

引用: 赵弟江, 江尚昆, 乔柱, 等. 稠油油藏油气运移路径刻画与成藏过程分析: 以渤海海域辽东湾坳陷 LD16 含油气构造为例 [J]. 中国石油勘探, 2021,26(5):113-124.
Zhao Dijiang, Jiang Shangkun, Qiao Zhu, et al. Characterization of migration pathway and analysis of oil accumulation process of heavy oil reservoirs: a case study of LD16 oil-bearing structure in Liaodong Bay Depression in Bohai Sea area[J]. China Petroleum Exploration, 2021,26(5):113-124.

稠油油藏油气运移路径刻画与成藏过程分析 ——以渤海海域辽东湾坳陷 LD16 含油气构造为例

赵弟江 江尚昆 乔柱 徐坤明 孔栓栓

(中海石油(中国)有限公司天津分公司)

摘要: 稠油油藏在油品性质、油水关系、保存机制等方面与常规油藏存在较大差异, 成藏过程也极为复杂。以渤海海域辽东湾坳陷 LD16 含油气构造为例, 运用测井、岩心描述、地震、地球化学分析等资料, 总结了其主要的油藏特征, 并在储层物性非均质性刻画、断层立体分析的基础上, 创新提出运用基于充注段与储层非均质性的定量运移模拟技术对油气运移路径进行精细刻画, 进而对稠油的成藏过程进行研究。研究表明: 断层的活动速率与曲率形态决定了断层带油气有效运移区段; 储层物性与构造形态共同决定了稠油在储层中的优势运移通道, 充注量与高孔渗带共同决定了稠油的不规则分布; 稠油油藏是新构造运动时期东营组古油藏中遭受过初次降解的原油沿断层向浅层运移调整形成的, 稳定盖层的存在与原油受温压下降造成的黏度突然增大, 是油气在馆陶组砂砾岩中聚集成藏的关键。

关键词: 稠油油藏; 充注点; 运移路径刻画; 油气运移模拟; 成藏过程分析

中图分类号: TE112.12 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-7703.2021.05.010

Characterization of migration pathway and analysis of oil accumulation process of heavy oil reservoirs: a case study of LD16 oil-bearing structure in Liaodong Bay Depression in Bohai Sea area

Zhao Dijiang, Jiang Shangkun, Qiao Zhu, Xu Kunming, Kong Shuanshuan

(Tianjin Branch of CNOOC (China) Co., Ltd.)

Abstract: The heavy oil reservoir varies greatly from conventional oil reservoir in terms of oil properties, oil-water contact and preservation mechanism, and its oil accumulation process is extremely complicated. Taking the LD16 oil-bearing structure in Liaodong Bay Depression in Bohai Sea area as an example, the main characteristics of heavy oil reservoir is summarized in this study by using logging, core description, seismic and geochemical analysis data. Based on the characterization of reservoir heterogeneity and stereoscopic fault analysis, a quantitative migration simulation technique combining the charging section and reservoir heterogeneity is proposed to finely describe the hydrocarbon migration pathway, and further to study the heavy oil accumulation process. The results show that: (1) The active rate and curvature shape of faults determine the effective hydrocarbon migration section in fault zone; (2) The reservoir physical property and structural morphology jointly determine the dominant migration pathway of heavy oil, and the amount of oil charging and high porosity/permeability zone result in the irregular distribution of heavy oil; (3) The heavy oil reservoir is formed by the migration and adjustment of crude oil along the fault that was primarily degraded of Dongying Formation paleo oil reservoir during the neotectonic movement. The stable caprock and the abrupt increase of oil viscosity due to the decrease of temperature and pressure are the key factors for hydrocarbon accumulation in glutenite reservoir of Guantao Formation.

Key words: heavy oil reservoir, charging point, characterization of migration pathway, hydrocarbon migration simulation, analysis of hydrocarbon accumulation process

基金项目: 国家科技重大专项“渤海海域勘探新领域及关键技术研究”(2016ZX05024-003)部分研究成果。

第一作者简介: 赵弟江(1987-), 男, 山东菏泽人, 硕士, 2013年毕业于中国地质大学(武汉), 工程师, 现主要从事石油地质综合研究及油气勘探方面的工作。地址: 天津市滨海新区海川路2121号中海石油(中国)有限公司天津分公司渤海石油研究院, 邮政编码: 300459。E-mail: zhaodj3@cnooc.com.cn

收稿日期: 2021-07-02; 修改日期: 2021-08-27

0 引言

据统计,渤海海域稠油储量达到 $36 \times 10^8 \text{t}$ 以上,长期以来,受开发技术的限制,稠油油藏一直未得到有效利用。近年来,随着稠油热采技术的不断成熟,原本无法动用的稠油—超稠油油藏相继得以开发利用,取得了良好的经济效益,稠油—超稠油油藏日益成为渤海海域油气勘探的研究热点之一。

然而不同于常规油气藏,稠油油藏往往具有油水层倒置、井间油水界面不统一、含油边界不规则等特点,显示其成藏机制极其复杂^[1-3]。前人在稠油油藏的地球化学特征、成因机制、储层特征等方面进行了较为深入的研究,取得了一系列重要进展^[4-9],但对稠油油藏的油气运移路径、成藏过程及含油面积等还缺乏系统研究。

渤海海域辽东湾坳陷 LD16 含油气构造(简称 LD16 构造)共钻探 4 口井,其中前 3 口井(LD16-A 井、LD16-B 井、LD16-C 井)均钻遇厚油层,而位于构造北部的 LD16-D 井却没有任何油气显示,表明该构造油水关系极其复杂,导致对其储量规模认识不清。本文运用地球物理、地球化学、数值模拟等技术手段,对 LD16 构造原油特征、储层物性、油气运移等进行系统研究,精细分析该构造油气运移路径,重新厘定含油气范围,并总结其油气成藏过程。本文在稠油—超稠油油藏成藏模式总结与含油面积预测方法等方面

的探索为稠油—超稠油油藏研究提供了有益的借鉴。

1 区域地质概况

LD16 含油气构造位于渤海海域辽东湾坳陷辽中凹陷西南斜坡带,向西逐渐过渡到辽西凸起,整体呈较完整的背斜形态,东西侧受两条北东向走滑断层夹持,并被一系列北东向调节断层复杂化(图 1)。该构造自下而上主要发育地层为中生界(Mz),古近系东营组(E_3d),新近系馆陶组(N_1g)与明化镇组(N_2m),以及第四系平原组(Qp)。其中含油层位为馆陶组(N_1g)、明化镇组下段(N_2m^1)与东营组二段下部($E_3d_2^1$),馆陶组圈闭规模大、形态好,具有潜在商业产能,是主要的含油层位。LD16 构造深部并不发育烃源岩,油气主要来源于辽中凹陷的沙河街组一段(沙一段, E_3s_1)与沙河街组三段(沙三段, E_3s_3)。LD16 构造的勘探始于 20 世纪 90 年代,至 2013 年年底共钻 4 口井,其中 LD16-A 井、LD16-B 井、LD16-C 井馆陶组钻遇厚油层,且油水界面较为统一,但 LD16-D 井钻探失利。钻后分析认为,LD16 构造馆陶组油藏为块状顶气底水油气藏,但原油品质差,原油密度为 $0.9941 \sim 1.0015 \text{g/cm}^3$ (20°C),黏度为 $11875.5 \sim 12715.4 \text{mPa}\cdot\text{s}$ (50°C),为典型的特稠油油田。采用原油热采技术进行测试,获取最高日产 30t 原油,表明该油田具有一定的商业潜能。

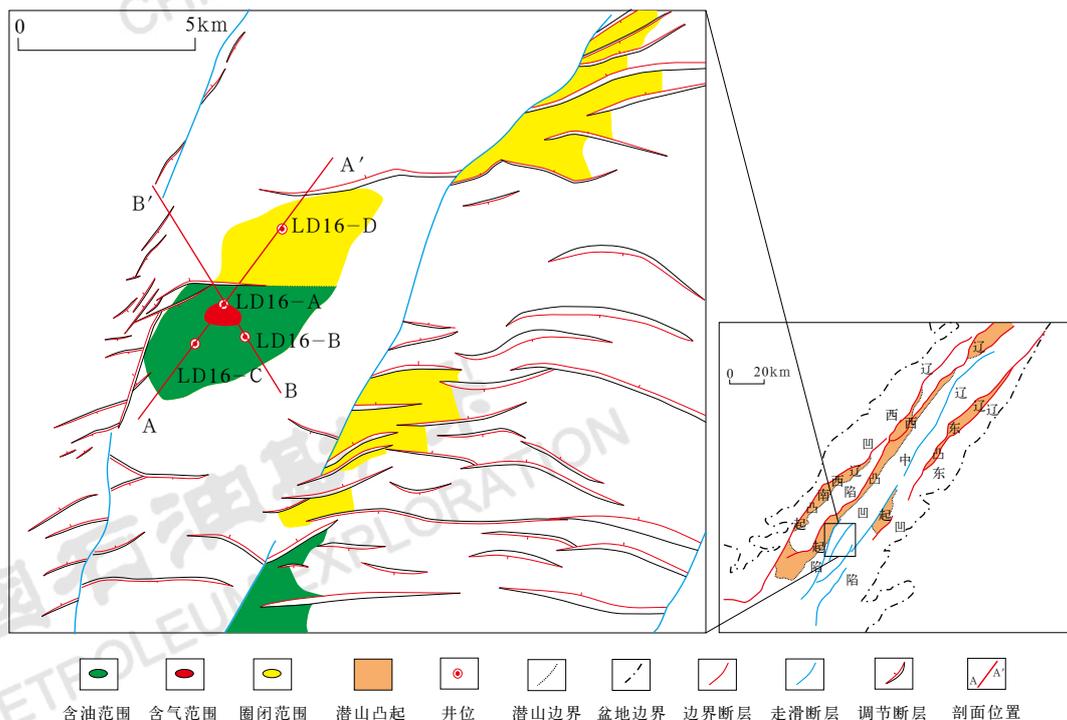


图 1 研究区构造位置图

Fig.1 Structural location map of the study area

2 主要油藏特征

2.1 储盖组合特征

LD16-A 井、LD16-B 井、LD16-C 井已钻井资料证实, LD16 构造馆陶组储层以细砂岩、中砂岩、砂砾岩为主 (图 2), 表现为多个向上变细的正粒

序, 应为多期叠加的辫状河沉积。该套储层厚度大, 分布广泛, 储层平均孔隙度为 38.2%, 平均渗透率为 2096.3mD, 为高孔高渗型储层。馆陶组油层段顶部发育一套约 4~7m 厚的泥岩盖层, 横向分布稳定, 为一套辫状河泛滥平原沉积, 与下部厚层砂岩、砂砾岩储层形成一套理想的储盖组合 (图 3), 为油气大规模成藏提供了良好储集空间和保存条件。

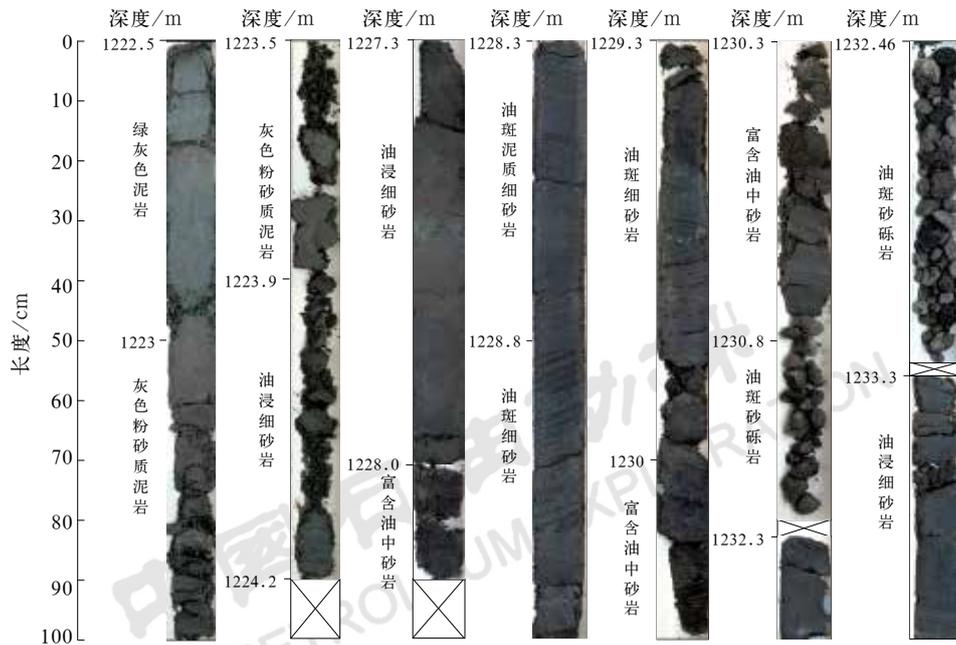


图 2 LD16-B 井馆陶组储层岩性与含油性特征

Fig.2 Reservoir lithology and oil-bearing properties of Guantao Formation in Well LD16-B

2.2 油品性质与油藏模式

LD16 构造共钻探 4 口井, 其中 3 口井在馆陶组钻遇厚油层, 该油层平均厚度约为 30m, 烃柱高度约为 50m, 高部位存在气顶 (图 4), 天然气中甲烷含量超过 95%, 为干气, 可能是原油在原地生物降解后形成的。20℃ 条件下, 地面原油密度为 0.9941~1.0015g/cm³, 50℃ 条件下, 黏度为 11875.5~12715.4mPa·s, 含硫量为 0.49%, 含蜡量为 0.52%, 胶质 + 沥青质含量接近 50%, 为典型的稠油油藏。

2.3 温压特征

通过 DST 测试得到 LD16 构造地温梯度为 3.12℃/100m, 其中在东营组 1874m 地层温度为 58.1~61.2℃, 在馆陶组主力油层段 1232m 地层温度为 38.7~41.2℃。现代试井法揭示, LD16 构造压力系数约为 0.998, 属于正常温压系统。馆陶组主力油

层段地层水平平均矿化度为 24.1mg/L, (Cl⁻-Na⁺)/Mg²⁺>1, 根据苏林天然水成因分类^[10], 馆陶组地层水化学类型以 CaCl₂ 型为主。

3 油气运移路径精细刻画

3.1 基于人工神经网络的储层物性预测

综合测井、录井及岩心资料分析, LD16 构造馆陶组主要含油层系为厚层状辫状河砂砾岩。以馆陶组油层顶界面为控制层, 以油层厚度为主要依据, 选择合理时窗, 提取三维地震数据体的振幅、频率、相位、能量和相干等 7 类 20 余种地震属性进行优选^[11-13]; 通过提取井旁道属性数据并对属性之间的相关性及各属性与孔隙度之间的相关性进行分析 (图 5), 最终优选出能量半衰时、平均瞬时频率、均方根振幅值、平均振幅值 4 种属性, 再通过人工神经网络计算, 最终得到馆陶组含油层段孔隙度平面分布图 (图 6)。

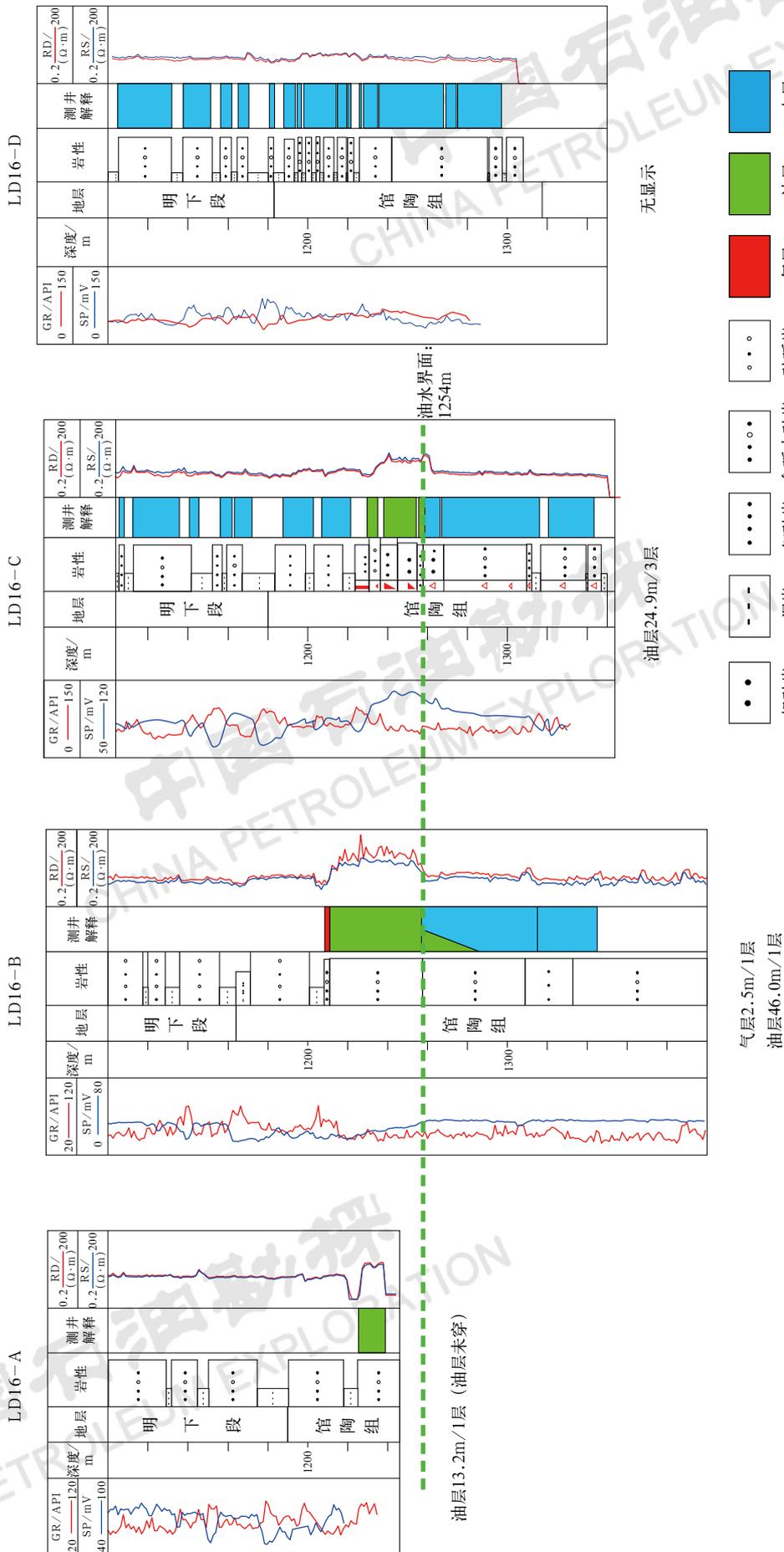


图3 LD16构造储盖组合特征
Fig.3 Characteristics of reservoir and cap rock assemblage of LD16 structure

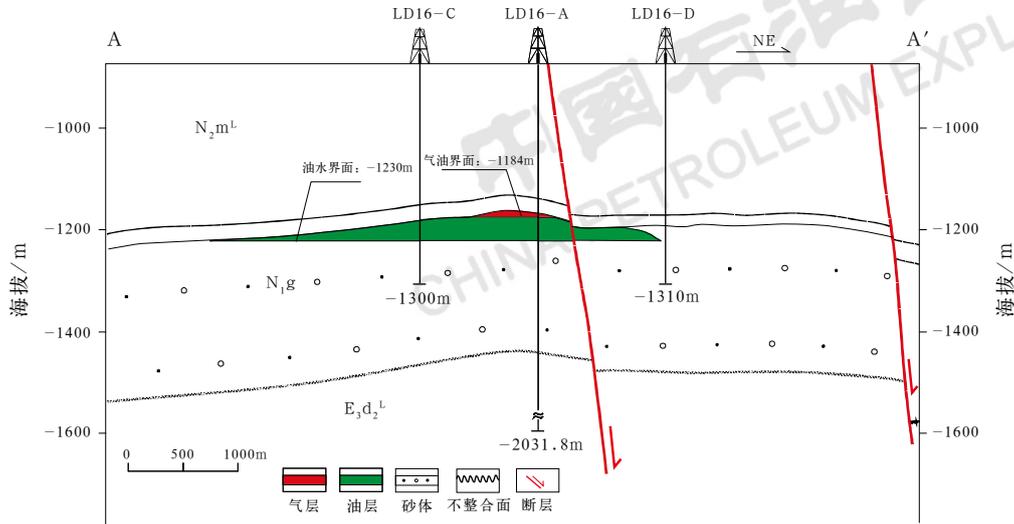


图 4 LD16 构造油藏模式示意图 (剖面位置见图 1)

Fig.4 Schematic oil reservoir profile of LD16 structure (section location is in Fig.1)

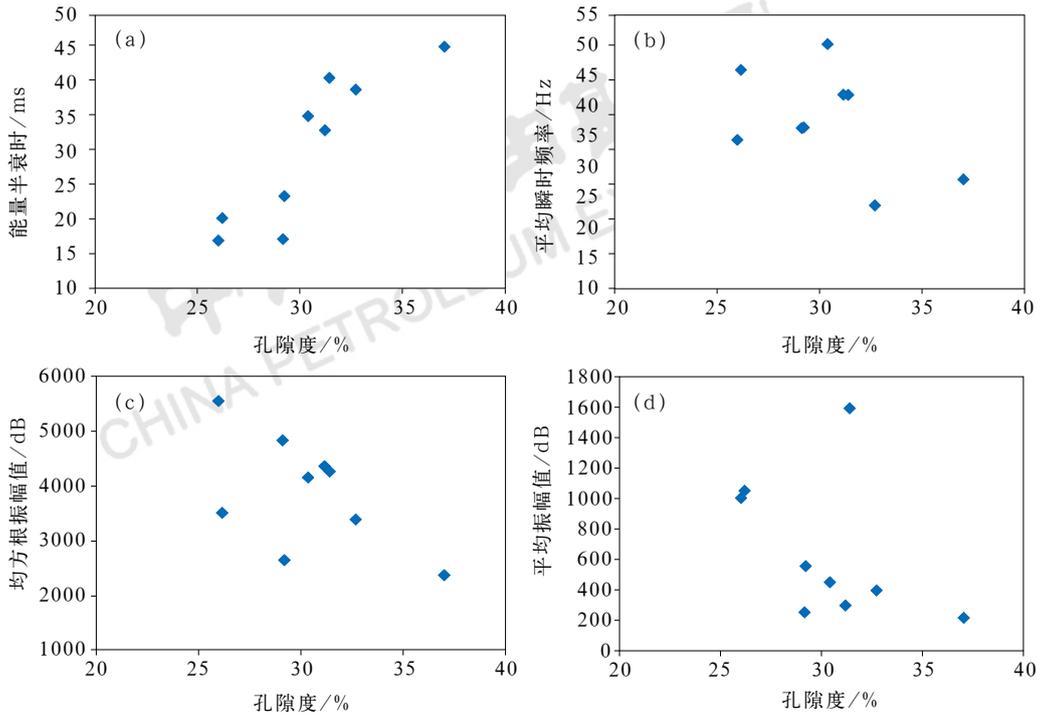


图 5 地震属性与孔隙度相关分析图

Fig.5 Relationship between various seismic attributes and porosity

孔隙度预测平面分布图显示, LD16 构造以南孔隙度整体较高。自 LD16-A 井区向北, 砂体连续性变差, 高孔隙度带仅在靠近北部断层处发育, 这与地质上认识具有一致性。

3.2 储层充注起始点的确定

如前所述, LD16 构造主要储层位于馆陶组顶部, 深部并不发育烃源岩, 油气主要来自辽中凹陷区, 油气需沿断层垂向运移至浅层馆陶组储层。前人研究表

明, 研究区存在两期成藏(东营组沉积晚期与明上段—第四系沉积时期)^[14-19], 其中明上段—第四系沉积时期为主成藏期。在明上段—第四系沉积时期瞬态充注条件下, 油气运移路径并非大水漫灌式, 而是具有极强的选择性, 绝大多数的油气沿着断层优势运移通道向储层充注, 这也是造成油气成藏差异性极大的关键。

断层平均活动速率统计表明, 研究区存在两个主要断裂活动期, 东营组沉积时期和明上段—第四系沉积时期, 其他时期的断层活动速率相对较小, 是断裂

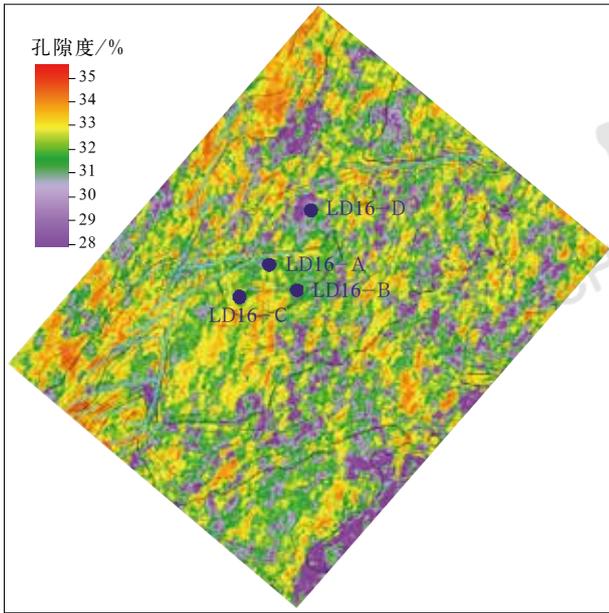


图6 馆陶组含油层段孔隙度平面预测图

Fig.6 Porosity prediction plane of oil-bearing layer of Guantao Formation

活动相对静止期。这两期构造活动分别对应两次油气成藏时期。东营组沉积末期，辽中凹陷烃源岩进入大规模成熟期，此时受右旋走滑作用的影响，形成较多大规模的北东向断层（如F1等）（图7），这些断层有利于油气在东营组的初次聚集。明上段—第四系沉积时期，研究区受太平洋板块向欧亚板块加速俯冲及印度板块向欧亚板块碰撞产生的远程效应的影响，走滑作用减弱，整体进入加速沉降阶段，先存断层重新活化，活动性再次增强，强活动断裂破坏了东营组巨厚盖层的封闭，有利于油气垂向输导，使得东营组油藏向浅层馆陶组调整聚集运移^[20-21]。统计表明，主成藏期断层活动速率低于25m/Ma，油气主要在深层古近系成藏；当断层活动速率高于25m/Ma时，油气可在浅层成藏，所以断层活动速率为25m/Ma是油气有效充注的门限。通过对断层活动速率进行分段统计，可以确定LD16构造主要油源断层的有效充注段（图8a）。

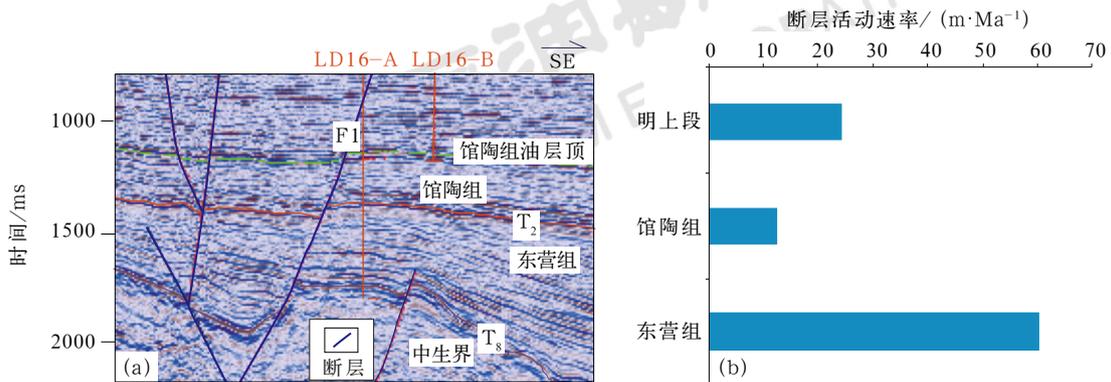


图7 LD16构造断层活动性分析

Fig.7 Fault activity analysis of LD16 structure

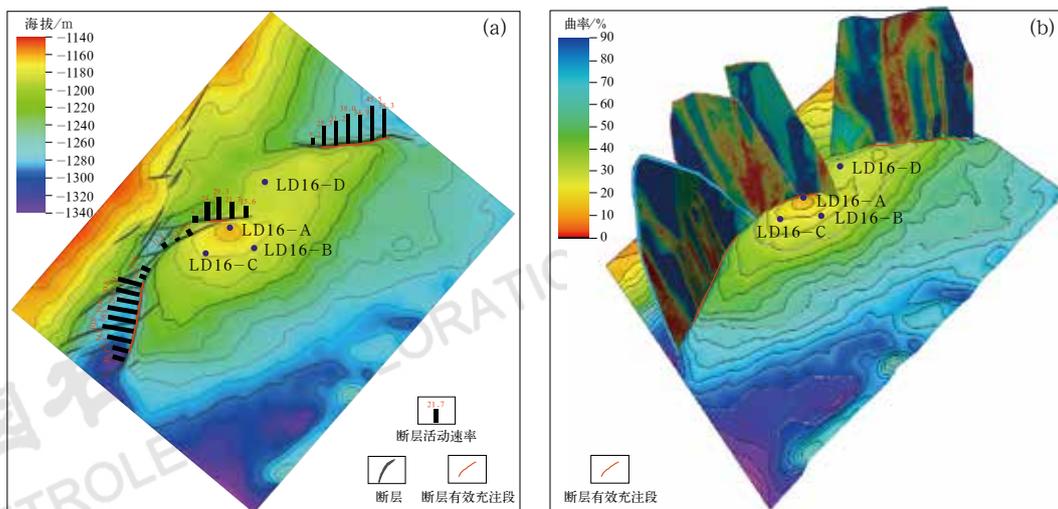


图8 断层有效充注点的识别

Fig.8 Identification of effective hydrocarbon charging point of fault

(a) 断层活动速率分布图；(b) 断层曲率分布图

断面依据形态可划分为会聚型、分散型和均一型，其中会聚型断面有利于油气运移^[22]，会聚型断面一般对应曲率较大的区段，利用断层边际检测法，可以识别出断层曲率较大的区段（图 8b）。曲率较大的区段与断层活动性较大的重叠区段是断层的有效充注段，以此作为油气沿断层向上运移的充注段。

3.3 基于充注点与物性差异的油气定量运移模拟

油气在馆陶组内的运聚过程是控制油气分布的关

键。本文运用油气定量模拟技术^[23]，在设定相同充注量的前提下，在 LD16 构造南部、中部与北部 3 条主要运移断层分别设定油气初始充注段，对油气在馆陶组油层内运移开展定量模拟（图 9）。结果表明，无论油气从哪里充注，油气都首先向圈闭最高部位即 LD16-A 井区、LD16-B 井区、LD16-C 井区聚集，受运移滞留效应的影响，在相同的充注量下，运移距离越远，其圈闭中油气分布范围越小（图 9a、d、g）；油气充注存在明显的优势运移路径，优势运移路径是由构造

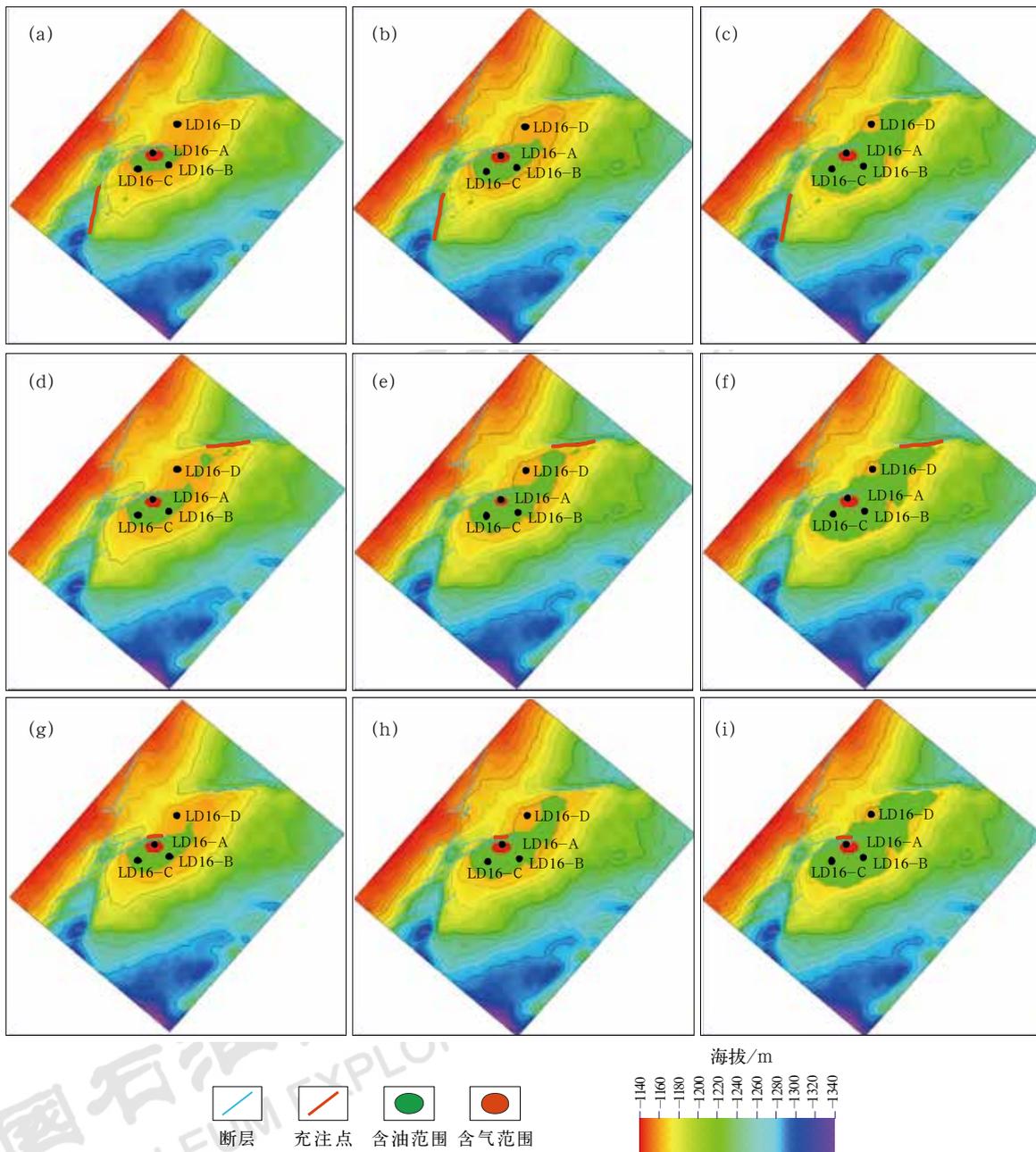


图 9 不同油气充注段下油气运移模拟

Fig.9 Simulation of hydrocarbon migration with various charging sections

(a)–(c) 油气从南部断层充注，油气充注量分别设定为 $1200 \times 10^4 \text{m}^3$ 、 $2400 \times 10^4 \text{m}^3$ 和 $3600 \times 10^4 \text{m}^3$ ；(d)–(f) 油气从北部断层充注，油气充注量分别设定为 $1200 \times 10^4 \text{m}^3$ 、 $2400 \times 10^4 \text{m}^3$ 和 $3600 \times 10^4 \text{m}^3$ ；(g)–(i) 油气由中部断层充注，油气充注量分别设定为 $1200 \times 10^4 \text{m}^3$ 、 $2400 \times 10^4 \text{m}^3$ 和 $3600 \times 10^4 \text{m}^3$

形态控制的构造脊与储层高孔渗带叠合形成的通道控制(图10)。随着充注量的不断增大,油气优先向高部位与高孔渗带聚集,继而向低部位充注,但对于较

低的孔渗带则不发生充注(图9b、e、h)。最终基于3条充注段得到了LD16构造在相同充注量下可能的含油范围(图9c、f、i)。

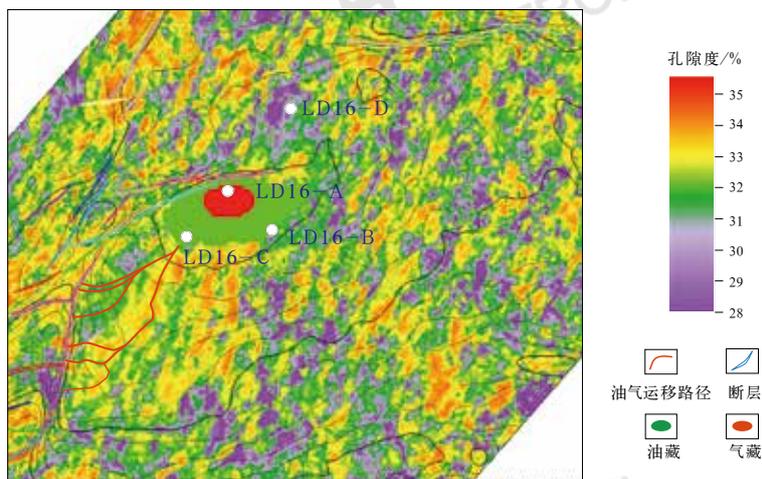


图10 油气从南部断层充注段充注的优势运移路径刻画(构造脊与高孔渗带叠合性较好)

Fig.10 Characterization of dominant hydrocarbon migration pathway when charging from the southern fault (good consistency between structural ridge and high porosity/permeability zone)

研究表明,振幅类或能量类地震属性对地层含油性较为敏感^[24]。以LD16-A井、LD16-B井、LD16-C井所确定的油水界面为底界面,以馆陶组油层顶界面为顶界面,提取两层间的总能量属性,结果显示,LD16-D井附近属性值较低(图11)。属性

分析结果与充注量为 $3600 \times 10^4 \text{m}^3$ 的油气运移模拟结果相似,二者之间可以相互印证。

4 油气成藏过程

4.1 油源分析

LD16构造处于辽中凹陷西南斜坡带,辽中凹陷主要发育沙三段和沙一段两套烃源岩。沙三段烃源岩色谱—质谱特征主要表现为:低含量的伽马蜡烷、高含量的 C_{30} -4-甲基甾烷、低含量的 $\text{C}_{21}/\text{C}_{23}$ 三环萜烷与 $\text{C}_{20}/\text{C}_{23}$ 三环萜烷和较高含量的 C_{24} 四环三萜烷/ C_{26} 三环萜烷(图12a)。沙一段烃源岩色谱—质谱特征主要表现为:高含量的伽马蜡烷、低含量的 C_{30} -4-甲基甾烷、高含量的 $\text{C}_{21}/\text{C}_{23}$ 三环萜烷与 $\text{C}_{20}/\text{C}_{23}$ 三环萜烷和较低含量的 C_{24} 四环三萜烷/ C_{26} 三环萜烷(图12b)。

由于LD16构造中原油遭受了不同程度的降解,部分原油降解程度达到8级以上,藿烷与甾烷系列化合物均遭受降解(图12c-e),因此在油源对比的过程中选用抗降解能力强的生物标志化合物:伽马蜡烷、 C_{30} -4-甲基甾烷和三环萜烷类^[25-30]。根据生物标志化合物的对比分析结果,LD16构造馆陶组与东营组二段下部原油均表现为:相对较高的伽马蜡烷,

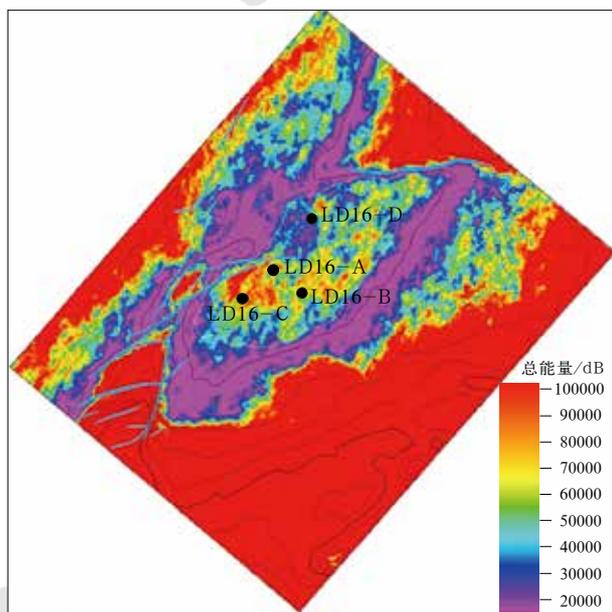


图11 LD16构造油水界面至油层顶界面层间总能量属性分布图
Fig.11 Total interlayer energy attributes between oil-water contact and the top oil layer of LD16 structure

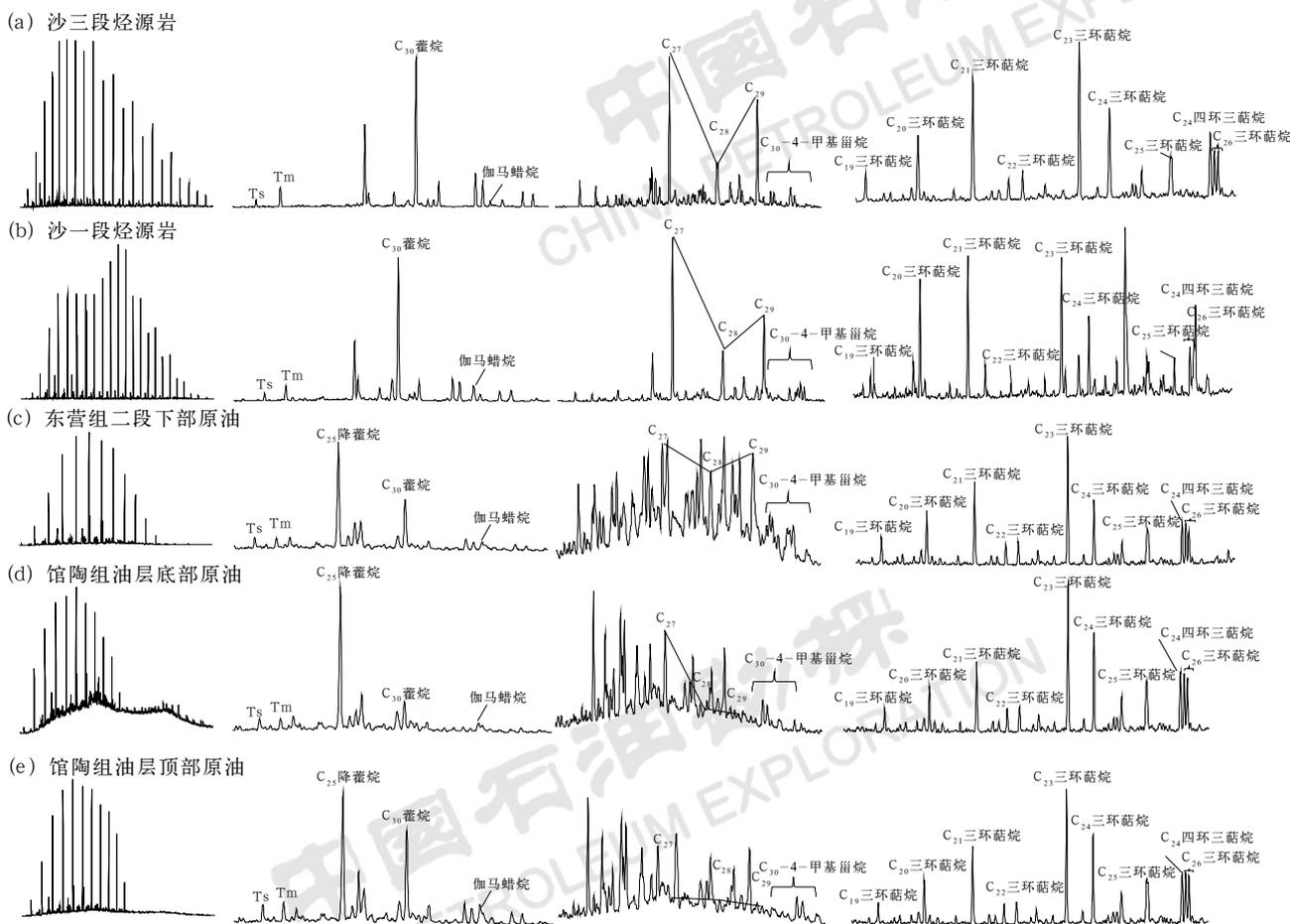


图 12 研究区烃源岩与原油生物标志化合物特征

Fig.12 Characteristics of biomarkers of source rocks and crude oil in study area

高含量的 C_{30} -4-甲基甾烷、低含量的 C_{21}/C_{23} 三环萜烷与 C_{20}/C_{23} 三环萜烷和较高含量的 C_{24} 四环三萜烷/ C_{26} 三环萜烷，具有沙三段与沙一段烃源岩混合贡献，且以沙三段为主的特征（图 12c—e）。而根据生物标志化合物的特征，东营组二段下部原油的降解程度低于馆陶组原油，馆陶组油层底部原油的降解程度高于馆陶组油层顶部原油。

4.2 充注过程

与 LD16 构造同处于辽中凹陷西南斜坡带的邻近稠油油藏地温史模拟与油田包裹体资料已证实，研究区在东营组沉积末期（距今 25Ma）曾经发生过大规模油气成藏^[22]。来自辽中凹陷沙三段的原油在东营组二段聚集成藏（图 13a），因埋藏较浅，原油遭受初次降解（图 12c），使得原油初步稠化，胶质 + 沥青质成分相对增加，油品性质相对变差，20℃ 条件下，东营组二段下部地面原油密度为 $0.97 \sim 0.98 \text{g/cm}^3$ ，

50℃ 条件下，黏度为 $700 \sim 1080 \text{mPa} \cdot \text{s}$ 。新构造运动时期，断层打破了东营组二段下部油气藏的压力平衡，断层输导性开启，油气沿南部、中部、北部 3 条断层向上运移调整，运移至馆陶组时受稳定的厚层状泥岩盖层遮挡，油气发生侧向分流，沿构造脊与高孔渗带控制的优势运移通道首先向圈闭高部位 LD16-A 井区、LD16-B 井区、LD16-C 井区聚集（图 13b）。地层测试显示，馆陶组油层温度为 38.2°C ，东营组二段下部温度为 58.1°C 。然而原油受压力与温度（尤其是温度）骤然降低的影响，黏度陡然增加，由 $700 \sim 1080 \text{mPa} \cdot \text{s}$ 突然增加到 $(6 \sim 10) \times 10^4 \text{mPa} \cdot \text{s}$ ，原油流动性几乎消失，大量的胶质 + 沥青质等成分（超过 50%）堵塞了运移通道中的岩石孔隙，进行自我封闭，使得油气沿孔渗较高的区带聚集，而向低部位及低孔渗带充注十分困难（如图 14 含油饱和度与储层渗透率、孔隙度呈明显的正相关），从而造成油气主要在 LD16-A 井区、

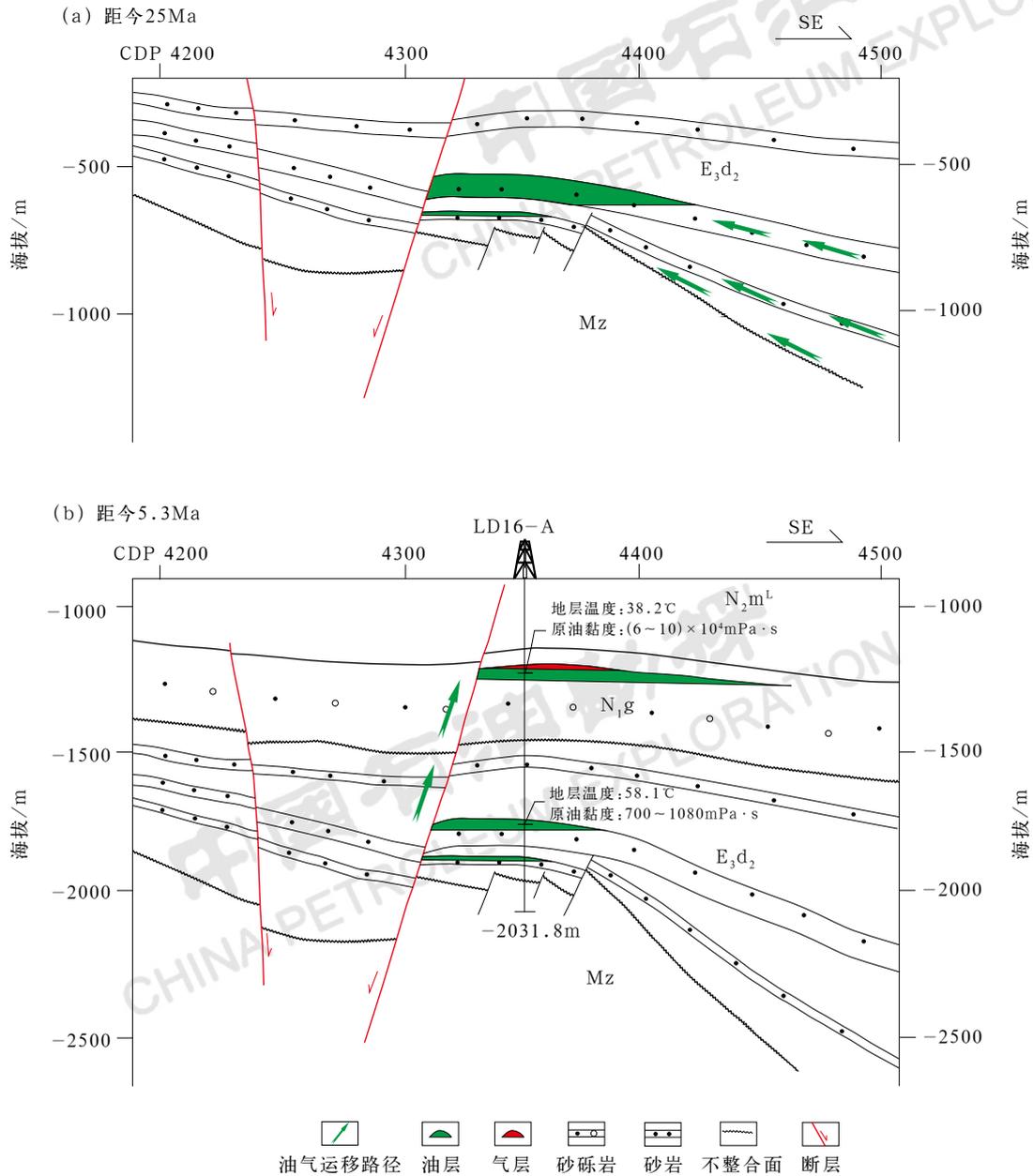


图13 LD16构造油气成藏过程示意图

Fig.13 Schematic hydrocarbon accumulation process of LD16 structure

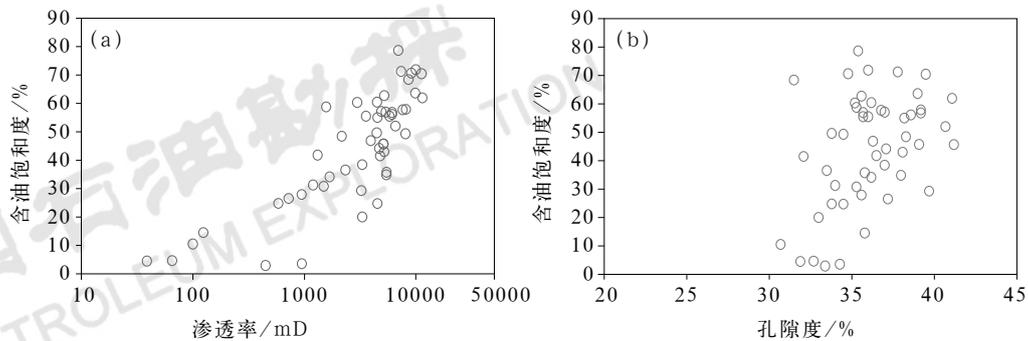


图14 含油饱和度与渗透率、孔隙度的相关关系图

Fig.14 Relationship between oil saturation and permeability/porosity

LD16-B井区、LD16-C井区聚集而未向位于低孔渗带的LD16-D井区运移。

5 结论

(1) 基于充注点与物性差异的油气定量运移模拟表明,储层物性差异与构造形态共同决定了稠油的优势运移通道,充注量与高孔渗带共同决定了稠油的不规则分布,是造成油气在LD16-D井处未成藏的关键。

(2) 油气在东营组沉积末期在东营组二段下部初次成藏,并接受初次降解。新构造运动时期油气向馆陶组再次调整。稳定盖层的存在与原油受温压下降造成的黏度突然增大,使得油气在馆陶组砂砾岩层中聚集成藏。

(3) 运用油气定量模拟技术与层间地震属性的精确提取技术相互验证,推翻了断层控制油水边界的认识,重新厘定了稠油的油气分布范围。

参考文献

- [1] Larter S R, Adams J J, Gates I D, *et al.* The origin, prediction and impact of oil viscosity heterogeneity on the production characteristics of tar sand and heavy oil reservoirs[J]. *Journal of Canadian Petroleum Technology*, 2008,47(1):52-61.
- [2] 郭永华,周心怀,李建平,等.渤海海域新近系稠油油藏原油特征及形成机制[J]. *石油与天然气地质*, 2010,31(3):375-385.
Guo Yonghua, Zhou Xinhui, Li Jianping, *et al.* Crude features and origins of the Neogene heavy oil reservoirs in the Bohai Bay[J]. *Oil & Gas Geology*, 2010,31(3):375-385.
- [3] 张友,王清斌,王飞龙,等.渤海海域LD16-1A、LD16-1B构造原油生物降解特征及控制因素[J]. *长江大学学报(自科版)*, 2016,13(29):13-17.
Zhang You, Wang Qingbin, Wang Feilong, *et al.* Characteristics and control factors of biodegradation of crude oil in LD16-A and LD16-B structures of Bohai Sea[J]. *Journal of Yangtze University(Natural Science Edition)*, 2016,13(29):13-17.
- [4] 李素梅,庞雄奇,邱桂强,等.东营凹陷北部陡坡带稠油成藏机理与油气运聚特征[J]. *地球科学—中国地质大学学报*, 2004,29(4):451-456.
Li Sumei, Pang Xiongqi, Qiu Guiqiang, *et al.* Oil migration and accumulation mechanisms for heavy oils in north steep slope of Dongying Depression, eastern China[J]. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 2004,29(4):451-456.
- [5] 胡守志,张冬梅,唐静,等.稠油成因研究综述[J]. *地质科技情报*, 2009,28(2):94-97.
Hu Shouzhi, Zhang Dongmei, Tang Jing, *et al.* Review of the genesis of heavy oil[J]. *Geological Science and Technology Information*, 2009,28(2):94-97.
- [6] 王冰洁,徐长贵,吴奎,等.辽东湾凹陷LX油田浅层特稠油成藏过程及模式[J]. *现代地质*, 2016,30(3):663-671.
Wang Bingjie, Xu Changgui, Wu Kui, *et al.* Shallow super heavy oil reservoir accumulation process and model in LX Oilfield, Liaodong Bay Depression[J]. *Geoscience*, 2016,30(3):663-671.
- [7] 邱桂强,李素梅,庞雄奇,等.东营凹陷北部陡坡带稠油地球化学特征与成因[J]. *地质学报*, 2004,78(6):854-863.
Qiu Guiqiang, Li Sumei, Pang Xiongqi, *et al.* Characteristics and genetic mechanisms of heavy oils on the north steep slope of the Dongying Depression in the Bohai Bay Basin, east China[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2004,78(6):854-863.
- [8] 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.
- [9] 廖广志,王连刚,王正茂.重大开发试验实践及启示[J]. *石油科技论坛*, 2019,38(2):1-10.
Liao Guangzhi, Wang Liangang, Wang Zhengmao. Practice and reflection of important development experiments[J]. *Oil Forum*, 2019,38(2):1-10.
- [10] 刘济民.油田水文地质勘探中水化学及其特性指标的综合应用[J]. *石油勘探与开发*, 1982,9(6):53-59.
Liu Jimin. The characteristics of underground water chemistry and its application in oilfield hydrology exploration[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 1982,9(6):53-59.
- [11] 王治国,尹成,雷小兰,等.预测砂岩孔隙度的地震多属性优化模式对比[J]. *石油地球物理勘探*, 2011,46(3):442-451.
Wang Zhiguo, Yin Cheng, Lei Xiaolan, *et al.* Multi-attribute optimization analysis for sandstone porosity prediction[J]. *Oil Geophysical Prospecting*, 2011,46(3):442-451.
- [12] 杨午阳,魏新建,何欣.应用地球物理+AI的智能化物探技术发展策略[J]. *石油科技论坛*, 2019,38(5):40-47.
Yang Wuyang, Wei Xinjian, He Xin. Development plan for intelligent geophysical prospecting technology of applied geophysical+AI[J]. *Oil Forum*, 2019,38(5):40-47.
- [13] 鲍祥生,尹成,赵伟,等.储层预测的地震属性优选技术研究[J]. *石油物探*, 2006,45(1):28-34.
Bao Xiangsheng, Yin Cheng, Zhao Wei, *et al.* Optimizing selection of seismic attributes in reservoir prediction[J]. *Geophysical Prospecting for Petroleum*, 2006,45(1):28-34.
- [14] 薛永安,张新涛,牛成民.辽西凸起南段斜坡带油气地质新认识与勘探突破[J]. *中国石油勘探*, 2019,24(4):449-456.
Xue Yong'an, Zhang Xintao, Niu Chengmin. New geological understandings and prospecting breakthrough in slope zone of southern Liaoxi Uplift[J]. *China Petroleum Exploration*, 2019,24(4):449-456.
- [15] 刘宝增.塔里木盆地顺北地区油气差异聚集主控因素分析:以顺北1号、顺北5号走滑断裂带为例[J]. *中国石油勘探*, 2020,25(3):83-95.
Liu Baozeng. Analysis of main controlling factors of oil and gas differential accumulation in Shunbei area, Tarim Basin: taking Shunbei No.1 and No.5 strike slip fault zones as examples[J]. *China Petroleum Exploration*, 2020,25(3):83-95.
- [16] 宋璠,苏妮娜,侯加根,等.渤海湾盆地板桥凹陷内部新生代断裂

- 活动性与油气成藏[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2015,46(5):1723-1731.
- Song Fan, Su Nina, Hou Jiagen, *et al.* Cenozoic fault activity and hydrocarbon accumulation within Banqiao Sag of Bohai Bay Basin[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2015,46(5):1723-1731.
- [17] 张宏国, 吕丁友, 官大勇, 等. 辽东湾地区辽中凹陷东营组湖底扇成藏差异性研究[J]. 中国石油勘探, 2021,26(3):95-106.
- Zhang Hongguo, Lv Dingyou, Guan Dayong, *et al.* Study on hydrocarbon accumulation difference of sub-lacustrine fan in Dongying Formation in Liaozhong Sag, Liaodong Bay[J]. China Petroleum Exploration, 2021,26(3):95-106.
- [18] 施和生, 王清斌, 王军, 等. 渤中凹陷深层渤中19-6构造大型凝析气田的发现及勘探意义[J]. 中国石油勘探, 2019,24(1):36-45.
- Shi Hesheng, Wang Qingbin, Wang Jun, *et al.* Discovery and exploration significance of large condensate gas fields in BZ19-6 structure in deep Bozhong Sag[J]. China Petroleum Exploration, 2019,24(1):36-45.
- [19] 薛永安. 渤海海域油气运移“汇聚脊”模式及其对新近系油气成藏的控制[J]. 石油学报, 2018,39(9):963-970.
- Xue Yong'an. The "catchment ridge" model of hydrocarbon migration in Bohai Sea and its control on Neogene hydrocarbon accumulation[J]. Acta Petrolei Sinica, 2018,39(9):963-970.
- [20] 卢浩, 蒋有录, 谷国翠, 等. 渤南洼陷沙三段油气运移路径分析[J]. 油气地质与采收率, 2012,19(3):49-53.
- Lu Hao, Jiang Youlu, Gu Guocui, *et al.* Hydrocarbon migration characteristics in Bonan Sag[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2012,19(3):49-53.
- [21] 宋明水. 渤海海域埕岛东坡东营组砂体成因及油气富集特征[J]. 中国石油勘探, 2020,25(4):31-42.
- Song Mingshui. Sand body genesis and hydrocarbon accumulation characteristics of Dongying Formation in the east slope of Chengdao area, Bohai Sea[J]. China Petroleum Exploration, 2020,25(4):31-42.
- [22] 徐长贵, 王冰洁, 王飞龙, 等. 辽东湾坳陷新近系特稠油成藏模式与成藏过程: 以旅大5-2北油田为例[J]. 石油学报, 2016,37(5):599-609.
- Xu Changgui, Wang Bingjie, Wang Feilong, *et al.* Neogene extra heavy oil accumulation model and process in Liaodong Bay Depression: a case study of Lvda 5-2 N Oilfield[J]. Acta Petrolei Sinica, 2016,37(5):599-609.
- [23] 赵弟江, 郭永华, 乔柱, 等. 高精度油气运移模拟技术在渤中19-6油气田及围区的应用[J]. 中国石油勘探, 2019,24(4):520-531.
- Zhao Dijiang, Guo Yonghua, Qiao Zhu, *et al.* Application of high-precision hydrocarbon migration simulation technology in BZ 19-6 oil and gas field and its surrounding area[J]. China Petroleum Exploration, 2019,24(4):520-531.
- [24] 王冰洁, 徐长贵, 吴奎, 等. 渤海海域辽西凹陷陡坡带LX构造特稠油藏内部油品品质分布及成因[J]. 石油与天然气地质, 2017,38(1):79-89.
- Wang Bingjie, Xu Changgui, Wu Kui, *et al.* Shallow super heavy oil reservoir accumulation process and model in LX Oilfield, Liaodong Bay Depression[J]. Oil & Gas Geology, 2017,38(1):79-89.
- [25] Peters K E, Walters C C, Moldowan J M. The biomarker guide, volume 2: biomarkers and isotopes in petroleum exploration and earth history[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2005.
- [26] Haiping H, Larter S R, Bernard F J B, *et al.* A dynamic biodegradation model suggested by petroleum compositional gradients within reservoir columns from the Liaohe Basin, NE China[J]. Organic Geochemistry, 2004,35(3):299-316.
- [27] 李倩倩, 刘鹏. 渤南洼陷罗家垦西地区沙三段稠油的形成与分布[J]. 西安石油大学学报(自然科学版), 2017,32(4):39-45.
- Li Qianqian, Liu Peng. Formation and distribution of heavy oil of the third member of Shahejie Formation in Luojiakenxi area of Bonan Sag[J]. Journal of Xi'an Shiyou University (Natural Science Edition), 2017,32(4):39-45.
- [28] 王军, 周心怀, 杨波, 等. 渤海蓬莱9-1油田强烈生物降解原油油源对比[J]. 中国海上油气, 2017,29(6):32-42.
- Wang Jun, Zhou Xinhuai, Yang Bo, *et al.* Oil-source correlation of severely biodegraded oil of PL 9-1 Oilfield in Bohai Sea[J]. China Offshore Oil and Gas, 2017,29(6):32-42.
- [29] 邓运华. 渤海油区稠油成因探讨[J]. 中国海上油气, 2006,18(6):361-364.
- Deng Yunhua. A discussion on the origin of heavy oil in Bohai oil province[J]. China Offshore Oil and Gas, 2006,18(6):361-364.
- [30] 张枝焕, 刘洪军, 李伟, 等. 准噶尔盆地车排子地区稠油成因及成藏过程[J]. 地球科学与环境学报, 2014,36(2):18-32.
- Zhang Zhihuan, Liu Hongjun, Li Wei, *et al.* Origin and accumulation process of heavy oil in Chepaizi area of Junggar Basin[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2014,36(2):18-32.