

东营凹陷古近系浅层稠油油藏封堵机制

操应长^{1,2}, 王铸坤^{1,2}, 王艳忠^{1,2}, 李宇志³, 赵博³

(1. 中国石油大学(华东)地球科学与技术学院, 山东青岛 266580; 2. 海洋国家实验室海洋矿产资源评价与探测技术功能实验室, 山东青岛 266071; 3. 中国石化胜利油田分公司东辛采油厂, 山东东营 257094)

摘要: 东营凹陷古近系浅层稠油油藏封堵机制认识不清的问题已成为制约下步油气勘探的关键。以永北鼻状构造沙三上亚段稠油为例, 根据研究区三维地震、测录井、钻井岩心、岩石薄片、物性测试及试油资料, 结合埋藏史及流体包裹体显微荧光分析, 对古近系浅层稠油油藏的封堵机制进行研究。结果表明: 沙三上亚段稠油主要紧邻不整合面发育, 风化黏土层可作为稠油垂向封堵层; 扇三角洲平原以泥石流沉积为主, 与扇三角洲前缘存在物性分异, 对扇三角洲前缘稠油具有侧向物性封堵作用; 大气淡水的破坏使早期原油发生稠化, 在 10000 mPa·s 原油黏度范围之外形成稠油封堵带或沥青带, 可以侧向封堵下倾方向的原油; 浅层稠油成藏过程划分原始地层沉积、早期原油充注、早期原油稠化、晚期原油充注 4 个阶段; 沙三上亚段稠油油藏发育“两期油气充注、多重封堵机制、油藏分带展布”的成藏模式, 早期低熟油发生稠化形成稠油或沥青, 晚期成熟的稀油与早期稠油部分混合, 由扇三角洲平原向扇三角洲前缘依次展布沥青带、混合带、稀油带。

关键词: 封堵机制; 稠油; 不整合; 沙三上亚段; 永北鼻状构造; 东营凹陷

中图分类号: TE 122.2 **文献标志码:** A

引用格式: 操应长, 王铸坤, 王艳忠, 等. 东营凹陷古近系浅层稠油油藏封堵机制 [J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2018, 42(4): 11-22.

CAO Yingchang, WANG Zhukun, WANG Yanzhong, et al. Sealing mechanism of heavy oil reservoir in shallow Palaeogene Formation, Dongying Sag [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2018, 42(4): 11-22.

Sealing mechanism of heavy oil reservoir in shallow Palaeogene Formation, Dongying Sag

CAO Yingchang^{1,2}, WANG Zhukun^{1,2}, WANG Yanzhong^{1,2}, LI Yuzhi³, ZHAO Bo³

(1. School of Geosciences in China University of Petroleum (East China), Qingdao 266580, China;

2. Laboratory for Marine Mineral Resources, Qingdao National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao 266071, China;

3. Dongxin Oil Production Plant, Shengli Oilfield Branch Company Limited, SINOPEC, Dongying 257094, China)

Abstract: The sealing mechanism of the heavy oil reservoir in shallow palaeogene formation of the Dongying sag has not been addressed clearly, which has become a key factor impeding further oil and petroleum exploration in the area. Taking the heavy oil reservoir of the Es₃^s formation in the Yongbei nose-like structure as an example, its sealing mechanism was systematically studied combining 3D-seismic interpretation, well logging analysis, cores and thin sections observation, physical properties analysis and oil testing, as well as burial history and fluorescence of fluid inclusion analyses. The results suggest that the heavy oil reservoir is mainly distributed under the unconformity surface, and the weathered clay rock could act as a vertical sealing layer. Mainly composed of debris flow sediments, the fan delta plain could seal the heavy oil developed in the fan delta front on account of the physical properties difference between overlying subfacies. With destruction of meteoric water leading to thickening of the earlier oil, a sealing belt composed of heavy oil or asphalt, whose viscosity exceeds 10000 mPa·s, could seal oil downward. The process to form

收稿日期: 2017-11-10

基金项目: 国家科技重大专项(2016ZX05006-007, 2016ZX05006-003); 中央高校基本科研业务费专项(15CX08001A)

作者简介: 操应长(1969-), 男, 教授, 博士, 博士生导师, 研究方向为沉积学、层序地层学、油气储层地质学。E-mail: cyc8391680@163.com。

通信作者: 王铸坤(1990-), 男, 博士研究生, 研究方向为油气储层地质学。E-mail: wangzhukun1126@163.com。

heavy oil reservoir is divided into four periods, including deposition of original formation, charging of early oil, thickening of earlier oil, and charging of later oil. The accumulation model of the heavy oil reservoir is built accordingly. The earlier low-mature oil is thickened to form heavy oil or asphalt, then, the later mature oil or thin oil charges to mix with the foregoing thickened oil partially, leading to the distribution of asphalt belt, mixing belt, and thin oil belt from fan delta plain to front, respectively.

Keywords: sealing mechanism; heavy oil; unconformity; E_3^s formation; Yongbei nose-like structure; Dongying Sag

世界上稠油资源十分丰富,地质储量远高于常规原油^[1]。济阳拗陷是位于渤海湾盆地东南部的富油拗陷,经过50多年的勘探开发已在拗陷周缘及凸起带发现大量稠油资源,在相当长的时间内将成为胜利油区增储上产的重点领域和稳产类型^[2]。东营凹陷是济阳拗陷油气聚集最丰富的含油气区,在北部陡坡带已发现林樊家、单家寺、陈家庄、王庄等富稠油油气田^[2]。北带东段的永北鼻状构造全部探井都钻遇较好的稠油显示,经勘探证实研究区稠油具有较大潜力,但是稠油油藏封堵机制不明确导致研究区储量规模一直未能落实。笔者依据永北鼻状构造沙三上亚

段稠油勘探实践,对东营凹陷稠油油藏封堵机制进行研究,旨在指导研究区下步油气勘探,同时对东营凹陷古近系浅层稠油油藏的勘探提供新的思路。

1 地质背景

永北鼻状构造位于东营凹陷北部陡坡带的东段,北靠陈家庄凸起,东接青坨子凸起,南部经永北断裂带与民丰生油洼陷相邻(图1)。东营凹陷经历了多期幕式构造运动,古近纪末东营运动导致凹陷整体抬升剥蚀^[3],形成区域性发育的T1构造不整合。由于盆地边界断裂活动存在差异性^[4],永北鼻

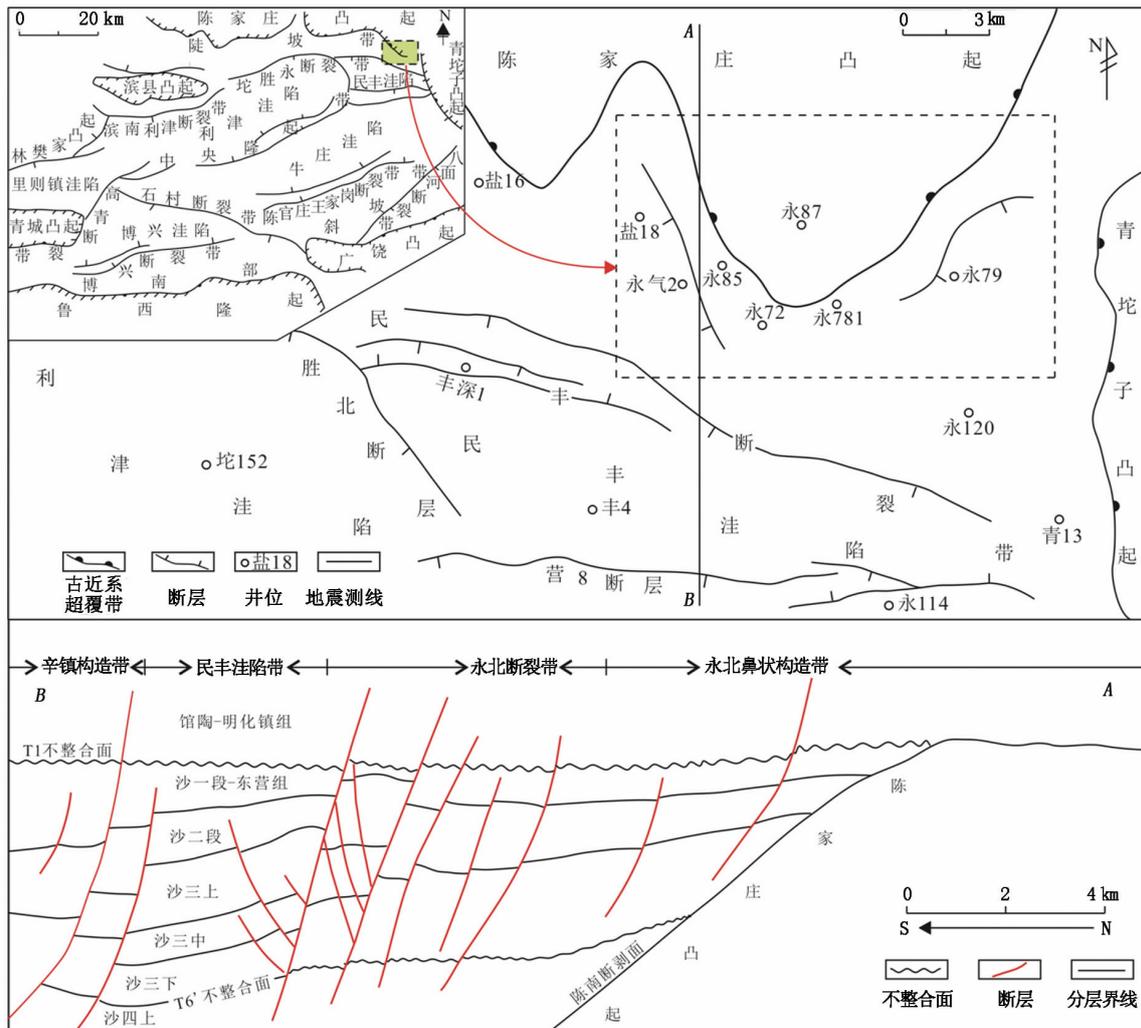


图1 东营凹陷永北鼻状构造位置

Fig. 1 Location of Yongbei nose-like structure in Dongying Sag

状构造由上往下缺失了东营组、沙一段、沙二段及沙三上亚段的顶部, T1 构造不整合面之上新近系馆陶组地层直接与沙三段对接, 形成超过 10 Ma 的沉积间断^[5]。

研究区沙三上亚段发育扇三角洲沉积体系, 反映沉积坡度大、近物源、水体能量强的沉积特征。砂岩类型主要为岩屑质长石砂岩和长石质岩屑砂岩, 成熟度低。扇三角洲平原岩性最粗, 类似于冲积扇沉积, 主要发育厚层块状杂基支撑砾岩; 扇三角洲前缘表现为顺物源方向砾质砂岩、含砾砂岩向含砾砂岩、砂岩、泥岩互层的过渡, 单砂层正序, 测井曲线为箱形、钟形, 反映水下河道发育的特点^[6]; 前扇三角洲发育在正常浪基面之下, 主要沉积厚层泥岩夹薄层砂、砂泥互层。

2 稠油物性特征及试油效果

永北鼻状构造沙三上亚段稠油紧邻 T1 不整合面分布, 原油黏度(在油藏条件下的脱气油黏度)最大为 13 798 mPa·s, 最小为 418 mPa·s, 平均值为 5 371 mPa·s; 原油密度最大为 1.013 g/cm³, 最小值为 0.911 g/cm³, 平均值为 0.971 g/cm³; 原油凝固点较高, 最高为 40 ℃, 最低为 -8 ℃, 平均温度为 8.25 ℃, 具有稠油典型的高黏度、高密度及高凝固点特征, 部分稠油可达到特稠油或沥青级别^[1,7]。

试油资料可以提供最为可靠的含油信息^[8], 但是研究区探井多为老井, 受试油工艺、油层条件的制约, 大多数井试油未能取得突破。永北鼻状构造沙三上亚段稠油的试油结论以水层和干层为主, 油水同层和含水水层的比例仅占 15%, 油层的比例为 0, 主要是稠油黏稠、不易流动导致试油不出造成的。例如, 永 72 井在不整合面之下 5 m 进行试油, 原油黏度为 5 336 mPa·s, 密度为 0.988 g/cm³, 测井解释结论为油层, 但是试油结论为含水水层, 原油日产量仅为 0.2 t, 日产水 20.2 t; 永 75 井在不整合面之下 3 m 试油, 原油黏度为 13 798 mPa·s, 密度为 1.013 g/cm³, 测井解释结论为油水同层, 试油结论为稠油无法开采, 日产油量和产水量皆为 0; 最新完钻的永斜 852 井通过压裂化学冷采试油, 获得日产量 1.62 t 的工业油流。可以看出, 传统试油已无法提供油气分布及富集程度的可靠指标, 明确研究区稠油油藏封堵机制及成藏模式, 采用可行的试油方法, 是下步勘探工作的重点。

3 浅层稠油油藏封堵机制

结合油藏发育位置、成藏主控因素及成藏期分析, 认为不整合结构风化黏土层、扇三角洲平原泥石流沉积、沥青带共同对稠油油藏进行封堵。

3.1 不整合结构风化黏土层垂向封堵性

3.1.1 不整合结构的识别

不整合发育与构造活动紧密关联, 是原始地层抬升、剥蚀后形成风化壳或风化带, 经后期埋藏、多种地质作用不同程度改造而形成的具有分层结构的地质体^[9-10]。永北鼻状构造西翼永 85 井取心较为连续, 测、录井资料齐全, 分析化验数据丰富, 可作为研究区不整合结构的典型井。岩心是研究不整合结构最直接、最可靠的资料, 但是受到取心情况的限制很难观察到完整的不整合结构。

在系统观察永 85 井 91.27 m 岩心的基础上, 识别出厚度较大的半风化淋滤层及未风化层, 风化黏土层未获得岩心。半风化淋滤层、未风化层岩性皆以砾质砂岩与含砾砂岩互层为主, 杂基整体含量较高(图 2)。半风化淋滤层顶部发育土黄色含砾砂质泥岩, 砾石和砂质颗粒以石英为主, 颗粒之间充填大量杂基, 岩石疏松易碎, 其含油性从上到下具有规律性变化: 顶部岩石不含油但有原油气味(图 2(a)); 上部为油迹级别, 含油极不均匀, 呈斑块状或条带状分布(图 2(b)); 中上部为油斑—油浸级别, 含油较为饱满, 呈斑块状分布, 含油部分看不见岩石本色(图 2(c)); 中部为饱含油级别, 含油饱满、均匀, 岩石完全被染成灰褐色(图 2(d)); 下部为油斑级别, 含油不饱满、不均匀, 多呈斑块状和线状分布(图 2(e)); 底部不含油, 呈岩石本色(图 2(f))。

岩性、组分、形成环境的差异导致不整合面上、下地层测井响应特征不同, 因此根据测井响应特征结合岩性特征可以精细描述不整合的结构^[11-12]: 风化黏土层声波时差、密度测井、井径测井为异常高值, 深、浅侧向电阻率无明显幅度差; 半风化淋滤层声波时差、井径测井随深度增加而减小, 密度测井随深度增加有增大的趋势, 深、浅侧向电阻率存在明显幅度差; 未风化层各系列测井值变化不大, 双侧向电阻率测井无幅度差(图 3)。孔隙度剖面显示半风化淋滤层物性有大幅改善, 表明该层受到大气水的淋滤作用导致储集空间增加。



图2 永北鼻状构造带不整合结构岩心特征

Fig.2 Cores characteristics of unconformity structure of the Yongbei nose-like structure

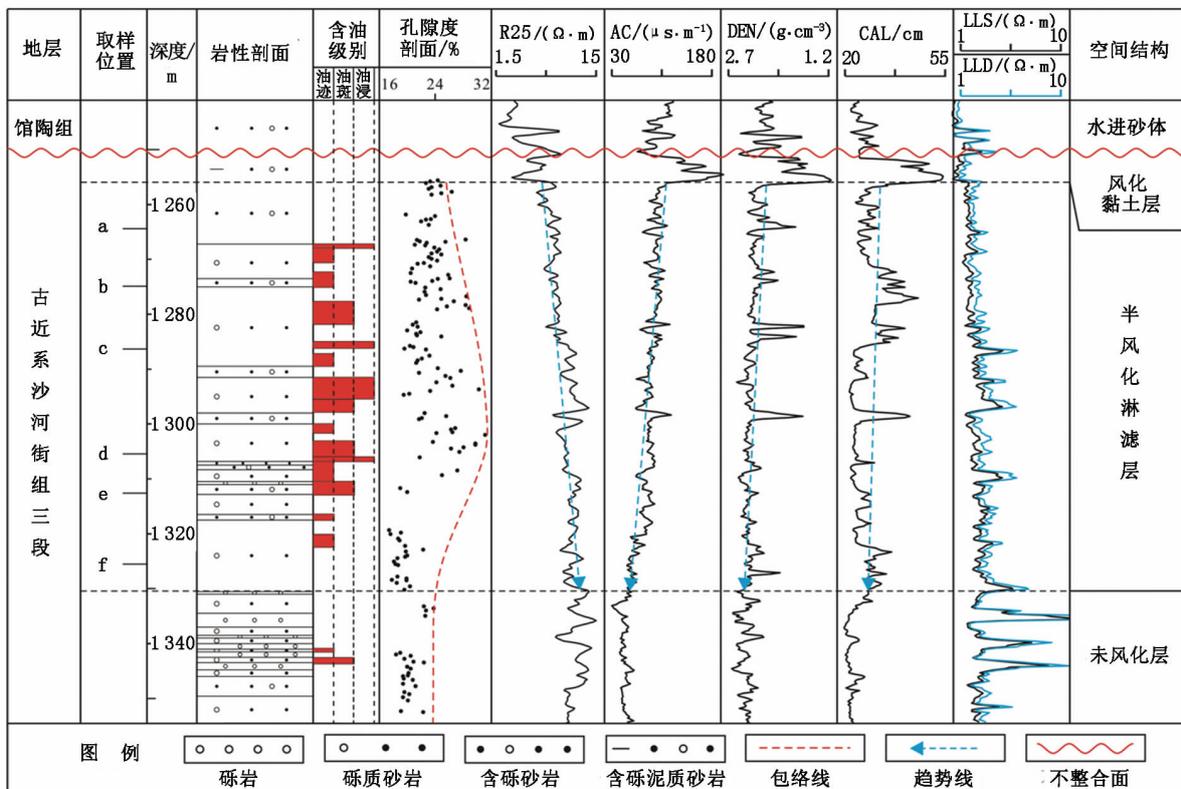


图3 永北鼻状构造永85井不整合结构分层

Fig.3 Layers of unconformity structure of well Yong 85 in Yongbei nose-like structure

3.1.2 不整合风化黏土层封堵性

永北鼻状构造沙三上亚段稠油层平均厚度超过 50 m,其中鼻状构造西翼的永 781 井含油层厚为 175 m,砂砾岩层都含油,岩心上可见到裂缝中的沥青脉、大套稠油油斑;稠油层厚度最小为 12 m,发育在鼻状构造东翼的永 72 井。通过分析永北鼻状构造稠油富集特征(表 1),发现沙三上亚段稠油主要紧邻不整合面富集,不整合面以上的馆陶组砂砾岩储层无油气显示或零星含油,因此稠油的赋存与风化黏土层的垂向封堵密切相关。

表 1 永北鼻状构造不整合面下含油差异性统计

Table 1 Statistics of oiliness difference under unconformity surface in Yongbei nose-like structure

井号	构造位置	不整合面深度/m	风化黏土层厚度/m	半风化淋滤带含油性	半风化淋滤带含油厚度/m	水进砂体含油性
永 72	西翼	1311.0	6	含油	37	—
永 75	西翼	1244.0	1.5	含油	12	油斑
永 85	西翼	1248.5	19	含油	55	—
永气 2	西翼	1364.0	15	—	—	—
永 781	东翼	1180.8	2	大套油斑	175	—
永斜 851	西翼	1350.5	8	—	—	—
永斜 852	西翼	1368.5	7	含油	89	—

永北鼻状构造不整合埋藏深度小于 1300 m,压实强度较弱,风化黏土层致密程度低,具有较低的突破压力,难以封堵常规轻质油藏。前已述及,研究区油藏具有高黏度、高密度、高凝固点的特征,较高的原油黏度和密度可以弱化顶板的封堵条件,使顶板岩石在较低的排替压力下仍然可以封堵油藏。若风化黏土层无法封堵下伏稠油油藏,原油在运移动力作用下突破黏土层向上覆地层逸散,不整合面之上的砂体普遍会有油气显示。永北鼻状构造不整合面以上主要发育不含油砂体,仅永 75 井有油斑显示(表 1),可以认为风化黏土层仍然对下伏高密度、高黏度的稠油进行有效封堵。

3.2 扇三角洲平原侧向封堵性

3.2.1 扇三角洲平原与前缘物性差异

扇三角洲平原以泥石流沉积为主,发育大套稠油油斑中砾岩,颗粒磨圆较好但分选极差(图 4(a)、(b)),储集空间以杂基间孔隙为主且多被沥青充填,原生孔隙残余极少,导致物性较差(图 4(d));扇三角洲前缘砂体主要发育牵引流沉积,平行层理较为发育,分选磨圆较好(图 4(c)),抗压实能力强,原生孔隙含量高(图 4(e)),面孔率高,物性较好。实测物性统计表明,扇三角洲平原砾岩孔隙度为 12.6%,扇三角洲前缘孔隙度平均值高于 23%,

显示不同沉积相带之间存在显著的物性分异。

3.2.2 扇三角洲平原侧向封堵性

深层、中深层砂砾岩体(如近岸水下扇)在埋藏演化过程中,扇根压实、杂基重结晶和黏土矿物转化等破坏性成岩作用强,溶蚀成岩作用弱,扇根物性差导致排替压力大,进而对扇中的油藏起到侧向封堵作用^[13]。刘鑫金等^[13]通过统计东营凹陷北部陡坡带砂砾岩油藏含油性与储层物性的关系,得出中深层高充满带(地层原油密度 ρ_o 介于 0.85~0.89 g/cm³;地层原油黏度 μ_o 介于 10~3000 mPa·s)有效封堵物性下限孔隙度约为 5%,而浅层稠油带(ρ_o 介于 0.95~1.02 g/cm³; μ_o 介于 8~15 Pa·s)有效封堵的孔隙度下限提高到 17.3%。

在总结前人研究基础上,认为永北鼻状构造浅层扇三角洲平原砂砾岩可以在一定程度上封堵扇三角洲前缘的稠油,封堵的本质是流体性质。首先,扇三角洲平原砾岩与扇三角洲前缘砂砾岩之间存在沉积主控的物性差异,流体由扇三角洲前缘向扇三角洲平原砂体运移会受到更大的阻力,其次当动力黏度、密度增大时,流体进入扇三角洲平原砂体需要克服更高的排驱压力。永 781 井扇三角洲平原亚相发育典型的泥石流沉积,实测孔隙度仅为 12.6%,远低于前人提出的封堵下限孔隙度 17.3%。此外,录井、钻井岩心显示大套稠油油斑,测井解释成果为干层,而扇三角洲前缘相带物性好,测井解释以水层和含油水层为主,显示为较好的储层。

3.3 稠油封堵带侧向封堵性

3.3.1 稠油侧向封堵性研究方法

国外学者早在 20 世纪 50 年代已提出稠油可作为油藏封堵条件^[14],国内许多学者也认为,稠油油性稠化、黏度大的特征可以使其自行封堵或遮挡稠油层下倾方向、晚期充注的稀油^[15-16]。然而,对稠油封堵作用仍以定性描述或现象表征为主,尚未从定量与动态演化的角度来系统研究稠油封堵问题。

有研究表明,大气淡水的下渗深度在不同地区差别很大,可以从数米至上千米,某些地方甚至为 2~3 km^[17-19]。古近系时期陈南断层的持续活动导致大气淡水沿断层面下渗,对断层面附近的原油氧化、水洗导致油性变稠。分析认为,原油油性受不整合与断层的双重控制,永北鼻状构造稠油的黏度、密度空间分布特征应具有如下特点:①鼻状构造的高部位由于距离断层、不整合面最近,稠油应具最大的黏度与密度,沿地层下倾方向密度、黏度降低;②断层与不整合面对原油的稠化效应具有补偿性,距离

不整合面近、距离断层远的原油物性点,其物性值的等效点应距离不整合较近、距离断层较远。通过沙三上亚段试油数据统计,绘制每个试油数据点距断

层的距离(D)和距不整合面距离(H)的关系图,分析原油物性随 D 和 H 的变化关系(图5)。

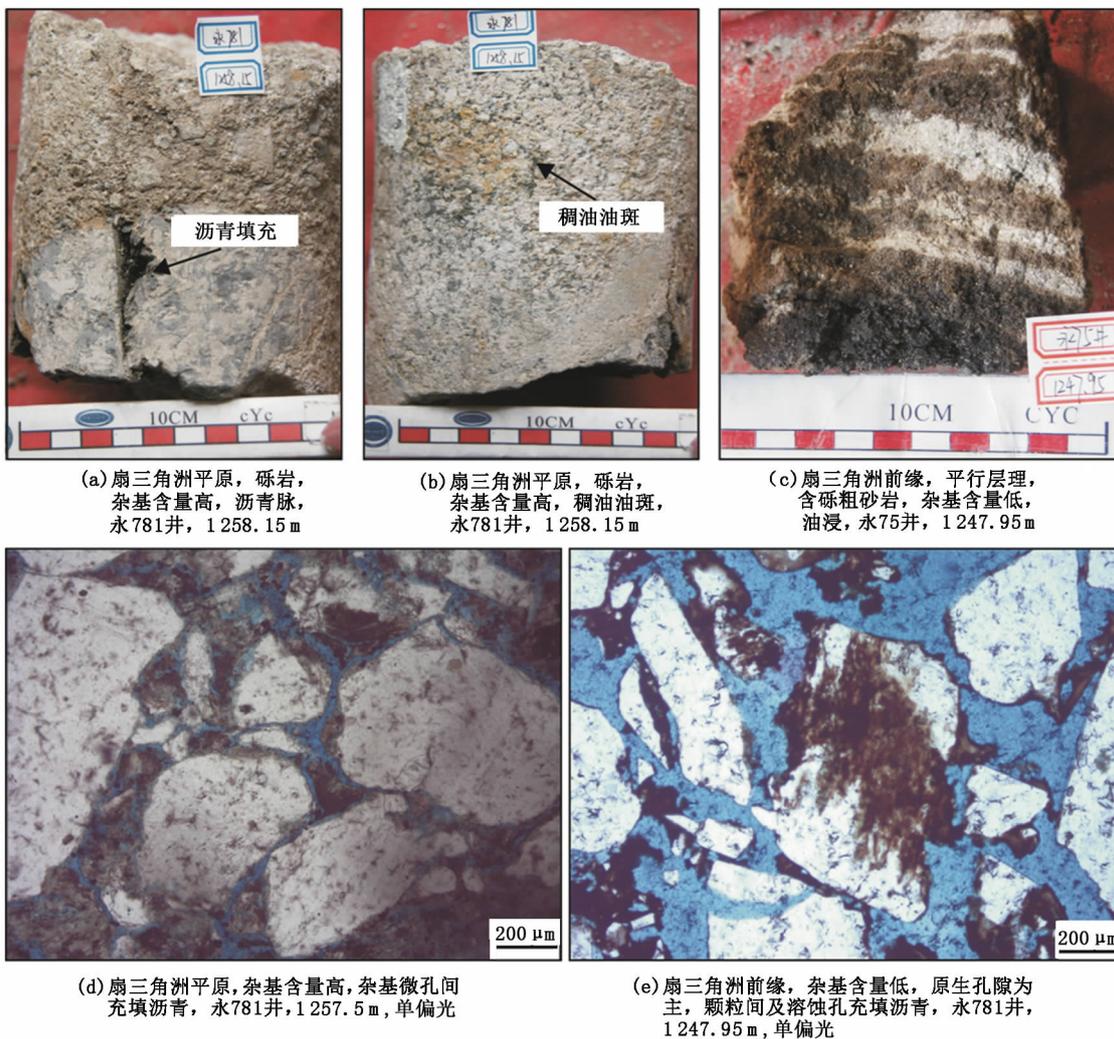


图4 永北鼻状构造沙三上扇三角洲平原-前缘物性差异

Fig. 4 Reservoir properties characteristics of fan-delta plain and front subfacies in Es_3 formation of Yongbei nose-like structure

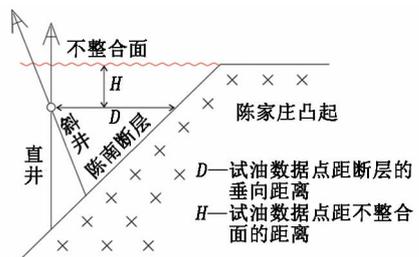


图5 稠油封堵研究示意图

Fig. 5 Sketch map for plugging study of thickened oil

3.3.2 稠油侧向封堵性分析

通过对永北鼻状构造沙三上亚段地层原油黏度、密度数据投点分析,发现距断层、不整合面越近,原油黏度和密度越大。分析认为,在5336~13798

mPa·s黏度等值线之间的10000 mPa·s黏度等值线与不整合面、断层形成稠油封堵带,此带内原油黏度超过10000 mPa·s(图6(a)),密度可超过1.0 g/cm³(图6(b))。该黏度范围的稠油可称为沥青^[7,20],故稠油带也称为沥青带。

通过分析原油物性的变化规律发现,在10000 mPa·s黏度等值线的位置出现突变现象,原油黏度值增加1个数量级,由5336 mPa·s急剧增大到13798 mPa·s,增量超过8000 mPa·s(图6(a))。前人对东营凹陷成藏已形成较为成熟和统一的认识^[21],东营组末期为低成熟度原油充注,规模小,馆陶末-明化镇组时期是东营凹陷主要成藏时期,为

成熟原油的充注,充注规模大。初步分析稠油黏度的突变现象是物性不同的原油混合导致:①研究区存在两期原油充注,早期原油发生稠化形成高黏度、高密度特征;②晚期原油黏度较小,对早期形成的稠油进行一定程度的稀化,稀化作用前锋在 10 000 mPa·s 黏度等值线附近。

流体包裹体是矿物形成或愈合过程中捕获的提

供矿物生长的成岩成矿流体和烃类流体,是成岩成矿“原始样品”,包括盐水包裹体、烃类包裹体和含烃包裹体^[22]。有机包裹体内部所含的有机质成分根据热演化程度不同在紫外光照射下表现出不同的荧光特征,荧光颜色的变化为红色—橙色—黄色—绿色—蓝白色—白色,反映了有机质由低成熟向高成熟演化^[23-24]。

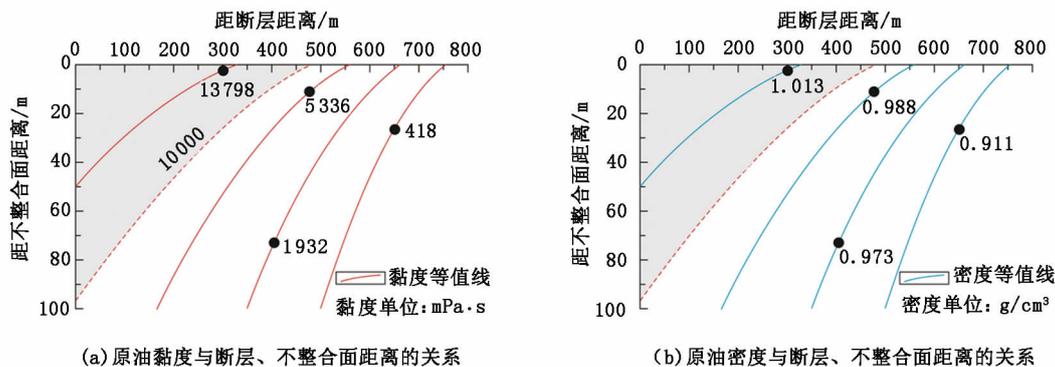


图 6 原油物性与距断层、不整合面距离的关系

Fig. 6 Relationship between oiliness of crude oil and its distance from fault and unconformity surface

永北鼻状构造沙三上亚段流体包裹体个体变化较大(直径分布在 1~10 μm),个别可达到 20 μm。形态多呈圆形、椭圆形、长柱形,可见固相、气-液两相、液-固两相、气-液-固三相等多种相态。研究区包裹体只在石英愈合裂缝产出,单偏光下多呈无色-褐色,含固态沥青的包裹体单偏光下呈黑色。紫外光照射下存在两种荧光颜色,一种是代表高成熟度的蓝白色荧光,另一种是代表低成熟度的黄绿色荧光,固态沥青不发荧光,呈黄绿色荧光的流体包裹体数量占多数,沥青常存在于黄绿色荧光的包裹体中形成气-液-固或液-固两种包裹体(图 7)。有学者^[25]认为部分发蓝白色荧光的油包裹体为早期捕获的低成熟度油包裹体经历高温裂解的结果,但研究区沙三上亚段历史时期未发生过深埋藏和火山作用,因此应用荧光颜色即可定性判别烃类的成熟度。分析认为,包裹体中沥青与黄绿色荧光烃类普遍共生的现象(图 7(c)、(d)),说明东营凹陷抬升引起的地层泄压,早期流体包裹体破裂、泄露,有机质遭受生物降解和水洗,此外,含沥青包裹体与蓝白光烃类包裹体共生现象验证了原油黏度突变现象是早期稠化的低熟油与晚期高成熟油先后充注、混合稀释形成的。

4 浅层稠油成藏模式

4.1 稠油成藏阶段

通过研究构造演化阶段-不整合发育阶段-成

藏阶段的匹配关系,认为研究区稠油成藏可划分 4 个演化阶段(图 8、9):

(1) 原始地层沉积阶段。沙三段沉积时期,可容空间先增大后减小,沉积砂体类型由早期的近岸水下扇过渡为晚期发育的扇三角洲,砂体展布范围广、连通性较好,是有利的油气储层和输导层。湖盆范围持续缩小,水体变浅,沙二段—东营组先后沉积了河流—湖泊—三角洲地层序列(图 8(a)、图 9 中 a)。

(2) 早期原油充注阶段。沙四上亚段烃源岩在东营组沉积中后期进入生烃门限,排出的低熟油沿永北断裂带向浅层运移。该阶段可进一步划分两个次一级阶段:①油气运移阶段,由于盆缘位置沉积的沙二段—东营组地层总体厚度小,且作为区域性盖层的沙一段、东营组泥岩埋藏浅,未经过较强压实固结,封堵性能差。早期原油在运移、充注的过程中轻烃组分不断散失,黏度、密度逐渐增大,但此时原油物性仍较好,扇三角洲平原砂砾岩不能对其进行封堵(图 8(b)、图 9 中 b₁);②早期抬升阶段,早期原油继续向浅层运移,沉积地层开始暴露于地表,大气淡水沿陈南断层或垂直渗入地层,原油黏度显著增加,扇三角洲平原开始形成侧向封堵,此阶段延续至油气充注中断(图 8(b)、图 9 中 b₂)。

(3) 早期原油稠化阶段。地层发生强烈抬升,东营组、沙河街组地层不断被剥蚀,早期原油遭受严

重破坏,靠近陈家庄凸起的扇三角洲平原原油完全稠化为沥青,形成侧向封堵。扇三角洲前缘岩性较细,分选磨圆偏好,在大气淡水淋滤作用下形成溶蚀孔隙发育区(不整合半风化淋滤层),同时风化

黏土层形成。此阶段是早期原油的主要稠化阶段,发生时间延续至构造抬升过程中断(图8(c)、图9中c)。

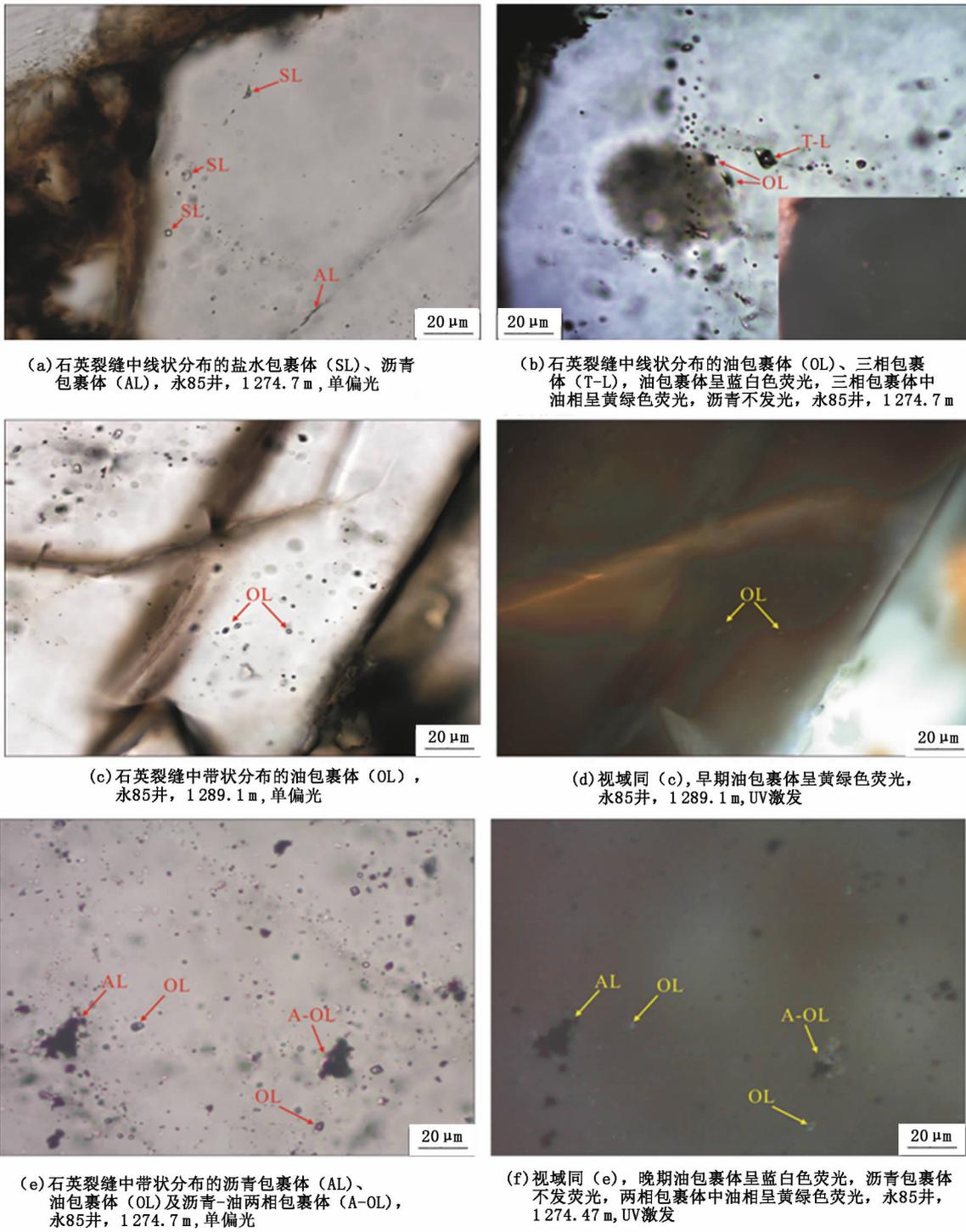


图7 永北鼻状构造沙三上亚段流体包裹体显微荧光特征

Fig. 7 Photomicrographs of fluid inclusions in Es₃^s of Yongbei nose-like structure

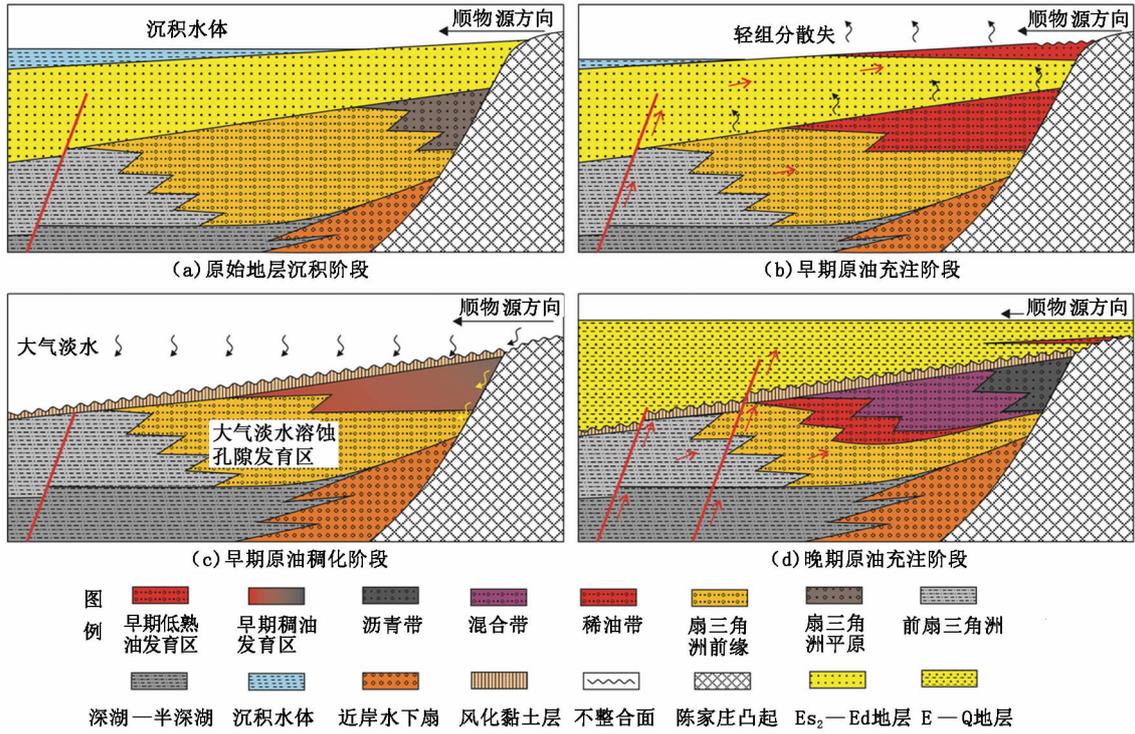
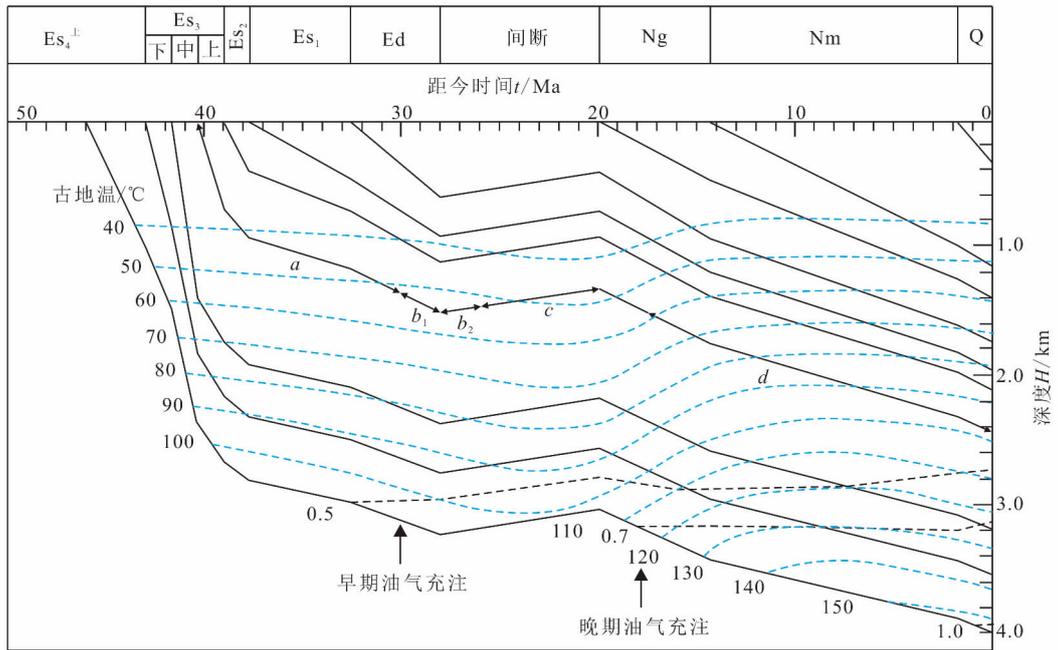


图 8 永北鼻状构造稠油封堵演化模式

Fig. 8 Evolution of plugging stages of thickened oil in Yongbei nose structure



a—原始地层沉积阶段；b—早期原油充注阶段，此阶段充注低熟油；b₁—油气运移阶段，b₂—早期抬升阶段；c—早期原油稠化阶段，此阶段早期稠油完全稠化；d—晚期原油充注阶段，此阶段充注成熟-高成熟油

图 9 东营凹陷埋藏史及油气充注史曲线(据文献[5],有修改)

Fig. 9 Histories of burying and oil charging of Dongying Sag(After citation [5],modified)

(4) 晚期原油充注阶段。东营凹陷在新近纪进入全面热沉降时期,馆陶组沉积中后期至明化镇组时期,沙四上段、沙三段烃源岩陆续进入成熟—高成熟阶段,开始大规模排出成熟原油(稀油)。晚期

原油向浅层沙三上亚段充注时优先进入物性较好的不整合半风化淋滤层与早期稠油混合成藏,最终形成“沥青带—混合带—稀油带”的分带特点。沥青带主要发育在早期物性差、沥青充填的扇三角洲平原,

混合带主要存在于早期物性好、晚期风化淋滤层发育的扇三角洲前缘后部,稀油带发育在早期物性好、稠油未充注的扇三角洲前缘的前部。同时,部分油气可沿永北断裂带中的继承性断层进入新近系馆陶组和明化镇组,在盆缘位置形成一定规模的地层超覆油气藏(图8(d)、图9中d)。

4.2 成藏模式

建立永北鼻状构造“两期油气充注、多重封堵机制、油藏分带展布”的稠油成藏模式(图10)。研究区经历东营组末期低熟油及馆陶—明化镇组成熟油两期充注,油藏由顶部风化黏土层、侧向扇三角洲平原与沥青带共同封堵,平面上形成沥青带—混合带—稀油带分带性特征。沥青带主要发育在距陈南断层和不整合面近的扇三角洲平原位置,沉积作用

以泥石流为主,杂基含量高,沥青充填孔缝,原油物性最差;混合带主要发育在半风化淋滤层发育的扇三角洲前缘的主体位置,是早期稠油与晚期稀油混合充注的产物,原油物性较好,是当前重点勘探目标;稀油带处于混合带前部,预测发育位置在扇三角洲前缘地层的下倾部位,原油物性最好,但探井数量少,尚未发现储量。

盆地模拟结果表明,东营凹陷古近纪末期生烃量占总生烃量的1/3,排烃量占总排烃量的10%,新近纪是烃类大量生成期,生烃量约占总生烃量的2/3,排烃量约占总排烃量的90%^[20],推测东营凹陷古近系浅层稀油储量仍有很大升级空间,因此除稠油勘探外应加强稠油地层下倾方向的稀油油藏勘探,深化东营凹陷油气勘探理论与实践。

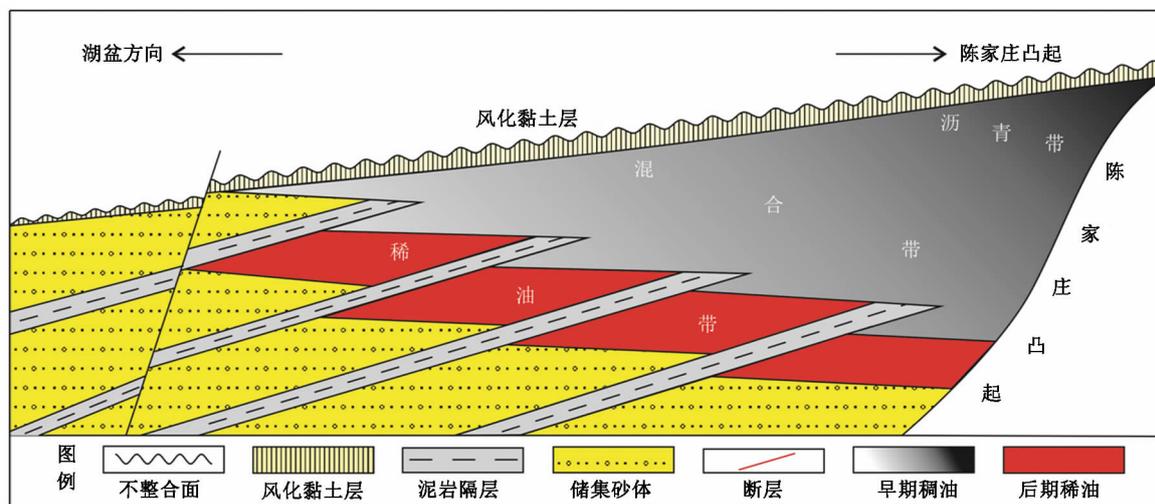


图10 永北鼻状构造油气成藏模式

Fig. 10 Accumulation model of thickened oil of Yongbei nose-like structure

5 结论

(1) 永北鼻状构造不整合结构发育水进砂层、风化黏土层、半风化淋滤层三层结构,风化黏土层对沙三上亚段稠油油藏具有垂向封堵作用,扇三角洲平原对扇三角洲前缘高黏度、高密度的稠油起到侧向封堵作用,东营组充注的早期低熟油在运移及盆地抬升的过程发生稠化,可以侧向封堵馆陶—明化镇时期充注的晚期成熟油。

(2) 稠油油藏演化划分为原始地层沉积、早期原油充注、早期原油稠化、晚期原油充注4个阶段,其中早期原油充注阶段可进一步划分油气运移与早期抬升两个次级阶段。油气运移阶段油气以轻烃散失为主;早期抬升阶段原油开始稠化,扇三角洲平原开始形成侧向封堵;早期原油稠化阶段形成风化黏

土层垂向封堵、扇三角洲平原泥石流封堵与早期稠油侧向封堵,同时扇三角洲前缘次生孔隙发育区形成;晚期原油充注阶段发生稀油与早期稠油混合,形成沥青带、混合带与稀油带规律性展布的油藏分带特征。

(3) 在建立稠油封堵机制与成藏模式的基础上,改善稠油试油工艺、利用地球物理反演和地震属性等技术对含油层位进行识别,可准确落实古近系浅层的稠油、稀油储量。

参考文献:

[1] 张凯,李阳,王琳娜,等.稠油流变特性实验研究[J].油气地质与采收率,2007,14(5):91-94.
ZHANG Kai, LI Yang, WANG Linna, et al. Experimental study on rheological characteristics of heavy oil [J].

- Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2007, 14(5): 91-94.
- [2] 王兴谋,张云银,张明振,等. 关于济阳拗陷浅层气藏与稠油油藏联合勘探的思考[J]. 油气地质与采收率, 2014, 21(5): 14-17.
WANG Xingmou, ZHANG Yunyin, ZHANG Mingzhen, et al. An approach of exploring shallow gas and heavy oil in Jiyang depression based on their paragenetic relationship [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2014, 21(5): 14-17.
- [3] 冯有良,周海民,任建业,等. 渤海湾盆地东部古近系层序地层及其对构造活动的响应[J]. 中国科学(地球科学), 2010, 40(10): 1356-1376.
FENG Youliang, ZHOU Haimin, REN Jianye, et al. Palaeogene sequence stratigraphy in the east of the Bohai Bay Basin and its response to structural movement (in Chinese) [J]. Scientia Sinica (Terra), 2010, 40(10): 1356-1376.
- [4] 隋风贵,王学军,卓勤功,等. 陆相断陷盆地地层油藏勘探现状与研究方向:以济阳拗陷为例[J]. 油气地质与采收率, 2007, 14(1): 1-6.
SUI Fenggui, WANG Xuejun, ZHUO Qingong, et al. Current exploration situation and research trend of stratigraphic reservoirs in continental fault basin: taking Jiyang Depression as an example [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2007, 14(1): 1-6.
- [5] 朱光有,金强,戴金星,等. 东营凹陷油气成藏期次及其分布规律研究[J]. 石油与天然气地质, 2004, 25(2): 215-218.
ZHU Guangyou, JIN Qiang, DAI Jinxing, et al. A study on periods of hydrocarbon accumulation and distribution pattern of oil and gas pools in Dongying Depression [J]. Oil & Gas Geology, 2004, 25(2): 215-218.
- [6] 张阳,邱隆伟,李际,等. 基于模糊C均值地震属性聚类的沉积相分析[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2015, 39(4): 53-61.
ZHANG Yang, QIU Longwei, LI Ji, et al. Sedimentary facies analysis based on cluster of seismic attributes by fuzzy C-means algorithm [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2015, 39(4): 53-61.
- [7] 于连东. 世界稠油资源的分布及其开采技术的现状与展望[J]. 特种油气藏, 2001, 8(2): 98-103.
YU Liandong. Distribution of world heavy oil reserves and its recovery technologies and future [J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2001, 8(2): 98-103.
- [8] 程付启,宋国奇,王永诗,等. 一种定量描述油气分布及富集程度的方法[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2016, 40(1): 35-41.
CHENG Fuqi, SONG Guoqi, WANG Yongshi, et al. A method for quantitatively describing oil-gas distribution and enrichment [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2016, 40(1): 35-41.
- [9] 姜在兴. 沉积学[M]. 北京:石油工业出版社, 2003: 13-14.
- [10] 邹才能,侯连华,杨帆,等. 碎屑岩风化壳结构及油气地质意义[J]. 中国科学(地球科学), 2014, 44(12): 2652-2664.
ZOU Caineng, HOU Lianhua, YANG Fan, et al. Structure of weathered clastic crust and its petroleum potential [J]. Scientia Sinica (Terra), 2014, 44(12): 2652-2664.
- [11] 曲江秀,查明,田辉,等. 准噶尔盆地北三台地区不整合与油气成藏[J]. 新疆石油地质, 2003, 24(5): 386-388.
QU Jiangxiu, ZHA Ming, TIAN Hui, et al. Unconformities and hydrocarbon accumulation in Beisantai area, Junggar Basin [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2003, 24(5): 386-388.
- [12] 高长海,查明. 大港油田埕北断阶带不整合与油气运聚[J]. 岩性油气藏, 2010, 22(1): 37-42.
GAO Changhai, ZHA Ming. Unconformity surface and hydrocarbon migration and accumulation in Chengbei fault step belt of Dagang Oilfield [J]. Lithologic Reservoirs, 2010, 22(1): 37-42.
- [13] 刘鑫金,宋国奇,刘惠民,等. 东营凹陷北部陡坡带砂砾岩油藏类型及序列模式[J]. 油气地质与采收率, 2012, 19(5): 20-23.
LIU Xinjin, SONG Guoqi, LIU Huimin, et al. Study of conglomerate reservoir types and distribution in north slope zone, Dongying Depression [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2012, 19(5): 20-23.
- [14] MENCHER E, FICHTER J H, RENZ H H, et al. Geology of Venezuela and its oil fields [J]. AAPG Bulletin, 1953, 37(4): 690-777.
- [15] 吴孔友,洪梅,聂振荣,等. 乌夏断裂带侏罗系油气成藏主控因素[J]. 新疆石油地质, 2007, 28(4): 434-436.
WU Kongyou, HONG Mei, NIE Zhenrong, et al. The key factor of Jurassic hydrocarbon accumulation in Wuxia fault belt, Junggar Basin [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2007, 28(4): 434-436.
- [16] 白振华. 准噶尔盆地乌夏地区稠油稠变过程及成藏特征[J]. 特种油气藏, 2009, 16(1): 42-45.
BAI Zhenhua. Heavy oil thickening and accumulation characteristics in Wuxia area of Junggar Basin [J]. Spe-

- cial Oil & Gas Reservoirs, 2009, 16(1): 42-45.
- [17] 姜在兴. 沉积学 [M]. 北京: 石油工业出版社, 2003: 36-38.
- [18] 丁晓琪, 韩玫梅, 张峭楠, 等. 大气淡水在碎屑岩次生孔隙中的作用 [J]. 地质论评, 2014, 60(1): 145-156. DING Xiaohui, HAN Meimei, ZHANG Shaonan, et al. Roles of meteoric water on secondary porosity of siliciclastic reservoir [J]. Geological Review, 2014, 60(1): 145-156.
- [19] KEVIN P. Diagenesis of lower Jurassic sandstone, block 211/13 (Penguin area), UK northern north sea [J]. Marine and Petroleum Geology, 1995, 12(2): 219-228.
- [20] 康志勇. 辽河油区稠油分类及其储量等级划分 [J]. 特种油气藏, 1996, 32(2): 7-12. KANG Zhiyong. Heavy oil classification and its reserves classification in Liaohe oil province [J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 1996, 32(2): 7-12.
- [21] 蒋有录, 刘华, 张乐, 等. 东营凹陷油气成藏期分析 [J]. 石油与天然气地质, 2003, 24(3): 215-218. JIANG Youlu, LIU Hua, ZHANG Le, et al. Analysis of petroleum accumulation phase in Dongying Sag [J]. Oil & Gas Geology, 2003, 24(3): 215-218.
- [22] 刘德汉, 肖贤明, 田辉, 等. 含油气盆地中流体包裹体类型及其地质意义 [J]. 石油与天然气地质, 2008, 29(4): 492-502. LIU Dehan, XIAO Xianming, TIAN Hui, et al. Fluid inclusion types and their geological significance in petroliferous basins [J]. Oil & Gas Geology, 2008, 29(4): 492-502.
- [23] 姜振学, 李峰, 李卓. 利用石油包裹体烃组分信息恢复塔中地区油气成藏过程 [J]. 现代地质, 2013, 27(5): 1193-1201. JIANG Zhenxue, LI Feng, LI Zhuo, et al. Applying molecular compositions of inclusion data to restore hydrocarbon charge history in the Tazhong area [J]. Geoscience, 2013, 27(5): 1193-1201.
- [24] MECLON G, JONES M. Petroleum fluid inclusion research [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1996, 57: 4513-4519.
- [25] 陈红汉. 单个油包裹体显微荧光特性与热成熟度评价 [J]. 石油学报, 2014, 35(3): 584-589. CHEN Honghan. Microspectrofluorimetric characterization and thermal maturity assessment of individual oil inclusion [J]. Acta Petrolei Sinica, 2014, 35(3): 584-589.

(编辑 徐会永)