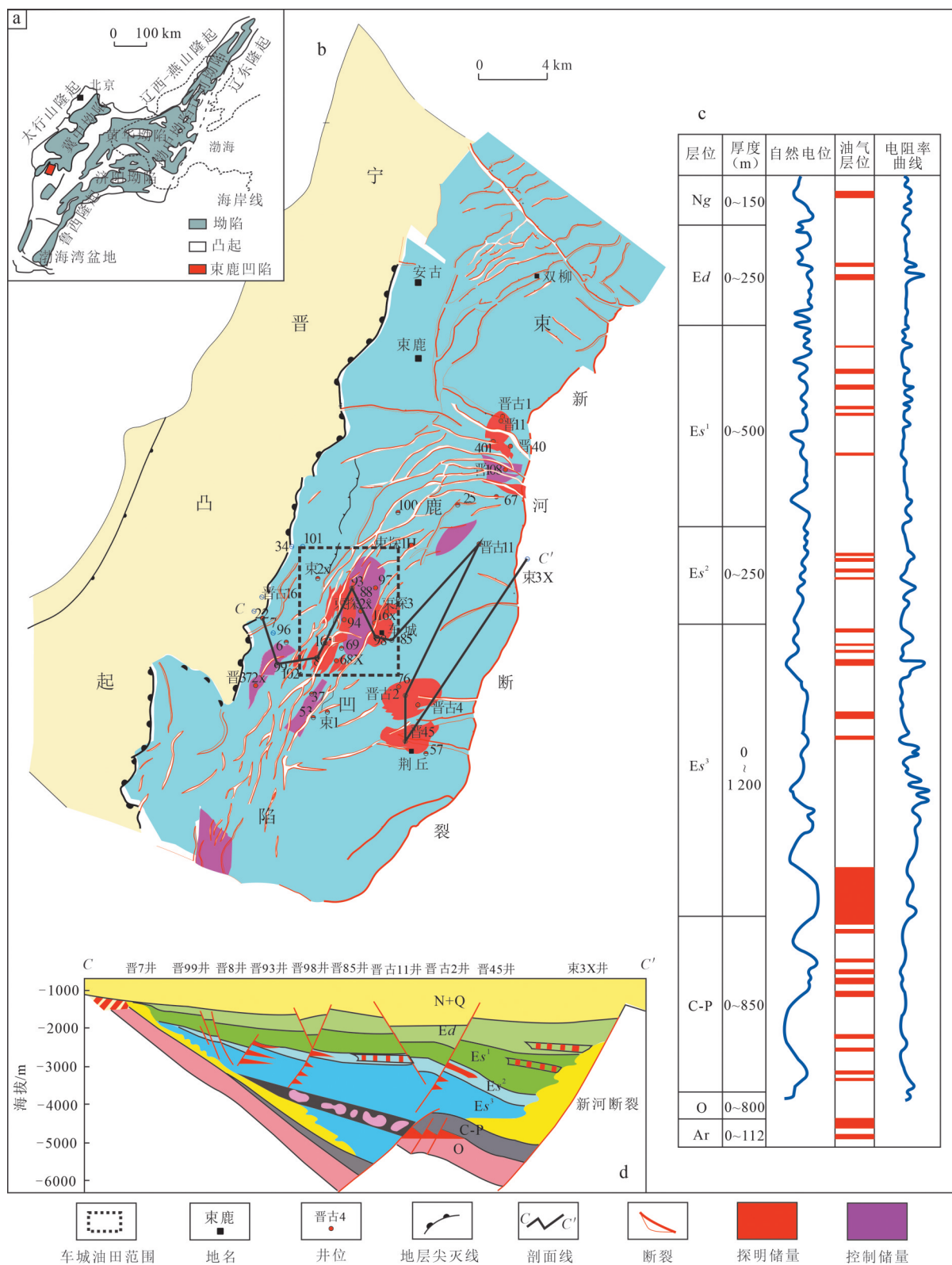


Fig. 2 Comprehensive maps showing the geographical location and stratigraphic characteristics of the Shulu Sag

a. 渤海湾盆地构造纲要及束鹿凹陷位置; b. 束鹿凹陷构造单元划分及勘探形势; c. 束鹿凹陷地层综合柱状图;

d. 束鹿凹陷油藏剖面(剖面位置见图 2b)

物供给最强,其控制的西北沉积体系广泛发育于车城油田中部,西北起于晋古16井区,东南至晋98井区,呈

现西北-东南向展布,该沉积体系 E_s^2 和 E_s^3 主要发育三角洲平原-三角洲前缘亚相, E_s^1 则主要发育前三角洲

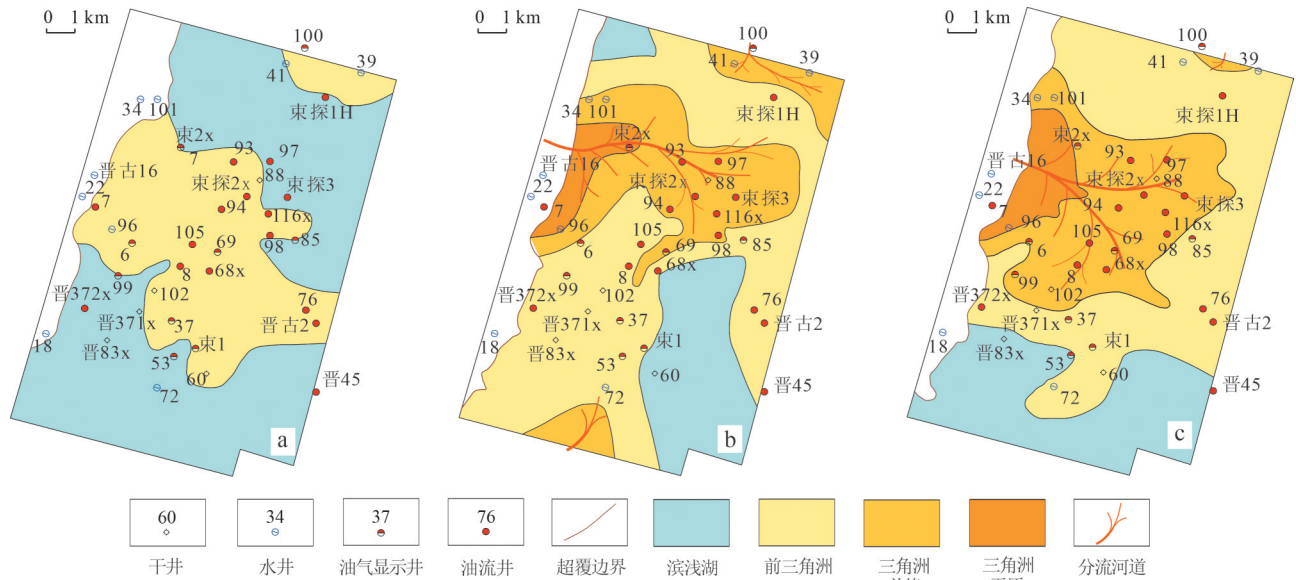


图5 束鹿凹陷车城油田沙河街组沉积相分布

Fig. 5 Sedimentary facies distribution maps of each sub-member of the Shahejie Formation, Checheng oilfield, Shulu Sag

a. 沙一段; b. 沙二段; c. 沙三段

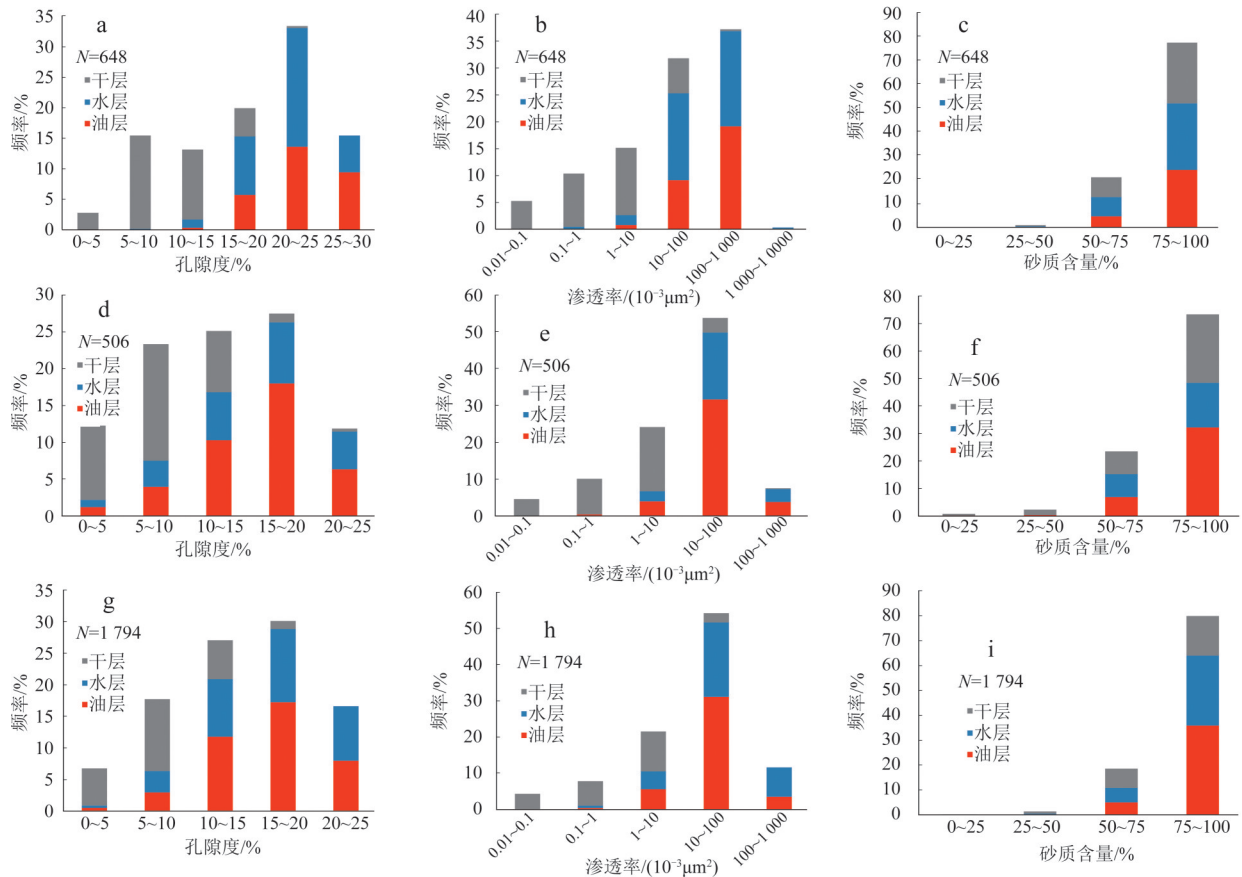


图6 束鹿凹陷牙刷状油藏不同层位物性频率直方图

Fig. 6 Frequency histograms of physical properties in different layers of "teeth-brush-shaped" reservoirs in the Shulu Sag

a—c. 沙一段储层各孔隙度区间分布频率; d—f. 沙二段储层各孔隙度区间分布频率; g—i. 沙三段储层各孔隙度区间分布频率

间有一定比例的油气发育频率(图6d),但该部分储层渗透率较高,均大于 $1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ (图6e),为典型的低

孔、高渗储层。其油气主要充注在孔隙度 $10\% \sim 25\%$,渗透率 $10 \times 10^{-3} \sim 100 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的储层之中(图6d,

e); E_s^3 储层随着物性增强油层发育频率呈现明显先增大后减小的趋势,除了压实作用的影响外,致密油藏的发育也可能是低孔渗储层油气富集程度增强的原因。现阶段,大量学者对致密油气发育的物性界限进行了系统的研究,孔隙度为 10%,渗透率为 $1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 是被大多数学者所接受的致密储层物性下限^[19]。 E_s^3 储层在此致密储层物性下限之下出现了一定比例的油藏,但大多数油藏仍于高孔渗的储层成藏,说明该层位处于常规油气与致密油气发育的过渡带上(图 6g,h)。与 E_s^2 储层相同, E_s^3 储层油气仍主要充注在孔隙度为 10%~25%、渗透率为 $10 \times 10^{-3} \sim 100 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的储层之中,但 E_s^3 储层低孔渗油层发育频率较 E_s^2 储层有所增高(图 6g,h)。除此之外,车城油田沙河街组储层泥质含量极低,砂质含量较高,均在 0.5~1.0,油气主要分布在砂质含量高于 0.75 的砂岩储层之中(图 6c,f,i)。

储层物性是含油气性的重要控制因素之一^[16-18,20]。统计沙河街组各亚段储层含油饱和度与其物性之间的关系,发现 E_s^1 、 E_s^2 和 E_s^3 储层物性与含油气性相关性逐渐变差, E_s^1 孔渗与含油气性相关性最高,相关系数(R^2)

可达 0.29 左右; E_s^2 孔隙度、渗透率与含油气性拟合的 R^2 分别为 0.16 和 0.10; E_s^3 孔渗与含油气性相关性极差, R^2 均小于 0.1(图 7)。砂质含量与含油气饱和度的相关性较差, R^2 较同层位孔渗与含油气饱和度的相关性低 0.1 左右(图 7),可见沙河街储层孔渗对其油气的发育频率及含油气性均具有十分明显的控制作用。

3 隔夹层物性特征

隔夹层是储层与储层之间厚度较薄、分布稳定且控制或阻止流体运动的非渗透层^[21-22]。“牙刷状”油藏之所以可以在断层下盘形成一系列的薄油藏,是因为盖层与隔夹层的共同作用将储集砂体分隔成一系列隔断或者间隔的储集空间(图 8)。隔层与盖层是有所区别的,盖层是指厚度大,粒度细,排替压力大可以有效封盖油气的致密岩层,可以隔断油藏,从而使油藏具有不同压力系统;隔夹层主要是在同一油藏中起间隔作用的相对致密层,不影响油气藏的均一压力系统(图 8)。

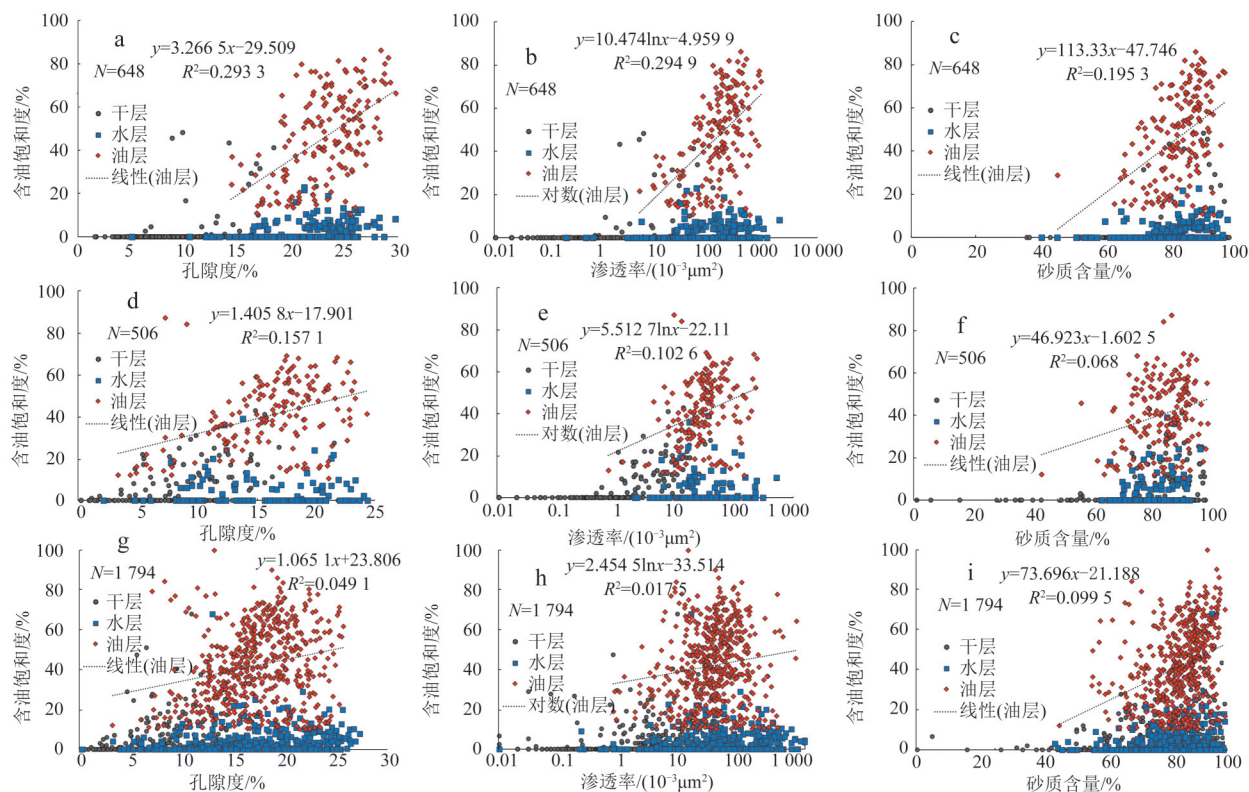


图7 束鹿凹陷牙刷状油藏含油层系孔隙度、渗透率和砂地比与含油饱和度相关性

Fig. 7 Relationship of porosity, permeability and net-to-gross ratio with oil saturation of different oil layers in the “teeth-brush-shaped” reservoirs in the Shulu Sag

a—c. 沙一段储层孔隙度与含油饱和度交汇图版; d—f. 沙二段储层孔隙度与含油饱和度交汇图版;

g—i. 沙三段储层孔隙度与含油饱和度交汇图版

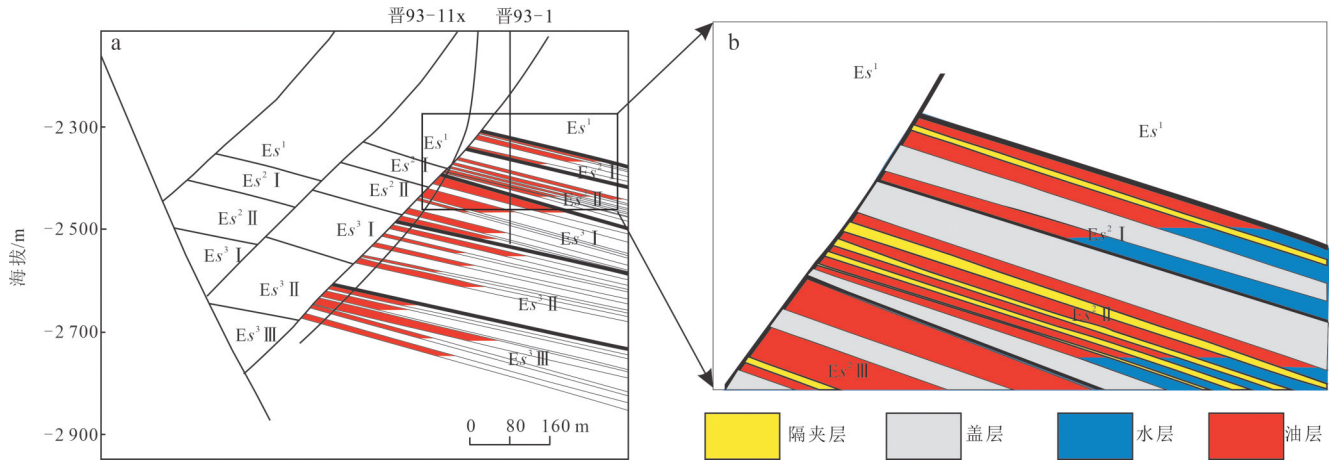


图8 束鹿凹陷车城油田牙刷状油藏隔夹层、盖层与储层分布模式

Fig. 8 Distribution patterns of barriers, cap rocks and reservoirs in "tooth-brush-shaped" oil pools, Checheng oilfield, Sulu Sag

a. “牙刷状”油藏储盖分布关系; b. “牙刷状”油藏储盖及隔夹层分布关系

车城油田不同含油层系的隔夹层物性是具有差异性的, Es^1 夹层孔隙度主要分布在 5%~20%, Es^2 和 Es^3 夹层孔隙度主要分布在 0~15%, 且随着埋深增加低孔隙度夹层的比逐渐增加(图9)。 Es^1 夹层渗透率主要分布在 $0.1 \times 10^{-3} \sim 100 \times 10^{-3} \mu m^2$, Es^2 和 Es^3 夹层渗透率主要分布在 $0.01 \times 10^{-3} \sim 10 \times 10^{-3} \mu m^2$ (图9b, e, h),

随着深度的增加, 低渗透率隔夹层所占的比例也逐渐上升。 Es^1 — Es^3 隔夹层砂质含量主要分布在 0.5~1.0, 各层系之间并无明显的变化(图9)。总体来看, 研究区发育的隔夹层是相对致密的砂岩, 由于其物性相对于同层位油气充注的储层物性低, 从而可以对油藏起间隔作用。

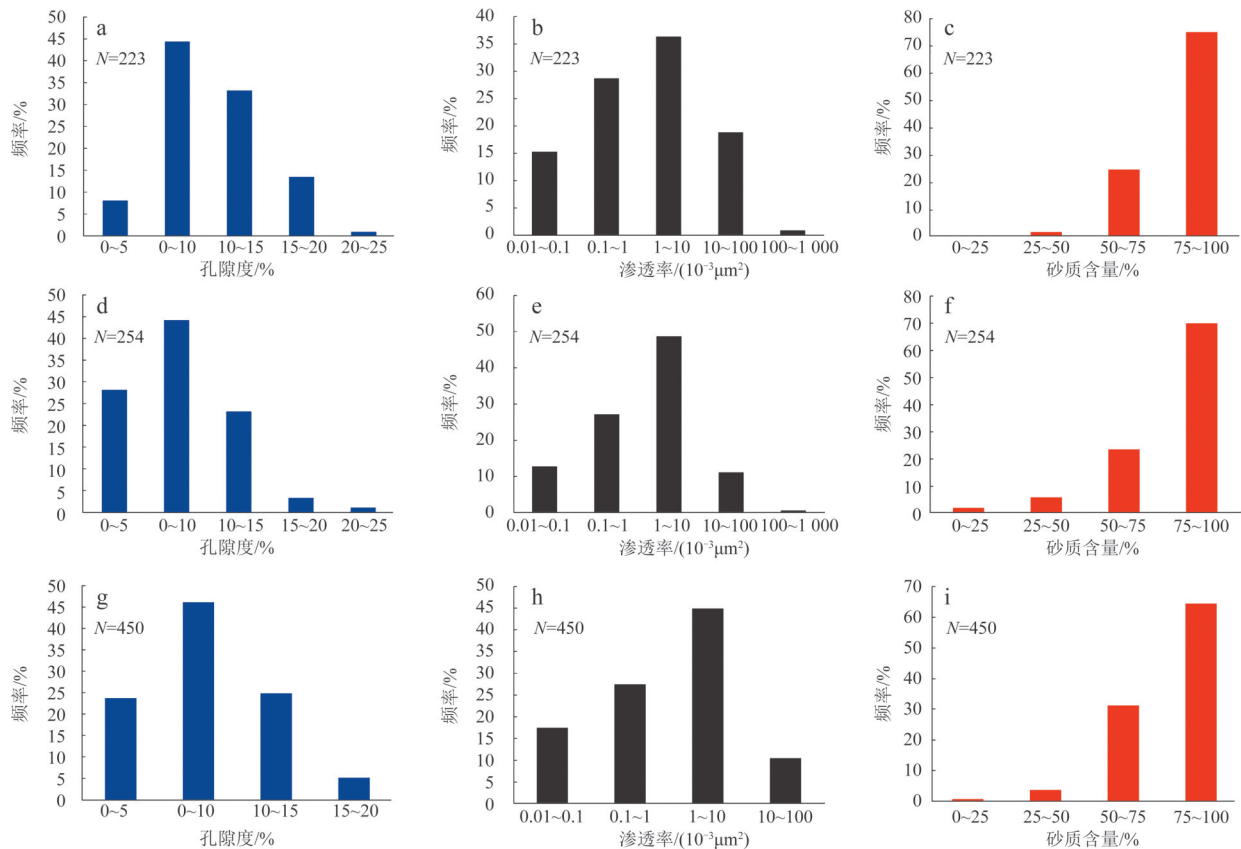


图9 束鹿凹陷牙刷状油藏隔夹层物性

Fig. 9 Histograms of physical properties of the barriers within the "teeth-brush shaped" reservoirs in the Shulu Sag

a—c. 沙一段隔夹层各孔隙度区间分布频率; d—f. 沙二段隔夹层各孔隙度区间分布频率; g—i. 沙三段隔夹层各孔隙度区间分布频率

4 盖层发育特征

盖层对于油气的富集具有重要的控制作用。研究区及相邻井区,主要发育 Es^1 底— Es^2 顶部及 Es^2 下段两套分布稳定的区域盖层, Es^3 中上部厚度较薄且分布不稳定的局部盖层(图10)。 Es^1 底— Es^2 顶部盖层平均厚度约为 48.20 m, Es^2 下段分布稳定的区域盖层平均厚度约为 30.93 m, Es^3 中、上部盖层厚度约为 28.00 m。根据研究区盖层和含油饱和度相关性分析可知,各层位油层含油气性与其封盖层厚度之间存在一定的正相关性,即盖层厚度越大,油藏含油饱和度越大(图11)。

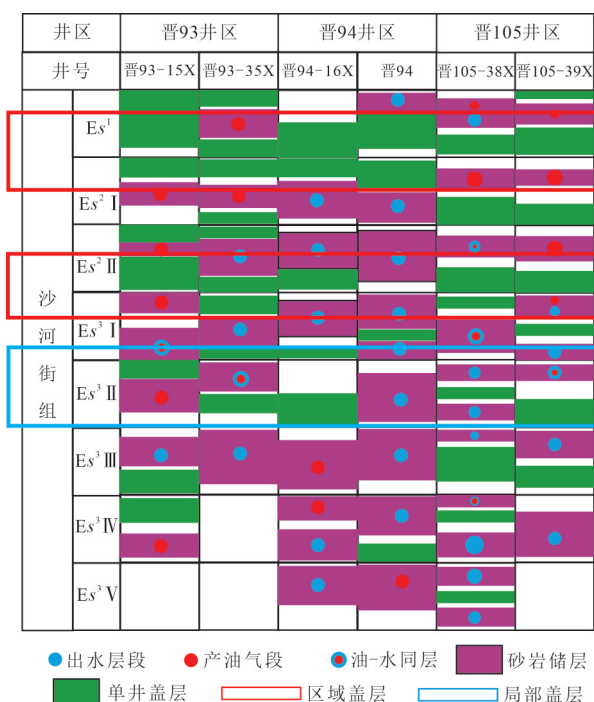


图10 束鹿凹陷车城油田盖层发育特征

Fig. 10 Distribution characteristics of cap rocks in the Checheng oilfield, Sulu Sag

5 运移路径

5.1 平面运移特征

对于常规油气而言,油气通常由区域生排烃中心顺油气运移通道向周边运移,确定主要的生排烃中心即可大致确定油气运移起点^[23]。束鹿地区主要发育沙一段和沙三下亚段两套烃源岩^[24-25],而沙一段源岩成熟度较低,对区域油气聚集的贡献十分有限,沙三下亚段烃源岩是该地区的主力烃源岩^[26]。束鹿地区沙三下亚段烃源岩生烃强度在凹陷中部最大,位于车城油田东北部,生烃强度在 $2\,000 \times 10^4 \sim 3\,600 \times 10^4 \text{ t/km}^2$ (图12)^[4]。除此之外,在束鹿凹陷南部也具有一个局部的生烃中心,生烃强度在 $1\,200 \times 10^4 \text{ t/km}^2$ 左右。

在具有相同油源的情况下,由于地层的层系效应,原油在地层中运移时重质组分会被地层骨架所吸附,从而导致原油密度随运移距离的增加而减小,故原油物理性质在区域上的规律性变化可以大致恢复油气运移的方向^[15,23,27]。为了明确油气运移的优势方向,本文统计了束鹿凹陷沙河街组原油密度变化的趋势,结合生烃中心的位置明确了束鹿凹陷沙河街组储层平面上的油气运移方向(图13)。由凹陷中部生烃中心至北部晋1井区沙河街组原油密度有明显降低趋势,由 0.96 g/cm^3 减少至 0.89 g/cm^3 ;由凹陷中部生烃中心至晋105井区,油气密度由 0.90 g/cm^3 减少至 0.87 g/cm^3 ,由凹陷南部局部生烃中心至晋99井区,油气密度由 0.92 g/cm^3 减少至 0.89 g/cm^3 (图13)。可见,沙河街组储层主要的油气运移路径主要有3条,分别为:由凹陷中部生烃中心向北至晋1井区,由凹陷中心生烃中心向南至晋72井区,由凹陷南部局部生烃中心向北至晋99井区(图13)。车城油田的油源受南北源的共同控制,油气的主要运移方向为由其东北侧向西南侧运移及由其东南侧向西北运移,整体上南北向油气运移要

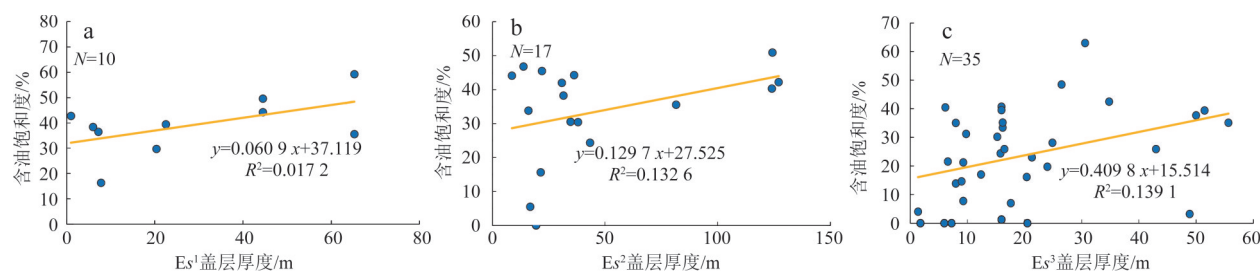


图11 束鹿凹陷车城油田各亚段盖层与含油饱和度关系

Fig. 11 Relationship between caprocks and oil saturation of each sub-member of the Shahejie Formation, Checheng oilfield, Sulu Sag

a. 沙一段底至沙二段顶; b. 沙二段; c. 沙三中—上亚段

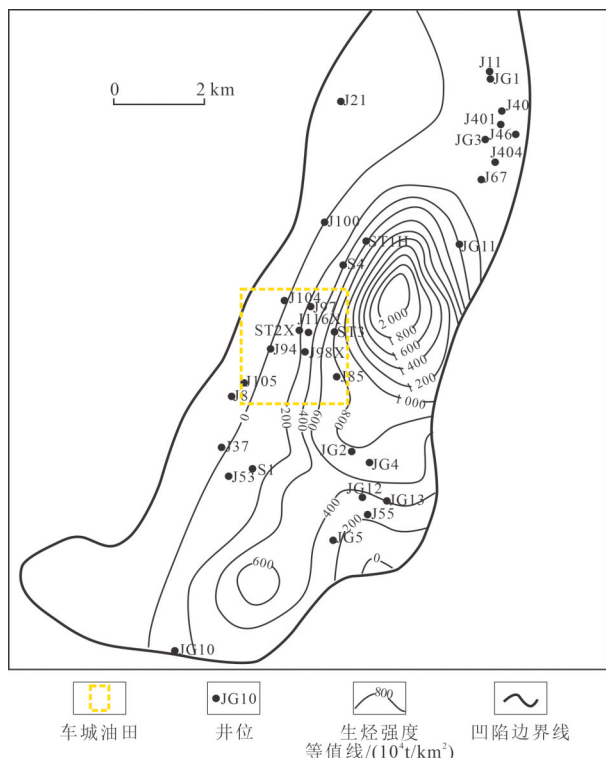


图12 束鹿地区烃源岩生烃强度分布等值线
(据 Huo Zhipeng, 2019^[4]改)

Fig. 12 Contour map of hydrocarbon generation intensity of source rocks in the Shulu Sag
(modified after Huo Zhipeng, 2019^[4])

明显强于东西向油气运移(图13)。

除了运用现今油气的物理性质对油气运移路径进行反演之外,结合断层、砂体、不整合及构造脊形态来对油气运移通道进行刻画也是油气二次运移的重要研究方法^[28]。

束鹿凹陷沙河街组储层不整合界面发育强度不高,油气运移主要依靠断层-砂体-构造脊三者的复合体系。断层方面,分布在凹陷内部的早期及中期断层均有效切割洼陷内烃源岩层位,起到了有效沟通油源的作用(图3)。平面上,凹陷北部断层走向呈近东西向分布,凹陷中部至南部断层呈现明显的南北向分布(图14)。车城油田范围内,断层也主要呈现南北向分布的特点且发育密度较高,这使得车城沙河街组储层受南北走向断层破碎带的改造,形成了一定的南北向的物性优势。其次,构造脊在车城油田范围内也呈现明显的北东-南西向分布,构造低部位集中分布于车城油田的南部及北部,其构造高点多数分布于车城油田范围内,且与断层相关的断背斜构造上(图14)。在砂体联通性方面,车城油田砂体联通性较高,各亚段砂地比均处于优势地位(该亚段砂地比峰值的50%之上),

但其展布方向呈北西-南东向,与构造脊及断层的分布方向大致垂直(图15)。可见,在车城油田的范围内具有良好的砂体运移通道,断层运移通道及被构造脊联通的构造高点是油气运移及聚集的有利区带。断层走向与构造脊方向呈现近南北向,有效地沟通了车城油田与其南北部的两生烃中心,形成了由西北向东南,由西南向东北两个优势运移方向。这与依据密度在平面上的变化趋势推测油气运移路径是完全对应的。由于砂体的展布方向与油气的运移方向大致垂直,油气在砂体延展性最差的方向上运移且在该方向上的断背斜中就近聚集成藏,所以油气并没有在砂体展布方向形成一系列断层油藏,而是在油气运移方向的构造高点上形成了一系列依附于断层的北东-南西向油藏(图13,图15)。

5.2 垂向运移特征

通过统计束鹿凹陷南北向、西南向两条测线上并位在 Es^1 、 Es^2 、 Es^3 段的原油密度数据,发现从深层至浅层原油密度总体上呈现增大的趋势(图16),这可能是由于束鹿凹陷存在两期油气充注,且第一期充注的油气运移至浅部遭受氧化及生物降解作用。

对于束鹿地区成藏期次的问题,前人通过研究发现束鹿地区共经历了两期成藏。根据束鹿地区沙三上亚段至沙二下亚段储层中流体包裹体的均一温度的数据,第一期油气充注温度范围在75~85℃,第二期为95~105℃^[29]。对照埋藏史热史图可以明显观察到:第一期充注发生于馆陶组沉积中期,第二期充注发生于明化镇组沉积时期(图17)。结合油气成藏期与断裂活动期的配置关系(图18),认为在第一个成藏期即馆陶组沉积中期,伴随着的断裂活动将油气从 Es^3 段运移至浅部地层,该组断裂大多断穿 Es^2 顶区域盖层(图3),生成的油气运移至浅部地层可能遭到氧化或者微生物降解,导致浅部原油密度变大;而第二个成藏期即明化镇组沉积时期,形成的断裂主要分布在凹陷边缘(图3),在车城油田范围内基本不发育该组断裂,而此时第一个成藏期形成的断层处于封闭状态,烃源岩生成的油气难以向上运移,只能在 Es^3 段成藏,这导致了深层的原油密度比浅层遭受氧化或微生物降解的原油密度小。总的来说,断层是研究区油气垂向运移的主要通道,油气沿着油源断裂由 Es^3 段烃源岩向浅部垂向运移并在合适的圈闭中聚集成藏,同时浅部的油气也遭受了一定程度的氧化或生物降解导致原油密度增大。

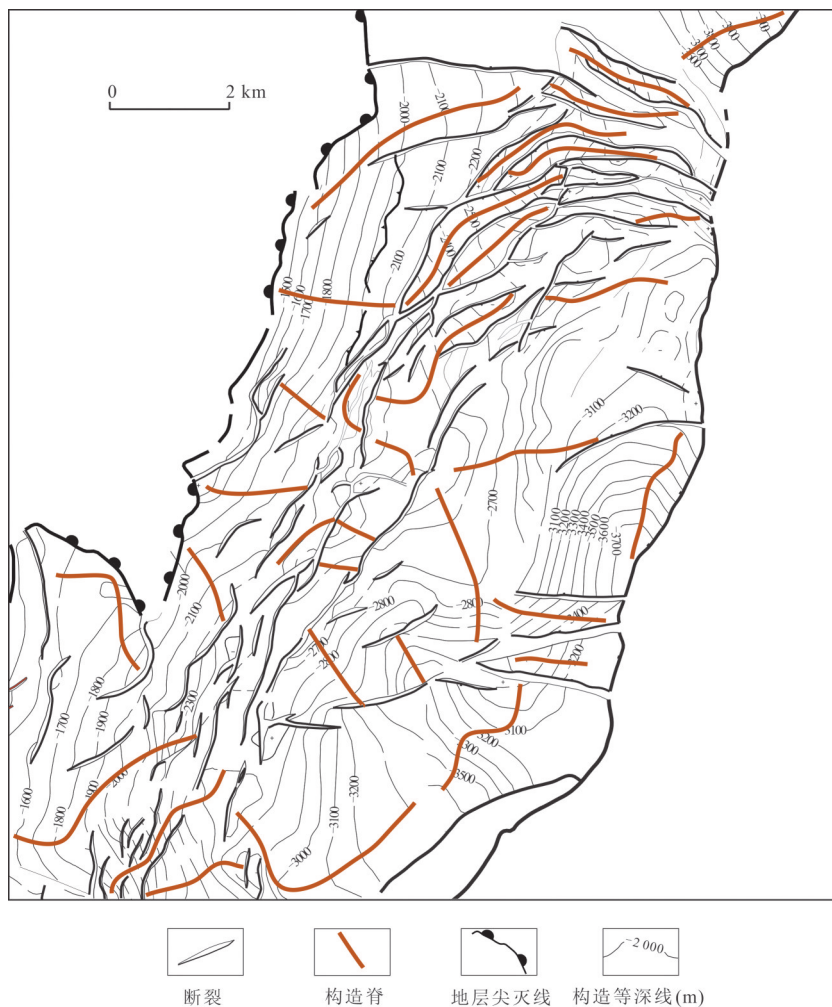


图14 束鹿凹陷沙河街组顶面构造脊分布

Fig. 14 Distribution of structural ridges on top of the Shahejie Formation in the Shulu Sag

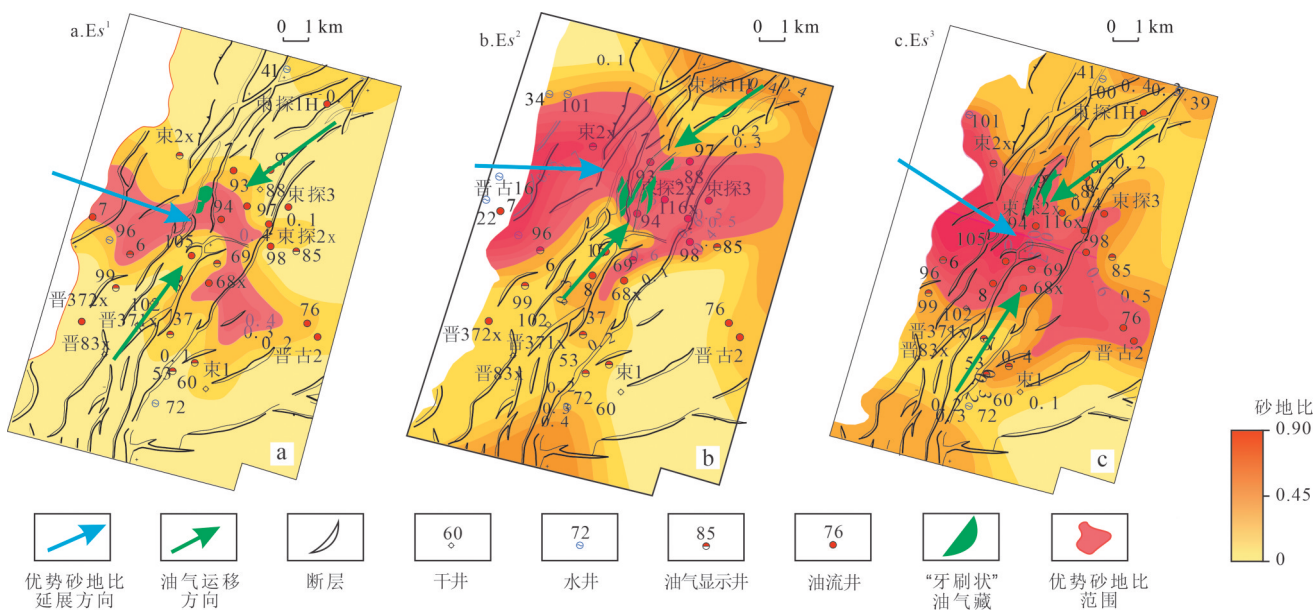


图15 束鹿凹陷车城油田优势砂体展布方向及油气运移方向

Fig. 15 Maps showing the distribution direction of dominant sand bodies and the direction of oil and gas migration, Checheng oilfield, Shulu Sag

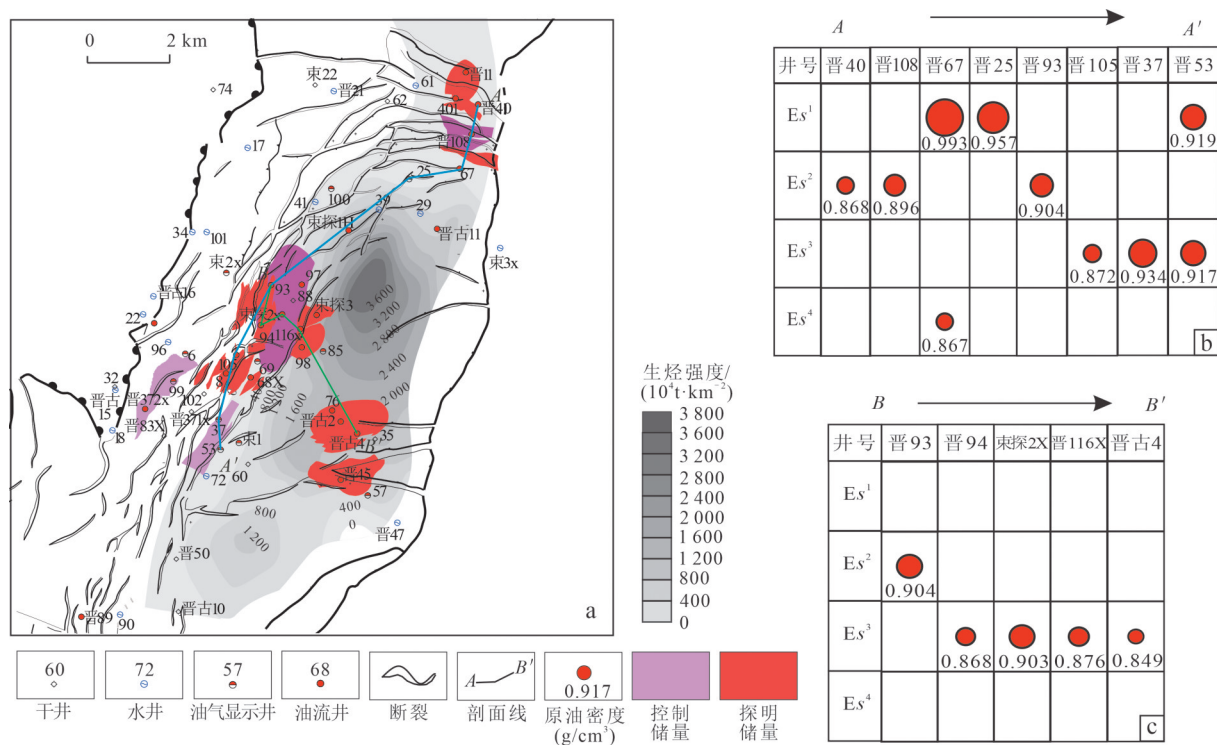


图16 束鹿凹陷南北向剖面不同层位原油密度统计

Fig. 16 Crude oil density statistics of different layers of south-north direction, Shulu Sag

a. 束鹿凹陷油气储量分布; b. A—A'剖面原油密度统计; c. B—B'剖面原油密度统计

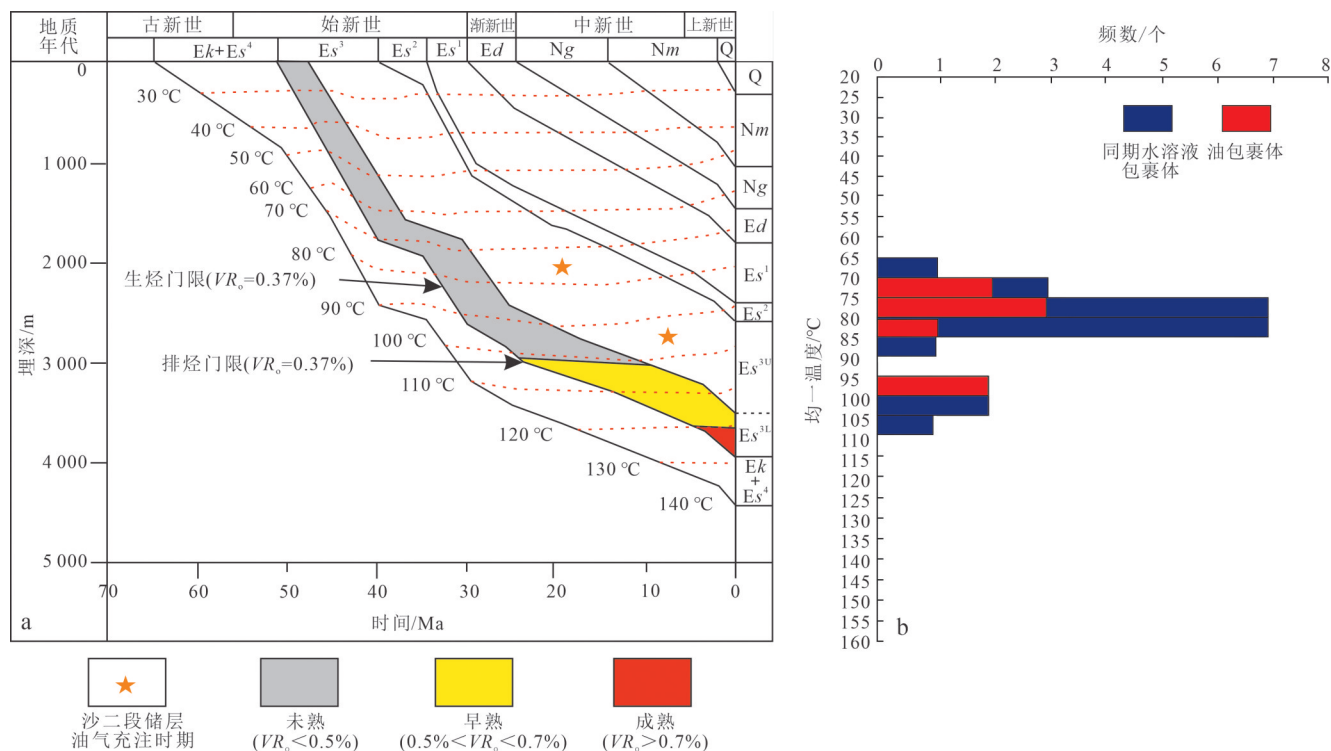


图17 束鹿凹陷烃源岩埋藏史与热史(a)及沙二段均一温度直方图(b)

Fig. 17 A combination map showing the burial history, thermal history of source rocks in the Shulu Sag (a) and the homogenization temperature histogram of the Es²(b)

地层		成藏关键期	成藏期前断裂系统	成藏期内断裂系统
组(段)	代号			
平原组		Qp		
明化镇组	上段	Nm ¹		
	下段	Nm ²		
馆陶组		Ng		
东营组	一二段	Ed ¹⁺²		
	三段	Ed ³		
沙河街组	一段	Es ¹		
	二段	Es ²		
	三段	Es ³		
前古近系盆地基底岩系				

图 18 束鹿凹陷成藏期次与断裂活动期次关系

Fig. 18 Relationship between accumulation periods and fault activity periods in the Shulu Sag

致密油藏,呈现出致密油藏的特征。由于第二期油气的成熟度较高,导致深层油气的密度变小。Es¹, Es²及 Es³浅层在此期间具有良好的保存条件,仍发育常规“牙刷状”油气藏(图 20)。

7 结论

1) 研究区沙河街组“牙刷状”油藏,其主要含油储层孔渗分布由 15 % ~ 30 % 和 $10 \times 10^{-3} \sim 1\,000 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 逐渐过渡为 5 % ~ 25 % 和 $1 \times 10^{-3} \sim 100 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 在 Es³ 层段出现了少量准致密油气藏(孔隙度 < 10 %, 渗透率 < $1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$)。“牙刷状”油藏的形成主要受控于砂岩强烈的非均质性,主要油藏富集于砂质含量大于 0.5 的储层之中,而储层的物性进一步控制了油藏的含油饱和度。

2) 研究区“牙刷状”油藏隔夹层主要为相对致密的砂岩储层,其物性明显小于各含油层系砂岩储层,同时盖层厚度对于油气富集有着一定的正向控制作用。

3) 束鹿凹陷油气主要来自于 Es³ 烃源岩,平面上存在 3 个主要的油气运移方向:北部运移方向为南西北东向;中部运移方向为北东-南南向;南部为南南西-北北东向。断层既是油气平面运移的主要路径,也是油气垂向运移的主要通道,浅部的油气密度较深部大原因可能是原油遭受了一定程度的氧化或生物降解。

4) 馆陶中期研究区经历强烈构造运动并产生了一系列断层,将深层 Es³ 原油运移到浅层,由于断层和砂体走向的配置形成了“牙刷状”油藏,而后期稳定的构造条件也为“牙刷状”油藏的形成提供了良好的保存条件。

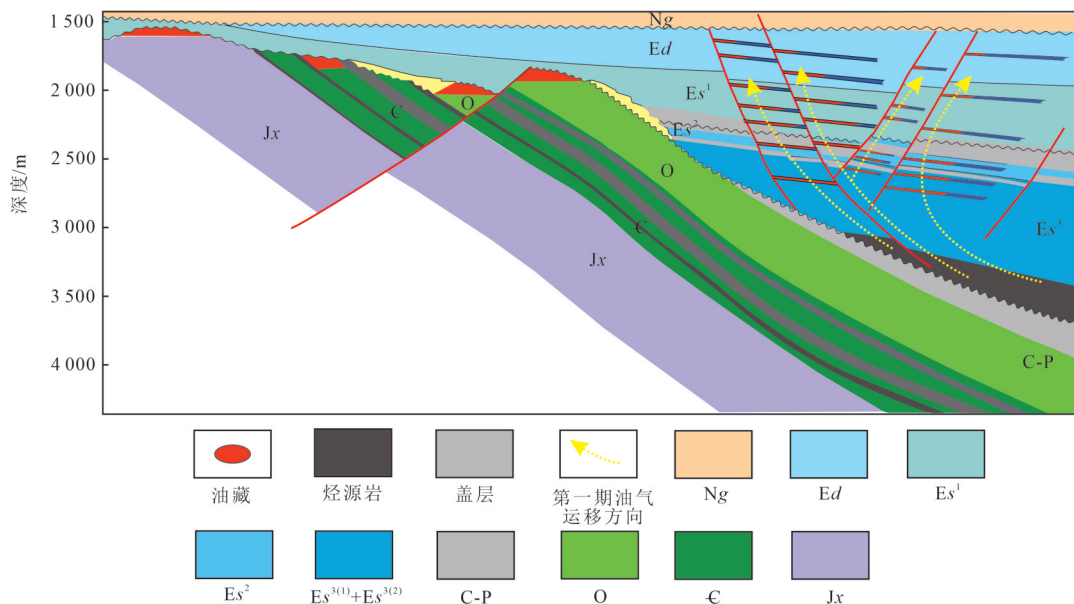


图 19 束鹿凹陷第一期(Ng时期)成藏模式

Fig. 19 Reservoiring pattern of the first hydrocarbon accumulation period (Ng period), Shulu Sag

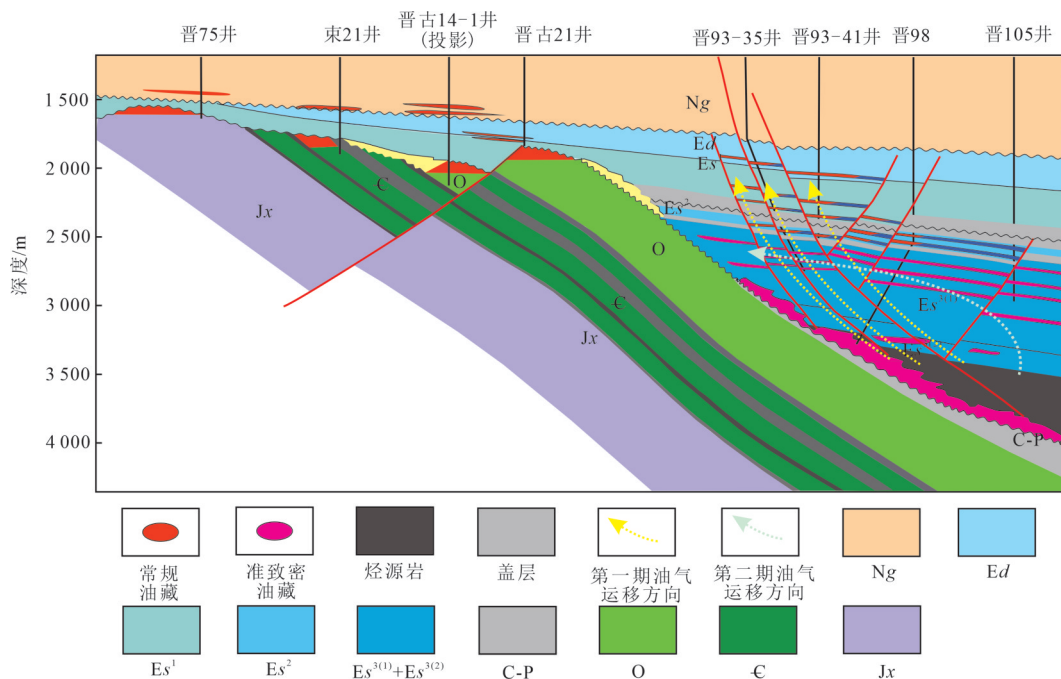


图20 束鹿凹陷第二期(现今)成藏模式

Fig. 20 Reservoiring pattern of the second hydrocarbon accumulation period (the present), Shulu Sag

参 考 文 献

- [1] Wang E Z, Wang Z J, Pang X Q, et al. Key factors controlling hydrocarbon enrichment in a deep petroleum system in a terrestrial rift basin—A case study of the uppermost member of the upper Paleogene Shahejie Formation, Nanpu Sag, Bohai Bay Basin, NE China[J]. Marine and Petroleum Geology, 2019, 107: 572–590.
- [2] Wang E Z, Liu G Y, Pang X Q, et al. An improved hydrocarbon generation potential method for quantifying hydrocarbon generation and expulsion characteristics with application example of Paleogene Shahejie Formation, Nanpu Sag, Bohai Bay Basin[J]. Marine and Petroleum Geology, 2020, 112: 104106.
- [3] 王恩泽, 刘国勇, 庞雄奇, 等. 南堡凹陷中深层碎屑岩储集层成岩演化特征及成因机制[J]. 石油勘探与开发, 2020, 47(1): 321–333.
Wang Enze, Liu Guoyong, Pang Xiongqi, et al. Diagenetic evolution characteristics and genetic mechanism of middle–deep clastic reservoirs in Nanpu Sag[J]. Petroleum Exploration and Development, 2020, 47(1): 321–333.
- [4] Jiang Z, Chen D, Qiu L, et al. Source-controlled carbonates in a small Eocene half-graben lake basin (Shulu Sag) in central Hebei Province, North China[J]. Sedimentology, 2010, 54(2): 265–292.
- [5] 赵贤正, 蒋有录, 金凤鸣, 等. 富油凹陷洼槽区油气成藏机理与成藏模式——以冀中拗陷饶阳凹陷为例[J]. 石油学报, 2017, 38(1): 67–76.
Zhao Xianzheng, Jiang Youlu, Jin Fengming, et al. Hydrocarbon accumulation mechanism and accumulation model in depression area of oil-rich depression——Taking Raoyang Sag in Jizhong Depression as an example[J]. Acta Petrolei Sinica, 2017, 38(1): 67–76.
- [6] 梁星如, 张峰, 李胜利, 等. 华北束鹿凹陷斜坡带沙河街组油气藏分布规律与区带成藏模式[J]. 地质力学学报, 2016, 22(1): 66–75.
Liang Xingru, Zhang Feng, Li Shengli, et al. Distribution of hydrocarbon reservoirs and petroleum accumulation patterns in the shahejie formation[J]. Journal of Geomechanics, 2016, 22(1): 66–75.
- [7] 董伟, 郭志强, 焦立芳, 等. 牙刷状油藏边水驱油影响因素模拟与评价——以冀中拗陷南部束鹿凹陷车城油田为例[C]//西安石油大学, 陕西省石油学会. 2018油气田勘探与开发国际会议 (IFEDC 2018) 论文集. 西安: 西安华线网络信息服务有限公司, 2018: 1435–1442.
Dong Wei, Guo Zhiqiang, Jiao Lifang, et al. Simulation and evaluation of influencing factors of edge water flooding in tooth-brush reservoir——Taking Checheng oilfield in Shulu Sag, Jizhong Depression as an example[C]// Xi'an Petroleum University, Shaanxi Petroleum Society. Proceedings of the 2018 International Conference on Oil and Gas Field Exploration and Development (IFEDC 2018). Xi'an: Xi'an Huaxian Network Information Service Co., Ltd, 2018: 1435–1442.
- [8] Tian J Q, Hao F, Zhou X H, et al. Charging of the Penglai 9–1 oil field, Bohai Bay basin, China: Functions of the delta on accumulating petroleum[J]. Marine and Petroleum Geology, 2014, 57: 603–618.
- [9] Jiang F J, Pang X Q, Li L L, et al. Petroleum resources in the Nanpu sag, Bohai Bay Basin, eastern China[J]. AAPG Bulletin, 2018, 102(7): 1213–1237.
- [10] 蒋有录, 卢浩, 刘华, 等. 渤海湾盆地饶阳凹陷新近系油气富集特点与主控因素[J]. 石油学报, 2011, 32(5): 791–796.
Jiang Youlu, Lu Hao, Liu Hua, et al. Petroleum enrichment characteristics and main controlling factors of the Neogene in Raoyang

- Sag, Bohai Bay Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2011, 32(5): 791-796.
- [11] 王少春. 束鹿凹陷湖相泥灰岩油气藏的形成与分布研究[D]. 北京:中国矿业大学(北京), 2014.
- Wang Shaochun. Lacustrine mari reservoir formation and distribution of Shulu sag [D]. Beijing: China University of Mining and Technology (Beijing), 2014.
- [12] 孔冬艳, 沈华, 刘景彦, 等. 冀中坳陷束鹿凹陷横向调节带成因分析[J]. *中国地质*, 2005, 32(4): 166-171.
- Kong Dongyan, Shen Hua, Liu Jingyan, et al. Origin of the transverse accommodation zone of the Shulu subbasin in the Jizhong depression[J]. *Geology in China*, 2005, 32(4): 166-171.
- [13] 郭增虎, 王鹏, 张敬东, 等. 渤海湾盆地束鹿凹陷新河断层特征及其对成藏影响[J]. *石油地球物理勘探*, 2018, 53(S1): 293-302+19.
- Guo Zengqiang, Wang Peng, Zhang Jingdong. Characteristics of Xinhe faults and its influence on reservoir formation in Shulu Sag, Bohai Bay Basin[J]. *Oil Geophysical Prospecting*, 2018, 53(S1): 293-302+19.
- [14] Morton A C, Hallsworth C R. Identifying provenance specific features of detrital heavy mineral assemblages in sandstones[J]. *Sedimentary Geology*, 1994, 90(3): 241-256.
- [15] 赵红格, 刘池洋. 物源分析方法及研究进展[J]. *沉积学报*, 2003, 21(3): 45-51.
- Zhao Hongge, Liu Chiyang. Approaches and prospects of provenance analysis [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2003, 21(3): 45-51.
- [16] Wang E Z, Pang X Q, Zhao X D, et al. Characteristics, diagenetic evolution and controlling factors of the Es1 deep burial high-quality sandstone reservoirs in the PG2 oilfield, Nanpu Sag, Bohai Bay Basin, China[J]. *Geological Journal*, 2019. <https://doi.org/10.1002/gj.3507>.
- [17] 张智礼, 刘振文, 蒙启安, 等. 松辽盆地泰康地区青山口组沉积相及与油气分布关系研究[J]. *高校地质学报*, 2006, 12(2): 259-265.
- Zhang Zhili, Liu Zhenwen, Meng Qinan, et al. Sedimentary facies and oil gas distribution regularities of the Qingshankou Formation, Taikang Area, Songliao Basin [J]. *Geological Journal of China Universities*, 2006, 12(2): 259-265.
- [18] Wang E Z, Liu G Y, Pang X Q, et al. Sedimentology, diagenetic evolution, and sweet spot prediction of tight sandstone reservoirs: A case study of the third member of the Upper Paleogene Shahejie Formation, Nanpu Sag, Bohai Bay Basin, China[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2020, 186 (106718).
- [19] Pang X Q, Jia C Z, Chen J Q, et al. A unified model for the formation and distribution of both conventional and unconventional hydrocarbon reservoirs[J]. *Geoscience Frontiers*, 2020, 12(2): 695-711.
- [20] 施朝晖, 张金亮, 李森, 等. 苏里格气田苏6区块储层隔夹层发育特征研究[J]. *中国科技论文*, 2019, 14(9): 943-950.
- Shi Chaohui, Zhang Jinliang, Li Miao, et al. Study on the development characteristics of the interlayer of Su6 block in Sulige gas field[J]. *China Sciencepaper*, 2019, 14(9): 943-950.
- [21] 徐寅, 徐怀民, 郭春涛, 等. 隔夹层成因、特征及其对油田开发的影响——以塔中地区海相砂岩储层为例[J]. *科技导报*, 2012(15): 17-21.
- Xu Yin, Xu Huaimin, Guo Chuntao, et al. Origin, characteristics and effects on oilfield development of interlayer of shore sandstone reservoir in TaZhong area [J]. *Science & Technology Review*, 2012(15): 17-21.
- [22] 赵艳军, 刘成林, 张华, 等. 渤海湾盆地束鹿凹陷沙一段石盐岩中流体包裹体特征及其地质意义[J]. *地球科学(中国地质大学学报)*, 2014, 39(10): 1455-1463.
- Zhao Yanjun, Liu Chenglin, Zhang Hua, et al. Characteristics and geological significance of fluid inclusions in Halite of the First Member of Shahejie Formation in Shulu Depression, Bohai Bay Basin [J]. *Earth Science (Journal of China University of Geosciences)*, 2014, 39(10): 1455-1463.
- [23] Chen J Q, Ma Ky, Pang Xq, et al. Secondary migration of hydrocarbons in Ordovician carbonate reservoirs in the Lunnan area, Tarim Basin[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2020. 188(106962).
- [24] 付小东, 吴健平, 寿建峰, 等. 渤海湾盆地束鹿凹陷古近系沙河街组湖相混积泥灰岩致密油储层特征[J]. *石油与天然气地质*, 2019, 40(1): 78-91.
- Fu Xiaodong, Wu Jianping, Shou Jianfeng, et al. Tight oil reservoir characteristics of lacustrine mixed marlstone in the Palaeogene Shahejie Formation of Shulu Sag, Bohai Bay Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2019, 40(1): 78-91.
- [25] 李冬梅. 断陷盆地缓坡带油气富集规律研究[D]. 北京:中国地质大学(北京), 2010.
- Li Dongmei. Research on hydrocarbon enrichment rules of gentle slope in half graben basin[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2010.
- [26] 旷红伟, 覃汉生, 刘俊奇, 等. 束鹿凹陷中部古近系沙河街组第三段下部层序特征[J]. *石油地质与工程*, 2007, 21(6): 26-28+32+10.
- Kuang Hongwei, Qin Hongwei, Liu Junsheng, et al. Stratigraphic sequence features in lower part of the third member of Shahejie formation in the middle part of Shulu sag[J]. *Petroleum Geology and Engineering*, 2007, 21(6): 26-28+32+10.
- [27] 郭建军, 陈践发, 王铁冠, 等. 塔中奥陶系原油的运移方向研究[J]. *西南石油大学学报:自然科学版*, 2008, 30(3): 8-12.
- Guo Jianjun, Chen Jianfa, Wang Tieguan, et al. Oil migration orientation of Ordovician in Tazhong uplift [J]. *Journal of Southwest Petroleum University: Science & Technology Edition*, 2008, 30(3): 8-12.
- [29] 向才富, 王建忠, 庞雄奇, 等. 塔中83井区表生岩溶缝洞体系中油气的差异运聚作用[J]. *地学前缘*, 2009, 16(6): 349-358.
- Xiang Caifu, Wang Jianzhong, Pang Xiongqi, et al. Differential hydrocarbon migration and entrapment in the karstified carbonate reservoir: a case study of well TZ83 block of the central Tarim uplift zone[J]. *Earth Science Frontiers*, 2009, 16(6): 349-358.
- [28] 罗金洋. 束鹿凹陷西斜坡油气输导体系及其成藏贡献研究[D]. 大庆:东北石油大学, 2017.
- Luo Jinyang. Hydrocarbon migration system and its contribution to reservoir Forming in Western Slope of Shulu Sag [D]. Daqing: Northeast petroleum university, 2017.