

地质学报
Acta Geologica Sinica
ISSN 0001-5717, CN 11-1951/P

《地质学报》网络首发论文

题目: 东营凹陷古近系深层砂砾岩油气藏差异化形成机理及模式
作者: 雷文智, 陈冬霞, 成铭, 王永诗, 巩建强, 邱贻博, 王翘楚, 蔡晨阳, 张婉蓉
DOI: 10.19762/j.cnki.dizhixuebao.2023506
收稿日期: 2023-10-05
网络首发日期: 2024-07-30
引用格式: 雷文智, 陈冬霞, 成铭, 王永诗, 巩建强, 邱贻博, 王翘楚, 蔡晨阳, 张婉蓉. 东营凹陷古近系深层砂砾岩油气藏差异化形成机理及模式[J/OL]. 地质学报. <https://doi.org/10.19762/j.cnki.dizhixuebao.2023506>



网络首发: 在编辑部工作流程中, 稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定, 且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式(包括网络呈现版式)排版后的稿件, 可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定; 学术研究成果具有创新性、科学性和先进性, 符合编辑部对刊文的录用要求, 不存在学术不端行为及其他侵权行为; 稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准, 正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字符、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性, 录用定稿一经发布, 不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容, 只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认: 纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司签约, 在《中国学术期刊(网络版)》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版, 以单篇或整期出版形式, 在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊(网络版)》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物(ISSN 2096-4188, CN 11-6037/Z), 所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

东营凹陷古近系深层砂砾岩油气藏差异化形成机理及模式

雷文智^{1,2)}, 陈冬霞^{*1,2)}, 成铭³⁾, 王永诗⁴⁾, 巩建强⁵⁾, 邱贻博⁵⁾,
王翘楚^{1,2)}, 蔡晨阳^{1,2)}, 张婉蓉^{1,2)}

- 1) 中国石油大学(北京)油气资源与探测国家重点实验室,北京,102249;
- 2) 中国石油大学(北京)地球科学学院,北京,102249;
- 3) 中国石油长庆油田公司长北作业分公司,陕西榆林,719100;
- 4) 中国石化胜利油田分公司,山东东营,257001;
- 5) 中国石化胜利油田分公司勘探开发研究院,山东东营,257015

内容提要:东营凹陷深层砂砾岩油气勘探潜力大,揭示油气在空间上的分布差异以及形成机理有利于深入认识深层油气成藏过程。本研究通过有机地球化学、储层流体包裹体以及盆地模拟等多种分析方法,明确了东营凹陷深层油气特征及差异,揭示了烃类流体的差异化形成机理及模式。结果表明,东营凹陷盐家地区从深至浅呈干气、凝析气和轻质油垂向有序分布;胜坨地区以单一油相为主,不同类型油气藏的原油伴生气组分存在差异。导致深层烃类流体差异化的因素体现在生成、改造和保存等方面,砂砾岩中的油气成藏过程具有较强的继承性,烃源岩的热演化史决定了油气的初始相态。后期次生改造作用的影响依赖于流体环境,输导性扇体叠置形成的开放流体环境有利于气侵过程的发生,促使油气在垂向上相态分异;油气在相对封闭的环境中常维持单一相。此外,断层的输导作用可导致油气中发生轻组分的损失,同样是导致烃类流体差异化的重要因素。基于烃类流体的分布特征和成因机制的认识,建立了热演化-次生改造主导的烃类相态垂向分异型和热演化-断层输导主导的气烃组分分异型两种烃类流体差异化形成模式。东营凹陷深层烃类流体差异化形成机制的认识可为预测深层不同类型烃类流体分布提供一定的科学指导。

关键词:东营凹陷;北部陡坡带;砂砾岩体;深层油气;烃类流体差异化成因

随着勘探技术的发展和创新,深层油气资源成为关注的重点。我国多个盆地在深层油气领域均得到突破性进展,例如塔里木盆地台盆区超深层寒武系(杨海军等,2020),渤中凹陷古生界奥陶系深层潜山(周心怀等,2017),四川盆地普光和安岳地区深层碳酸盐岩储层(李建忠,2021;贾承造等,2023),说明深层油气资源逐渐成为油气勘探的新趋势。

深层油气埋藏深、地层温度和压力高,往往经历了多期次的构造和热演化过程,导致深层油气勘探过程中还存在诸多难题尚未有效地解决(何登发等,

2019;何海清等,2021)。尤其是深层复杂的构造作用、热演化过程和伴生的次生作用等往往会导致成藏过程中烃类流体复杂多变。例如,塔里木盆地台盆区深层海相碳酸盐岩地层中发现多类烃类流体,指示了复杂、多样的成因机制(朱光有等,2021)。前人在多类型成藏烃类流体成因的领域进行了探索,朱光有等(2021)通过有机地球化学方法分析了油气成因和亲缘关系,揭示了不同类型油气的形成过程。Chen Zhonghong et al. (2022)利用东营凹陷低熟泥岩的热模拟实验分析了不同温度阶段的油气产物特

注:本文为国家自然科学基金项目(编号 41972124)资助的成果。

收稿日期:2023-10-05;改回日期:2024-04-29;责任编辑:邱楠生;责任编辑:周健。

作者简介:雷文智,男,1995 年生。博士研究生,地质资源与地质工程专业。E-mail: 18382244604@163.com。

* 通讯作者:陈冬霞,女,1974 年生。教授,主要从事油气成藏机理与分布规律研究。E-mail: lindachen@cup.edu.cn。

引用本文:雷文智,陈冬霞,成铭,王永诗,巩建强,邱贻博,王翘楚,蔡晨阳,张婉蓉. 2024. 东营凹陷古近系深层砂砾岩油气藏差异化形成机理及模式. 地质学报, doi: 10.19762/j.cnki.dizhixuebao.2023506.

Lei Wenzhi, Chen Dongxia, Cheng Ming, Wang Yongshi, Gong Jianqiang, Qiu Yibo, Wang Qiaochu, Cai Chenyang, Zhang Wanrong. 2024. Differential formation mechanism and model of Paleogene deep sandy conglomerate reservoirs in the Dongying sag. Acta Geologica Sinica.

征, 探究了热演化历程对成藏烃类流体的影响。水洗作用、生物降解、原油裂解等次生改造作用也是引起烃类流体性质和地球化学组成发生改变的重要因素(Lafargue and Barker, 1988; Peters et al., 2005; Di Primio and Horsfield, 2006; Zhang Zhiyao et al., 2019)。

近几年, 东营凹陷北部陡坡带在深层发现大量油气藏, 表现出巨大的勘探前景(宋明水等, 2021)。东营凹陷深层烃类流体涵盖常规油、轻质油、凝析气和干气等多种相态(王永诗等, 2018), 并且不同地区之间流体类型和分布均存在显著差异。前人的研究发现多期次、复杂的地质演化使得深层常发育多期油气充注, 油气藏存在后期改造和调整(何登发等, 2019; 何海清等, 2021)。然而, 深层砂砾岩烃类流体差异化的形成机理并未揭示, 这制约了深层油气成藏认识的进一步深入, 阻碍了对深层不同类型烃类流体分布的预测。因此, 本次研究以东营凹陷北部

陡坡带深层砂砾岩油气藏为例, 依托有机地球化学参数、流体包裹体特征和盆地模拟方法分析了油气来源、生烃充注史、次生改造以及断层输导作用对烃类流体的影响, 揭示并总结了烃类流体差异化形成机制和模式。

1 区域地质概况

渤海湾盆地是我国重要的含油气盆地, 其中东营凹陷位于渤海湾盆地的东南部(图 1a)。东营凹陷的构造格局显示出典型的断陷湖盆特征, 北靠陈家庄凸起和青坨子凸起, 南邻鲁西隆起和广饶凸起, 西接滨县凸起和青城凸起, 凹陷内部发育四个次级洼陷, 分别为民丰洼陷、利津洼陷、牛庄洼陷和博兴洼陷(图 1b)(王永诗等, 2023a)。本次的研究区位于东营凹陷北部陡坡带的盐家地区和胜坨地区(图 1b)。

东营凹陷新生代地层从下至上可依次划分为孔

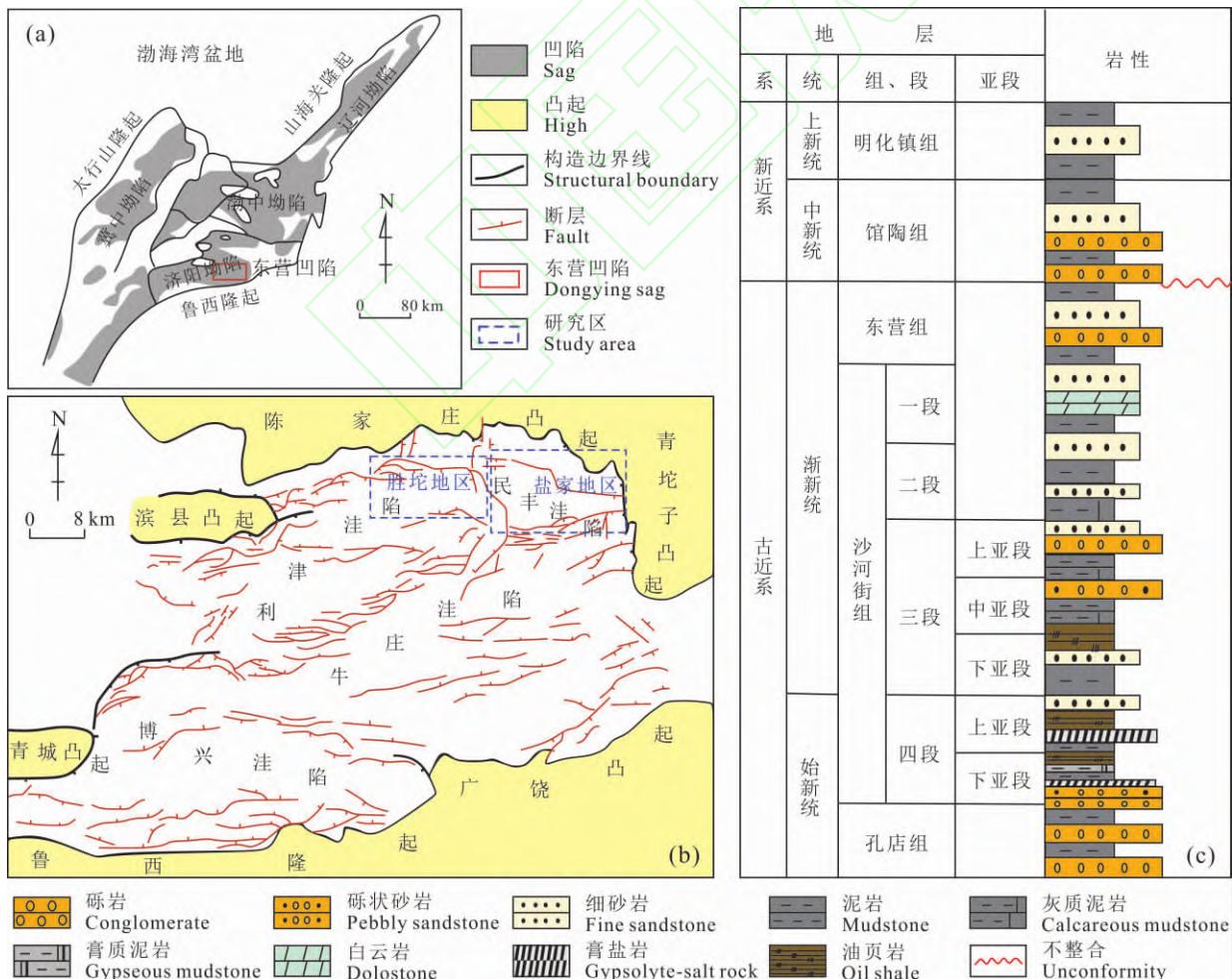


图 1 渤海湾盆地构造单元(a)及东营凹陷地质构造图(b)和地层综合柱状图(c)

Fig. 1 Tectonic units of the Bohai Bay basin (a), and geological structure map (b) and comprehensive stratigraphic column (c) of the Dongying sag

店组、沙河街组、东营组、馆陶组、明化镇组和平原组(宋明水等,2019)。其中,沙河街组由四个段组成,从下至上分别为沙四段(Es_4)、沙三段(Es_3)、沙二段(Es_2)和沙一段(Es_1)。沙四段可进一步划分为沙四段上亚段(Es_4^s)和沙四段下亚段(Es_4^x)(图1c)(王建等,2022)。东营凹陷沙四段沉积时期为冲积扇-湖泊沉积体系,为典型的咸化湖盆。沙四段下亚段主要发育灰黑色页岩、含膏泥岩、含砾砂岩、砾岩和膏盐,沙四段上亚段以黑色泥页岩、含砾砂岩、细砂岩和砾岩为主,相对缺少蒸发岩沉积(刘惠民,2022)。东营北部陡坡带基底断层形态表现为上部陡、下部缓,由此发育多套冲积扇沉积,形成叠置的砂砾岩体。胜坨地区沿边界断层发育多条东西走向的断裂,构成多级断阶,发育冲积扇沉积(图2)。东营凹陷深层沙四段泥岩具有良好的生烃能力,同时与优质的砂砾岩储层相匹配,具有良好的油气勘探

前景。

2 深层砂砾岩体烃类流体差异

东营凹陷深层砂砾岩油气藏类型主要为扇根侧向封堵的岩性油气藏、泥岩包裹砂岩透镜体形成的岩性油气藏和断层-岩性复合油气藏三类(王永诗等,2018)。北部陡坡带油气藏类型在平面和剖面上呈现有规律的展布。以油气的相态来看,盐家地区油气相态类型的多样性高于胜坨地区(图2)。从民丰洼陷中心到盐家地区的北部陡坡带,依次发育干气气藏、凝析气藏和轻质油藏,均聚集于扇根侧向封堵的岩性圈闭中。在盐家地区西侧的盐斜229井区和东侧的永936井区则以油井为主,均沿着民丰洼陷的边缘分布,原油密度介于 $0.81 \sim 0.87 \text{ t/m}^3$,黏度较低,通常低于 $10 \text{ mPa} \cdot \text{s}$ 。随着距洼陷中心的距离越近,油气井中产出的气体成分增多,例如丰

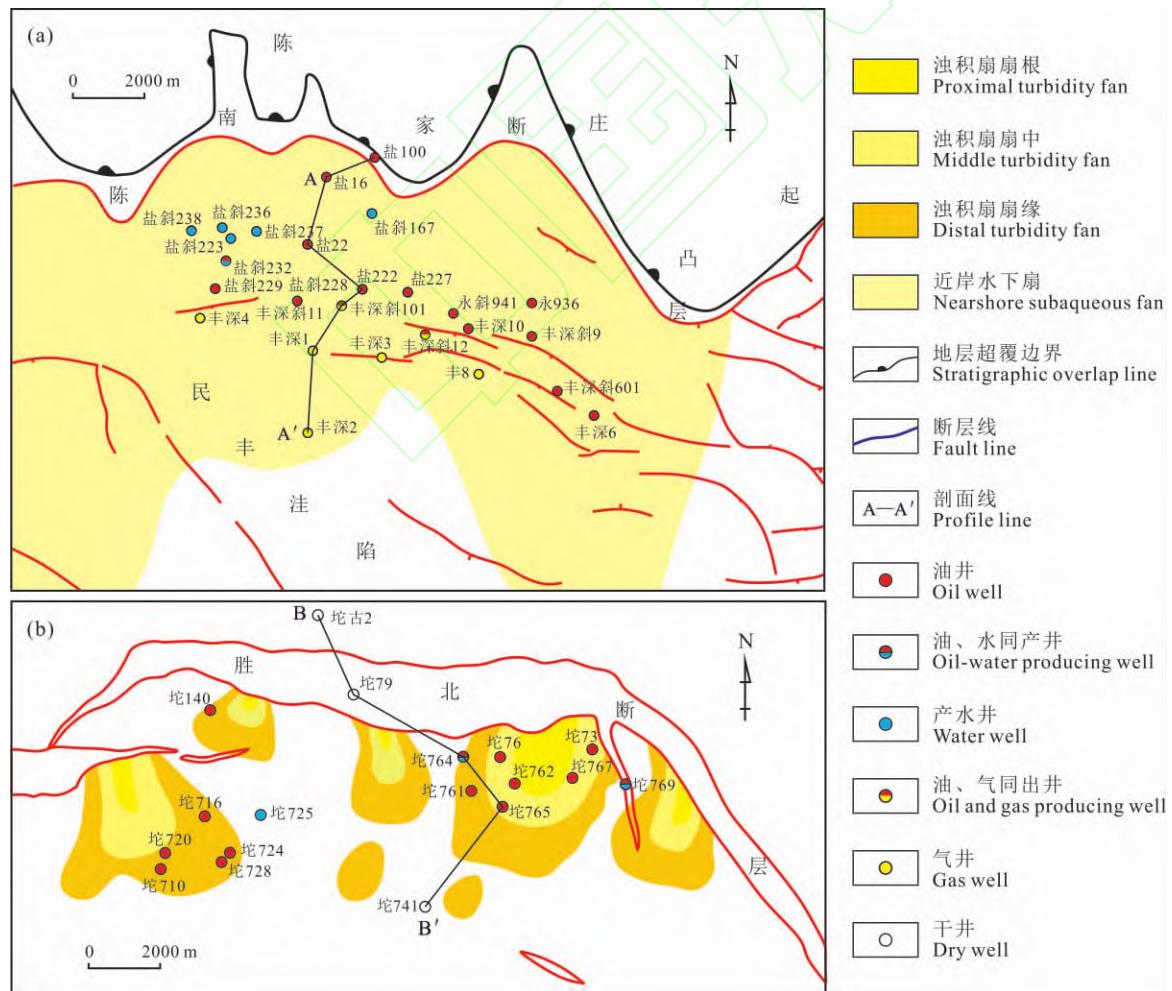


图2 东营凹陷北部陡坡带盐家地区(a)和胜坨地区(b)油气井类型及分布

Fig. 2 The distribution of the multiple types of oil and gas wells along the north steep slope zone in the Yanjia area (a) and Shengtuo area (b) of Dongying sag

深斜 11 井等。并且,在更靠近洼陷中心的位置,丰深 1 井和丰深斜 101 井以产凝析气为主,平均密度为 0.78 t/m^3 ,干燥系数介于 $0.75 \sim 0.85$ 。位于洼陷区的深层储层中发现干气产出,天然气干燥系数大于 0.95,例如丰深 2 井。该分布规律说明盐家地区的砂砾岩储层和民丰洼陷之间的相对位置关系与烃类流体相态类型具有一定的联系(图 2a)。与盐家地区不同的是胜坨地区深层以油藏为主,岩性油气藏的原油伴生气甲烷含量高($65\% \sim 85\%$),组分占比表现为甲烷>乙烷>丙烷,属于 I 类气;断层岩性油气藏的原油伴生气存在轻烃损失,甲烷含量低于 65%,气组分含量表现为甲烷>乙烷<丙烷,同时丙烷和丁烷的百分比含量大于 I 类气中的丙烷和丁烷,属于 II 类气,但均未发生烃类流体相态分异的现象(图 3)。

测井解释结果揭示了东营凹陷深层砂砾岩油气的垂向分布特征。盐家地区油藏主要发育在沙四段

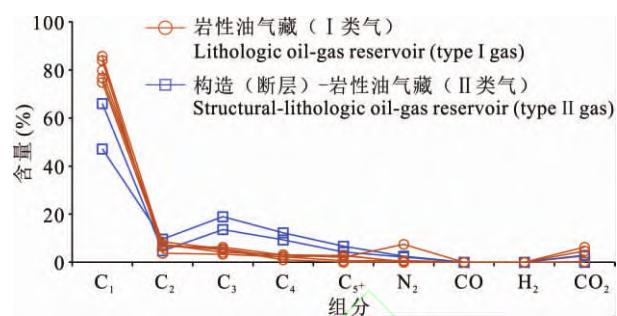


图 3 东营凹陷胜坨地区不同油藏原油伴生气组分分布
Fig. 3 Distribution of associated gas components in different oil reservoirs in the Shengtuo area of the Dongying sag

上亚段,埋深约在 4200 m 以上。深层产气层段主要在沙四段下亚段,埋深为 4300 ~ 4900 m,其中埋深 4400 m 左右的气藏中产出凝析气,埋深 4900 m 以下仅发育干气气藏(图 4a)。胜坨地区的油藏主要发育在埋深 4400 m 以上,同时测井显示存在部分气层,未发育凝析气藏(图 4b)。

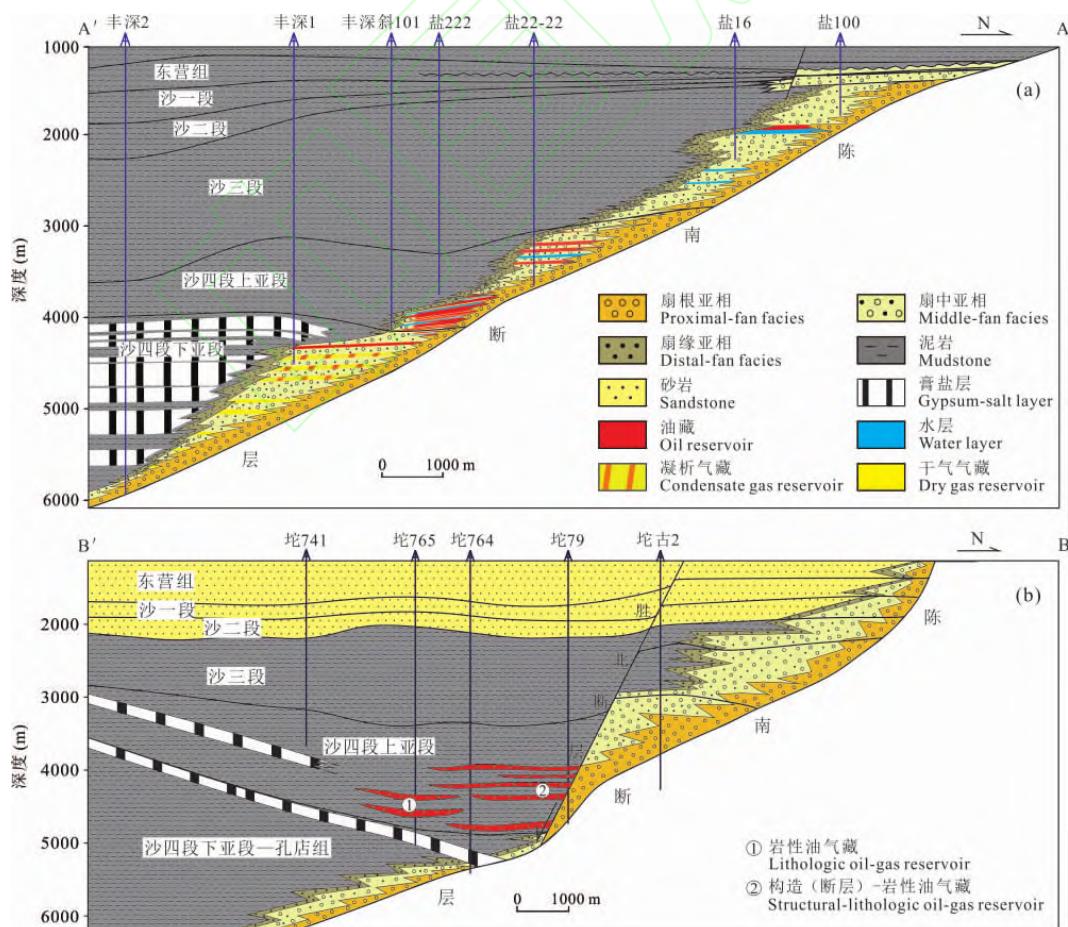


图 4 东营凹陷北部陡坡带油气类型垂向分布

Fig. 4 The vertical distribution of oil and gas types in the north steep slope of the Dongying sag

(a)—盐家地区南北向连井剖面图;(b)—胜坨地区南北向连井剖面图

(a)—north-south trending well-connecting section of the Yanjia area; (b)—north-south trending well-connecting section of the Shengtuo area

3 烃类流体差异化成因及控制因素

深层砂砾岩体的油气分布规律显示,在同一埋藏深度段可能存在多种油气类型(图4),即在埋深4000~5000 m,盐家地区发育凝析气和轻质油,而胜坨地区在同深度段仅发育油藏。深部沙四段的各亚段烃源岩沉积环境不同,生烃母质和热演化程度的差异会导致源岩生成、排出不同的烃类流体(表1)(施和生等,2018;陈承声等,2023)。

本文依据烃源岩和油气的有机地球化学参数,系统地揭示各地区深层砂砾岩油气来源。根据烃源岩参数、实测 R_o 和地层温度、古水深等边界条件,使用PetroMod软件对深层主力烃源岩开展生烃模拟,以明确生烃时期和产物的差异性(平宏伟等,2012)。从供烃源岩生烃热演化、次生改造及断层疏导等方面分析导致烃类流体存在差异的原因,最终依据烃类流体差异化的主控因素将成因划分为热演化-次生改造主控型和热演化-断层疏导主控型两类。

表1 东营凹陷深层沙河街组四段烃源岩特征

Table 1 The characteristics of source rock of the fourth Member of Shahejie Formation in the Dongying sag

层段	岩性	厚度(m)	有机质类型	TOC(%)	镜质组反射率 R_o (%)
沙四段上亚段	暗色泥岩、泥页岩	300~500	以Ⅱ型为主	1.5~6.0	0.6~1.0
沙四段下亚段	纹层状泥岩、含膏泥岩	400~600	I~Ⅱ ₁ 型,以Ⅰ型为主	0.3~3.5	0.9~1.5

3.1 热演化-次生改造主控型

3.1.1 油气来源

东营凹陷盐家地区沙四段原油与泥岩的轻烃气相色谱显示,沙四段下亚段原油和泥岩均具有高含量的2,2-DMC₄、苯和甲苯,以及2-MC₆和3-MC₆,并且2-MC₆丰度高于3-MC₆(图5a、b)。而沙四段上亚段泥岩中2,2-DMC₄、苯、2-MC₆和3-MC₆的丰

度相对较低,与沙四段下亚段原油和泥岩的轻烃分布特征存在显著差异(图5c),这说明沙四段下亚段的原油与泥岩之间具有较强的亲缘关系。另外,正构烷烃和异戊二烯类指标显示沙四段下亚段原油和泥岩相较于沙四段上亚段的泥岩,还原性较弱,成熟度更高(图6a);规则甾烷三角图中指示沙四段下亚段泥岩母质来源偏向于浮游生物和藻类,与沙四段

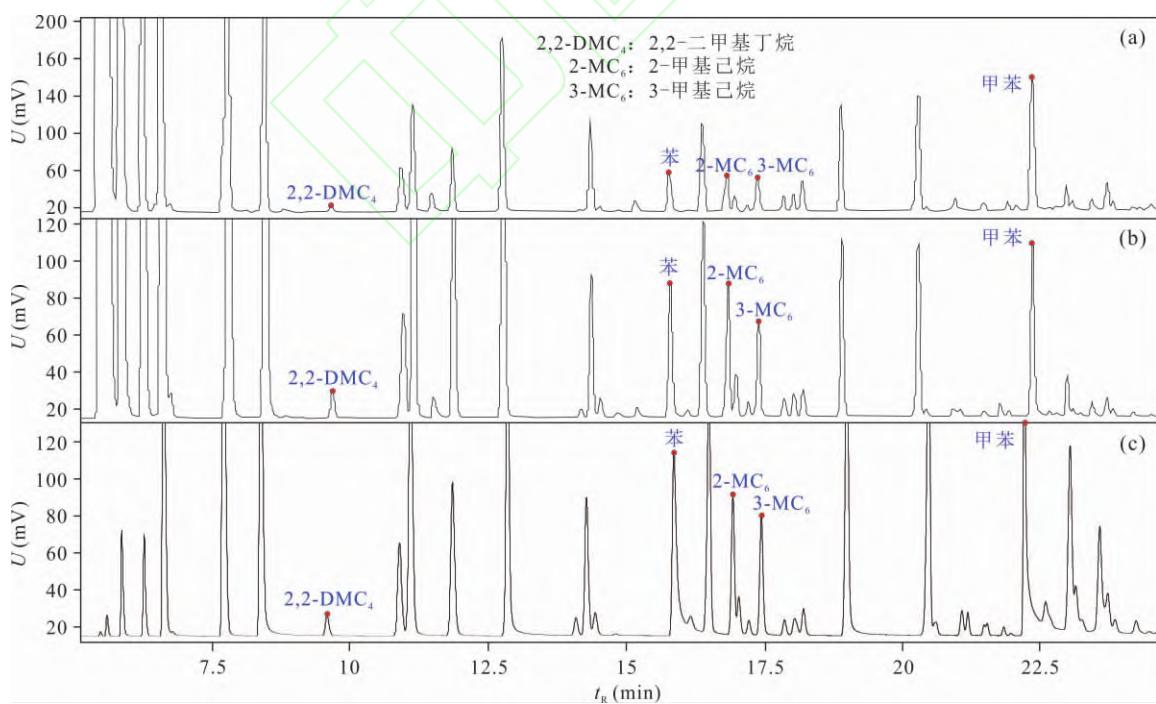


图5 东营凹陷盐家地区沙四段泥岩和原油轻烃气相色谱

Fig. 5 Gas chromatography of mudstone and light hydrocarbon of crude oil in the Es₄, Yanjia area, Dongying sag

(a)—沙四段上亚段泥岩轻烃气相色谱;(b)—沙四段下亚段泥岩轻烃气相色谱;(c)—沙四段下亚段原油轻烃气相色谱

(a)—gas chromatography of light hydrocarbon of mudstone in the Es₄^s; (b)—gas chromatography of light hydrocarbon of mudstone in the Es₄^x; (c)—gas chromatography of light hydrocarbon of crude oil in the Es₄^x

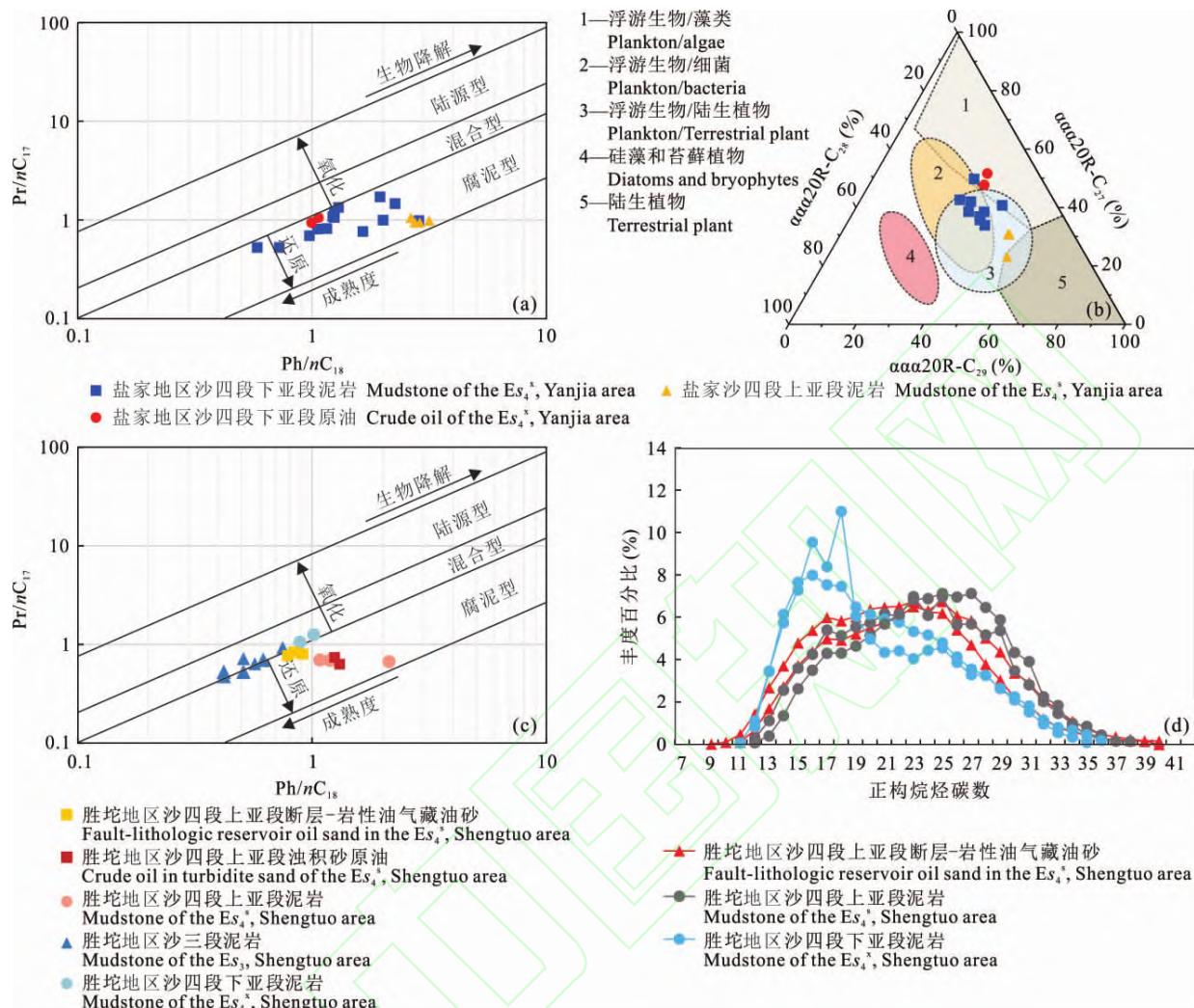


图 6 东营凹陷北部陡坡带深层砂砾岩油气与烃源岩有机地化参数

Fig. 6 Organic geochemical parameters of deep sandy conglomerate petroleum and source rock in the north steep slope zone of the Dongying sag

(a)—盐家地区深层沙四段原油与烃源岩 Pr/nC_{17} 和 Ph/nC_{18} 交会图; (b)—盐家地区沙四段原油与泥岩规则甾烷三角图; (c)—胜坨地区深层原油与烃源岩 Pr/nC_{17} 和 Ph/nC_{18} 交会图; (d)—盐家地区深层沙四段上亚段断层-岩性油藏积砂体中原油与烃源岩正构烷烃分布特征
 (a)—intersection diagram of Pr/nC_{17} and Ph/nC_{18} of crude oil and source rocks, Yanjia area; (b)—triangle diagram of regular sterane from oil and mudstone of the Es_4^s , Yanjia area; (c)—intersection diagram of Pr/nC_{17} and Ph/nC_{18} of deep crude oil and source rocks, Shengtuo area; (d)—distribution characteristics of normal alkanes of crude oil in turbidite sand bodies of fault-lithologic reservoirs and source rocks of the Es_4^s , Yanjia area

下亚段原油的相似度更高,而沙四段上亚段泥岩的有机质来源则偏向于浮游生物和陆生植物(图 6b)。王永诗等(2021)通过对比沙四段原油和泥岩的碳同位素和金刚烷类化合物证实了高成熟度烃源岩对沙四段下亚段原油的贡献,丰深 1 井凝析油折算 R_0 为 1.45%,对应埋深大于 4500 m。因此,综合来看,沙四段下亚段原油来源于同亚段的高成熟度 I 型有机质泥岩(表 1)。王永诗等(2018)的研究表明盐家地区沙四段上亚段原油与沙四段上、下亚段泥岩的姥植比和伽马蜡烷指数相似,规则甾烷均表现为反

“L”型,指示了沙四段上亚段原油为沙四段上、下亚段烃源岩的共同贡献。从有机地球化学参数来看,该地区的扇根封堵岩性油藏存在单一油气源和多源混合两种类型。结合图 4a 中的地层剖面来看,东营凹陷盐家地区近岸水下扇垂向叠置、连通性好,使得砂砾岩中的烃类流体易发生垂向运移和混合,浅部的沙三段原油来源于沙四段下亚段泥岩也证实了该观点(王永诗等,2018)。

3.1.2 生烃及油气充注的影响

烃源岩在不同热演化阶段可产出不同类型的烃

类(Welte and Tissot, 1984; Behar et al., 1992)。低—中成熟阶段(镜质组反射率 $R_o = 0.5\% \sim 1.3\%$)的烃源岩主要生成中—低分子量液态烃类。在高成熟阶段($R_o = 1.3\% \sim 2.0\%$),热裂解作用使得重质液态烃和干酪根转化为轻烃,气态烃量增加,形成凝析气和湿气。残留的干酪根和液态烃在过成熟阶段($R_o > 2.0\%$)会进一步裂解为甲烷,形成干气。东营凹陷深层烃源岩实测 R_o 通常大于 1%,最大可达 1.8%,说明深层烃源岩经历了多阶段的热演化过程,可提供多种相态烃类的充注。另外,东营凹陷盐家地区深层主力烃源岩的生烃模拟结果显示存在三期生烃高峰,第一期在 39 ~ 33 Ma,第二期

和第三期分别在 26 ~ 22 Ma 和 2 ~ 0 Ma(图 7)。东营凹陷经历了早期沉降生烃—构造稳定期—再次沉降生烃—抬升剥蚀—晚期沉降生烃等多个阶段(宋明水等,2019),其构造演化史与模拟的三期生烃史一致。沙四段上亚段和下亚段的烃源岩前两期以生油为主,晚期生油能力减弱,随着地层埋藏加深、温度升高,达到原油裂解温度门限,生成原油裂解气。由于沙四段下亚段埋深更大,晚期生成的原油裂解气量显著高于沙四段上亚段,这进一步说明东营凹陷深层烃源岩生、排烃产物类型的多样性(图 7)。

东营凹陷深层砂砾岩中发育大量的流体包裹体,其中烃类包裹体主要成群分布在长石溶蚀孔隙

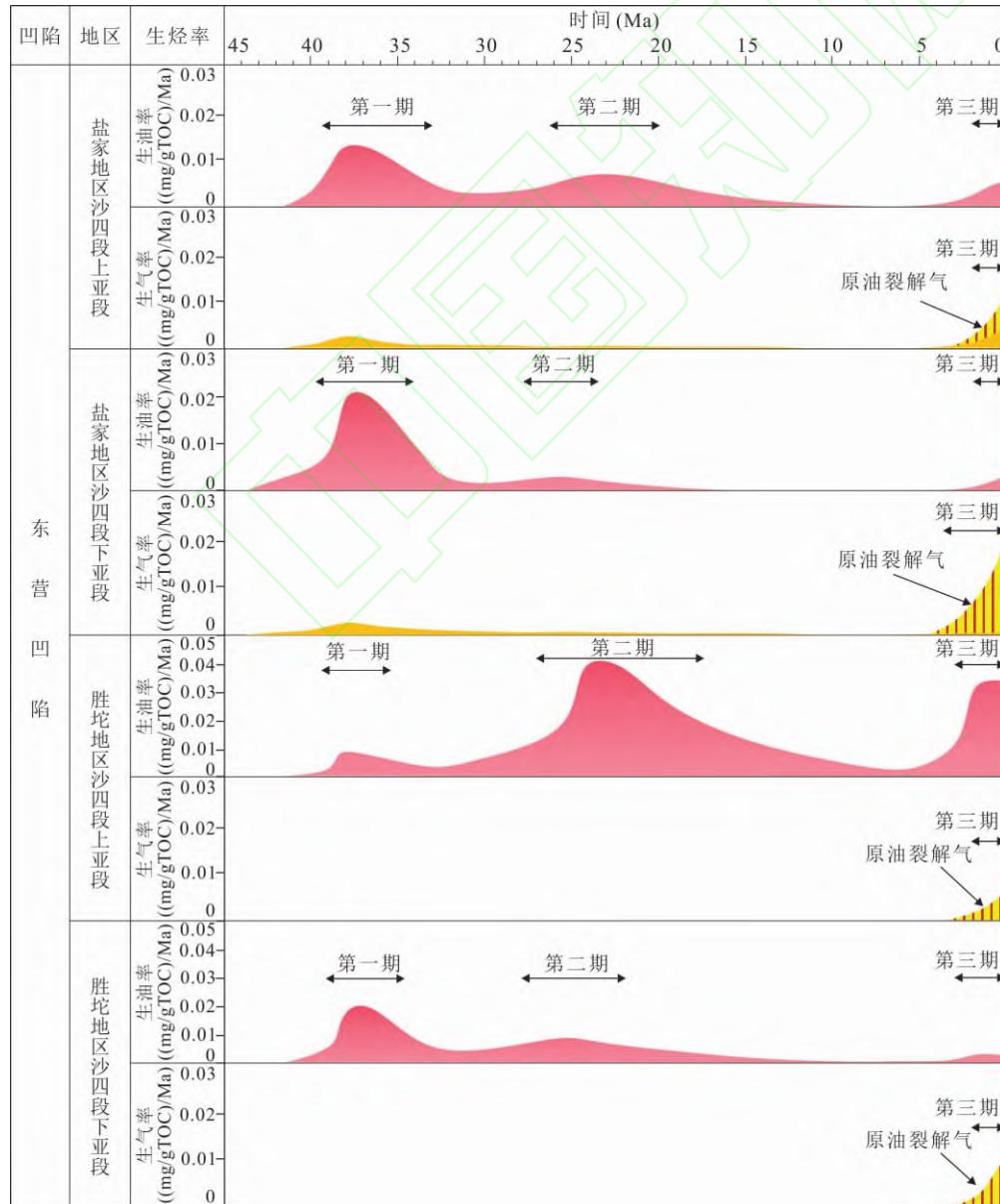


图 7 东营凹陷深层主力烃源岩生烃数值模拟

Fig. 7 Simulated hydrocarbon generation of deep main source rock in the Dongying sag

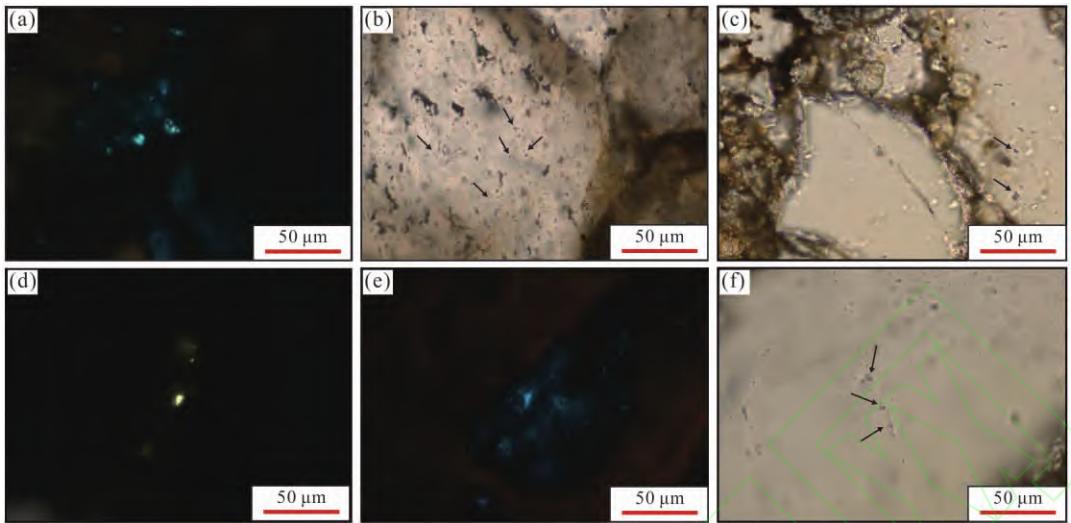


图 8 东营凹陷北部陡坡带盐家和胜坨地区深层砂砾岩储层流体包裹体特征

Fig. 8 Characteristics of fluid inclusions in the deep sandy conglomerate in the Yanjia and Shengtuo areas in the northern steep slope of the Dongying sag

(a)—丰深 1 井, 4322.9 m, 荧光显微镜, 沙四段下亚段, 充填在长石溶蚀孔隙中成群分布的蓝绿色荧光烃类包裹体;(b)—丰深 1 井, 4322.9 m, 单偏光, 沙四段下亚段, 方解石胶结物中成群分布的无色—灰色含盐水包裹体;(c)—坨 764 井, 4170.0 m, 单偏光, 沙四段上亚段, 沿石英颗粒次生微裂隙成带分布的无色含盐水包裹体;(d)—坨 719 井, 3572.7 m, 荧光显微镜, 沙四段上亚段, 石英颗粒的次生微裂隙中发育黄色荧光液烃包裹体;(e)—坨 764 井, 4170.0 m, 荧光显微镜, 沙四段上亚段, 充填在长石溶蚀孔隙中的蓝色荧光液烃包裹体;(f)—坨 764 井, 3951.2 m, 单偏光, 沙四段上亚段, 石英次生微裂隙中发育的无色含盐水包裹体

(a)—well Fengshen 1, 4322.9 m, fluorescence microscope, $E_{\text{S}_4}^x$, blue-green fluorescent hydrocarbon inclusions are distributed in groups in feldspar solution holes; (b)—well Fengshen 1, 4322.9 m, plane-polarized light, $E_{\text{S}_4}^s$, colorless gray hydrocarbon-containing saline inclusions are distributed in calcite cement; (c)—well Tuo 764, 4170.0 m, plane-polarized light, $E_{\text{S}_4}^s$, colorless hydrocarbon-containing saline inclusions are distributed along microfracture zones of quartz; (d)—well Tuo 719, 3572.7 m, fluorescence microscope, $E_{\text{S}_4}^s$, yellow fluorescent liquid hydrocarbon inclusions developed in the secondary microcracks of quartz particles; (e)—well Tuo 764, 4170.0 m, fluorescence microscope, $E_{\text{S}_4}^s$, blue fluorescent liquid hydrocarbon inclusion in feldspar solution holes; (f)—well Tuo 764, 3951.2 m, plane-polarized light, $E_{\text{S}_4}^s$, colorless hydrocarbon-containing saline inclusions developed in the secondary microcracks of quartz

中, 少量在石英次生微裂隙中(图 8a、d、e、f)。无色—灰色盐水包裹体主要沿着石英颗粒成岩微裂隙和微裂隙面呈串珠状或成群分布, 在方解石胶结物中也可观察到少量盐水包裹体成群分布(图 8b、c)。烃类包裹体主要为气相和液相, 在其周围常伴生大量产状相似的盐水包裹体, 表现出共生关系。本文基于流体包裹体的岩相学特征和烃类包裹体荧光颜色判断储层中充注的烃类流体成分和成熟度特征, 以及对应的油气充注时期(陈勇等, 2014; 王琳等, 2017)。盐家地区的烃类包裹体中观察到黄色、绿色、蓝绿色和蓝色荧光的液态烃和无荧光显示且呈灰色的气烃包裹体, 说明存在不同成熟度阶段、多相态烃类的充注(图 9)。第一幕油气充注高峰以黄色—绿色荧光的低熟—成熟液态石油为主; 随着烃源岩成熟度的升高, 烃类产品中气烃组分逐渐增加, 第二幕充注以蓝色荧光的高成熟原油和天然气为主(图 9)。

包友书等(2009)基于高温高压生烃模拟实验揭

示了东营凹陷沙四段烃源岩在不同温度和热演化阶段生成的烃类相态与现今油气藏埋藏深度和实测 R 具有良好的对应关系。轻质油藏和凝析气藏邻近的烃源岩成熟度 R 分别约为 1.1% 和 1.3%, 处于生轻质油和凝析气阶段; 干气气藏埋藏深度大于 5000 m, 烃源岩已进入过成熟阶段(Chen Zhonghong et al., 2022)。综合来看, 烃源岩生烃特征和烃类流体包裹体特征共同反映了供烃源岩的热演化历程对烃类流体类型与性质的直接控制作用, 即烃源岩各热演化阶段的烃类产品与同层段侧向砂砾岩储层中油气类型相对应, 呈现出相态垂向有序分布的特征(图 4a)。

3.1.3 次生改造作用

东营凹陷盐家地区深层砂砾岩油气藏在垂向上流体类型多样, 前文揭示了侧向紧邻的烃源岩生烃热演化史和油气充注过程对深层沙四段上亚段油藏和沙四段下亚段深部干气气藏形成的控制作用。深层沙四段温度均达到东营凹陷原油发生裂解的门限

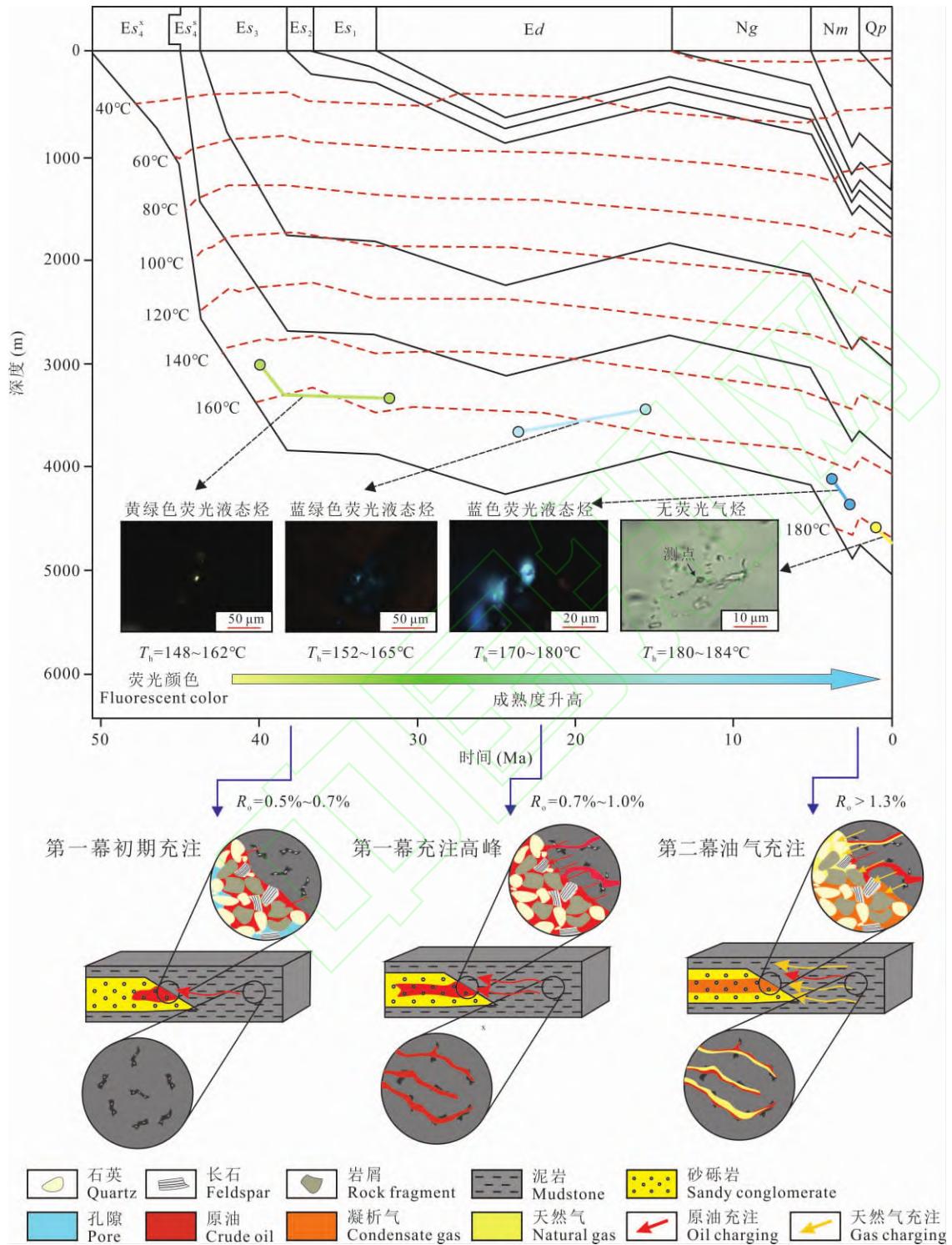


图 9 东营凹陷盐家地区深层砂砾岩油气多期充注过程

Fig. 9 Multi-stage hydrocarbon charging process of deep sandy conglomerate in the Yanjia area, Dongying sag
 T_h 为与烃类包裹体伴生的盐水包裹体均一温度

T_h is the homogenization temperature of saline inclusions associated with hydrocarbon inclusions

温度 160°C (李延钧等, 2010) (图 9), 深部地层中大量原油裂解成气 (图 7)。深层凝析气藏天然气组分和同位素特征表明其成因为原油裂解气和干酪根初次裂解气的混合 (图 10a、b) (王永诗等, 2023a)。然

而, 深层凝析气藏所处深度对应的 R_o 约为 1.3%, 此时烃源岩刚进入生凝析气阶段, 原油裂解转化率低于 5% (Qiao Rongzhen and Chen Zhonghong, 2022), 说明早期古油藏的原油裂解不足以生成大量

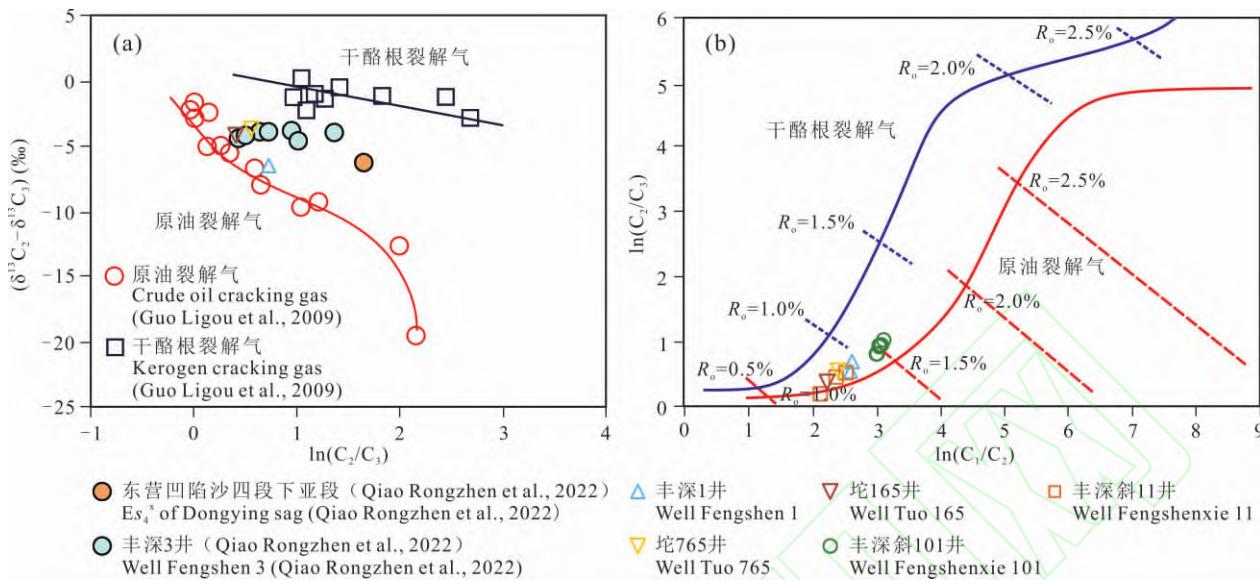


图 10 东营凹陷盐家地区深层凝析气和胜坨地区深层原油伴生气组分和同位素特征(据王永诗等,2023a 修改)

Fig. 10 Composition and isotopic characteristics of deep condensate gas in the Yanjia area and associated gas in the Shengtuo area of the Dongying sag (modified from Wang Yongshi et al., 2023a)

天然气。平宏伟等(2012)利用早期充注的油包裹体组分模拟原油裂解过程中的烃类变化,结果显示早期原油完全裂解可使 CH_4 的摩尔含量从 48.0% 增加到 50.2%。该结果仍与现今凝析气的 CH_4 摩尔百分比相差约 20%,进一步印证了早期古油藏的裂解气量无法形成现今高气油比凝析气藏的观点,推测原油裂解气来源于深部气的充注(Ping Hongwei et al., 2017)。外部天然气充注引起的气侵分馏会导致原油中的正构烷烃损失,使得正构烷烃摩尔分数的对数与其正构烷烃碳数的交汇图呈两段式分布(Kissin, 1987)。东营凹陷深层凝析油 $\text{C}_5 \sim \text{C}_{35}$ 正构烷烃碳数与摩尔分数对数的交汇图显示,拐点碳为 $n\text{C}_{27}$,正构烷烃损失量高,指示深层凝析气藏遭受了强烈气侵作用(图 11a)(Losh et al., 2002)。同时,在显微镜下观察到薄片中原油遭受气侵而形成的沉淀沥青,呈现油质无固定形态,以及部分原油热变质沥青,说明凝析气经历了深部气气侵和原油裂解的改造(图 11b、c)(刘华等,2012)。砂岩储层中捕获的气烃包裹体也证实了晚期气烃的充注(图 9)。另外,东营凹陷盐家地区深层多期、连续叠置的砂砾岩扇体为深部原油裂解气的垂向运移、充注提供了有效的输导通道(图 4a)。因此,东营凹陷盐家地区深层凝析气为干酪根初次裂解气和深部原油裂解气的混合。

3.2 热演化-断层输导主控型

3.2.1 油气来源

对于东营凹陷胜坨地区深层砂岩透镜体岩性油

气藏,其“泥包砂”的地质条件表明油气应来自于周围的泥岩。 $\text{Pr}/n\text{C}_{17}$ 和 $\text{Ph}/n\text{C}_{18}$ 的交会图指示了沙四段上亚段泥岩沉积于还原环境且富腐泥质,沙四段下亚段泥岩的沉积环境偏氧化,有机质为混合型(陈建平等,2016)。沙四段上亚段浊积砂体中的原油与沙四段上亚段泥岩的相似度高,证实了二者间的亲缘关系(图 6c)。另外, $\text{Pr}/n\text{C}_{17}$ 和 $\text{Ph}/n\text{C}_{18}$ 的交会图显示沙四段上亚段断层-岩性复合油气藏的油砂与沙四段上、下亚段烃源岩具有相似性(图 6c)。靠近断层一侧发育的断层-岩性复合油气藏中原油的正构烷烃主峰不明显,推测为沙四段上、下亚段烃源岩生成原油的混合(图 6d)。天然气甲烷碳同位素可以反推生成时的温度(Rooney et al., 1995),通过对比形成温度和实测地层温度之间的关系可判断是否存在天然气的混合。坨 765 井钻遇的沙四段上亚段岩性油气藏的甲烷碳同位素为 $-43.9\text{\textperthousand}$,推算其生成的温度介于 $175 \sim 180^\circ\text{C}$,与地层温度 173°C 之间相差较小。根据赵文智和刘文汇(2008)提出的腐泥型天然气 $\delta^{13}\text{C}_1 - R_\circ$ 的关系反推得到天然气的 R_\circ 为 1.32%,埋深对应的 R_\circ 约为 1.25%,二者成熟度相近说明岩性油气藏中的油气为单一源。沙四段上亚段断层-岩性圈闭中的天然气甲烷碳同位素为 $-50.3\text{\textperthousand}$,对应的生成温度约为 165°C ,明显高于实际地层温度 140°C 。甲烷碳同位素反推计算出的 R_\circ 为 0.77%,比实测 R_\circ 高约 0.2%,表明油气藏中存在高成熟天然气的混合。王圣柱等(2005)的研究发现胜坨地区断裂带和油源断层附近

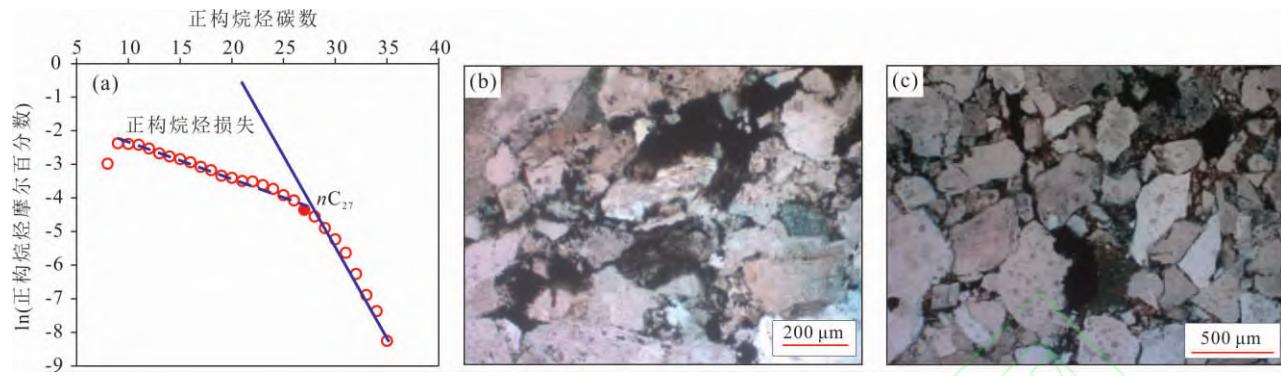


图 11 东营凹陷盐家地区深层原油遭受次生改造后的正构烷烃特征及储层薄片镜下照片

Fig. 11 Normal alkanes characteristics of deep crude oil and photomicrographs of thin section of the corresponding reservoir in the Yanjia area of the Dongying sag after secondary alteration

(a)—丰深 1 井, 4317~4343 m, 凝析油 $C_5 \sim C_{35}$ 烷烃碳数与摩尔分数对数的交汇图;(b、c)—丰深 1 井, 4350 m, 单偏光, 凝析气藏储层油质沥青(b)和焦沥青(c)

(a)—well Fengshen 1, 4317~4343 m, intersection diagram of carbon number and logarithm of molar fraction of $C_5 \sim C_{35}$ alkanes in condensate oil; (b, c)—well Fengshen 1, 4350 m, plane polarized light, oil bitumen (b) and coke bitumen (c) in the condensate gas reservoir

的原油存在混源的特征。因此,断裂垂向断穿沟通多套砂体和烃源岩会使得油气在沿断层-砂体复合输导体系运移和聚集的过程中发生混合(图 4b)。

3.2.2 生烃及油气充注的影响

东营凹陷胜坨地区沙四段上亚段和下亚段烃源岩的生烃模拟结果显示,其生烃史与盐家地区相似,同样存在三期生烃高峰,早期生烃产物为液相石油,晚期既生油又生气(图 7)。另外,烃类流体包裹体岩相学的分析表明,胜坨地区砂砾岩储层早期充注了淡黄色和黄绿色的液态烃,晚期为蓝色气-液态烃和无荧光的气态烃(图 8c-f),说明烃源岩可达到高成熟生气阶段。该特征与模拟的生烃演化史特征一致,表明该地区深层砂砾岩中的油气类型与烃源岩演化密切相关。天然气碳同位素和组分特征指示了胜坨深层原油伴生气同样为干酪根裂解气和原油裂解气的混合(图 10)。虽然烃源岩存在生气阶段,但生气量远低于盐家地区,且原油裂解转化率低(图 7)。泥岩包裹的砂岩透镜体不存在深部天然气气侵的条件,圈闭内有限的气量无法引起原油发生相变。因此,深层烃源岩主要供给的液态烃使得邻近储层中的油气保持单一油相(图 7)。

3.2.3 断层输导对烃类组分的影响

在实际勘探中,坨 765 井钻遇的浊积砂岩透镜体岩性油藏中天然气甲烷含量为 79.8%,乙烷和丙烷含量占比分别为 7.3% 和 4.1%,甲烷含量高,组分占比表现为甲烷>乙烷>丙烷,属于 I 类气(图 3)。邻近胜北断层钻遇的断层-岩性油气藏中天然气甲烷含量低于 65%,存在丙烷含量高于乙烷的现

象,属于 II 类气,具有轻组分损失的特征(图 3)。胜北断层发育于沙三段沉积以前,持续活动到明化镇沉积时期,说明从深层烃源岩生油到生气的阶段,断层均处于开启状态(于翠玲等,2005)。另外,两类油气藏的地质条件结合油气来源的结果反映了胜北断层具备垂向疏导油气的能力,断层的活动可能会引起油气藏中轻组分的散失(张水昌等,2012)。因此,认为断层的活动和输导作用导致了紧靠断层的油藏中天然气轻组分的散失,形成 II 类气富集于断层-岩性油气藏中。

综合来看,烃源岩的热演化过程控制了油气藏中流体的初始相态,在未受到外部因素影响的油气藏中,流体具有很强的继承性,即油气类型与烃源岩对应演化阶段的产物一致,以东营凹陷沙四段上亚段油藏为代表。次生改造作用对油气藏流体组分的影响显著,早期油藏在经历热裂解、气侵后,烃类组分的改变可形成凝析气藏和干气气藏,这取决于油藏遭受改造的程度。因此,东营凹陷沙四段深层凝析气藏的形成与次生改造作用密切相关。另外,断层的活动和输导作用会引起油气藏中天然气轻组分的散失,形成不同类型的油藏伴生气。因此,断层也是影响烃类流体组分和性质的重要因素之一,在胜坨地区存在该因素的影响。

4 深层烃类流体差异化形成模式

4.1 热演化-次生改造主导的相态垂向分异模式

该类模式中油气流体相态类型在垂向上发生分异,从深部至浅部依次发育干气、凝析气和轻质油

(图 4a)。油气的形成聚集过程受到热演化程度和次生改造的影响。对比盐家地区和胜坨地区来看,盐家地区深层多期叠置的砂砾岩扇体为气侵这一次生改造作用提供了良好的运移输导条件,胜坨地区孤立的浊积扇体则限制了烃类流体间的沟通和混合。因此,盐家地区油气垂向分异模式的发育依托于沉积环境和热演化的耦合。

在第一幕生烃充注期,沙四段上、下亚段泥岩均进入“生油窗”,向邻近的砂砾岩扇体储层中充注了大量的原油。原油在浮力的作用下沿着叠置的扇体向浅部运移,部分原油可运移至浅层沙三段构造-岩性圈闭中成藏(王永诗等,2018)。原油在垂向运移的过程中逐渐在储层中形成油润湿相的优势运移通道,有利于后期油气的运移。此时,从深至浅,砂砾岩扇体中均聚集了大量液态石油(图 12a)。在进入第二幕生烃充注期之后,沙四段烃源岩在垂向上的热演化差异导致生成、充注的烃类发生变化。沙四段上亚段泥岩仍处于成熟生油阶段,沙四段下亚段泥岩进入高成熟—过成熟阶段,地层温度超过160°C,达到原油裂解生气的门限温度(Horsfield et al., 1992; 李延钧等,2010),形成了大量的裂解气,使得沙四段上亚段砂砾岩储层中多富集液态烃,沙四段下亚段以聚集气态烃为主(王永诗等,2023b)

(图 7,图 9)。同时,沙四段下亚段下部原油大量裂解形成超压环境并诱发微裂缝,使得部分生成的裂解气沿着早期形成的运移通道向上运移,与上部的低裂解转化率的油藏混合。沙四段下亚段上部的古油藏在遭受热裂解的同时受到两类天然气的充注,一是前文提及的深部原油裂解气,二是邻近高成熟度泥岩生成的气。外部天然气的充注和混合使得油藏的烃类组分变轻,临界条件发生改变,油藏转变为凝析气藏(图 12b)。并且,晚期的胶结作用和储层沥青导致扇中的运移通道被封堵,阻止了下部气烃的散失。因此,沙四段上亚段的油藏并未受到气侵的影响,仍然保持液态烃相(图 12b)。

4.2 热演化-断层输导主导的气体组分分异模式

与盐家地区相比,胜坨地区深层烃类流体的差异主要体现在原油伴生气的烃类组分上。烃源岩热演化过程导致的差异不大,早期为原油,晚期为原油和气。藏内聚集的气为溶解态,整体保持液态烃相。胜北断层的活动和垂向输导性显著地影响了不同油藏中的气烃组分。

在第一幕主生烃期,沙四段上亚段泥岩达到热成熟生烃阶段,向浊积扇储层中充注原油。另外,沙四段下亚段泥岩生成的原油沿断层-砂体输导体系运移至沙四段上亚段的断层-岩性圈闭中聚集(图

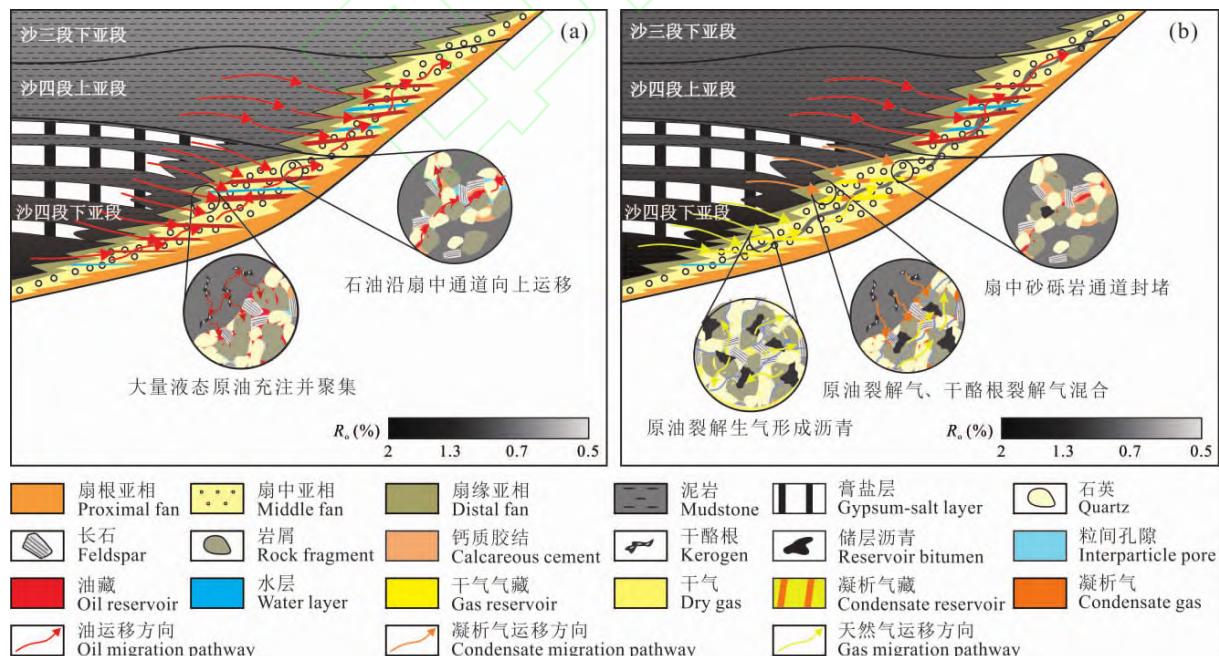


图 12 东营凹陷热演化-次生改造主导的深层砂砾岩烃类流体差异化形成模式

Fig. 12 The deep sandy conglomerate reservoir fluid formation model dominated by thermal evolution and secondary transformation in the Dongying sag

(a)—第一幕主生烃期;(b)—第二幕主生烃期

(a)—the first major hydrocarbon generation period; (b)—the second major hydrocarbon generation period

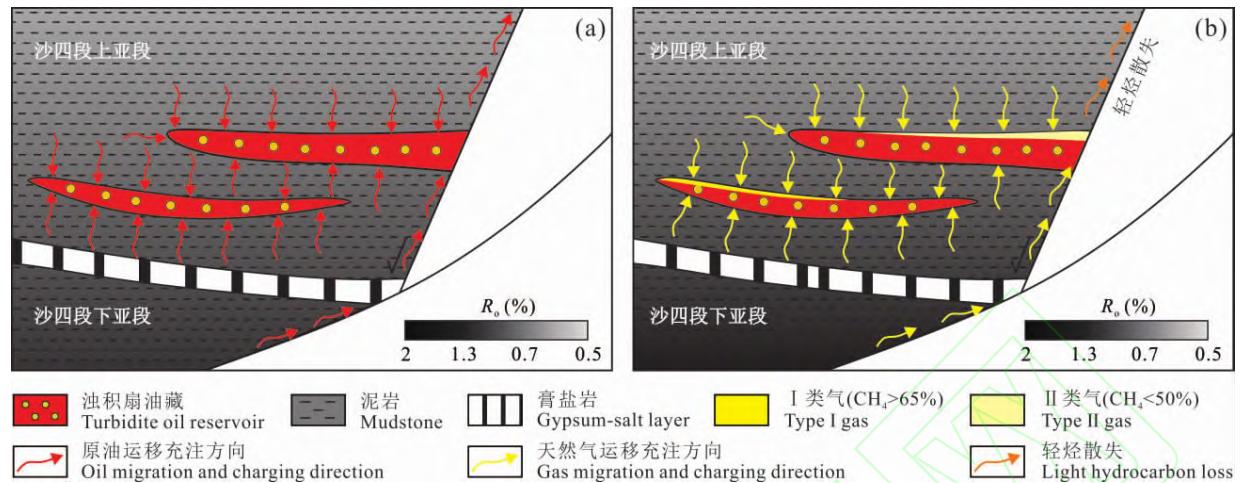


图 13 东营凹陷热演化-断层主导的深层砂砾岩烃类流体差异化形成模式

Fig. 13 The deep sandy conglomerate reservoir fluid formation model dominated by thermal evolution and the transport of fault in the Dongying sag

(a)—第一幕主生烃期;(b)—第二幕主生烃期;图中天然气的颜色用于指示不同的组分特征,并非表示游离态的气顶

(a)—the first major hydrocarbon generation period; (b)—the second major hydrocarbon generation period; the colors of natural gas in the figure are used to indicate the different components and do not represent the free gas cap

13a)。随着热演化程度的加深,泥岩达到高成熟阶段,形成并充注湿气。同时,地层温度达到原油裂解生气的条件,原油裂解气与干酪根初次裂解气混合后在岩性油藏中聚集形成Ⅰ类原油伴生气(溶解态)。由于断层的泄压和输导作用,断层-岩性圈闭中的油气发生轻烃的散失,形成Ⅱ类原油伴生气(溶解态)(图13b)。地层温度限制了胜坨地区的原油裂解程度,相对独立的流体环境使得该地区深层烃类流体保持液态油相。

5 结论

(1) 东营凹陷北部陡坡带深层油气类型在空间分布上表现出显著差异。盐家地区深层油气类型多样且垂向有序分布;胜坨地区油气类型相对单一,存在气烃组分的差异。

(2) 烃源岩的热演化控制了烃类流体的初始相态,深层砂砾岩体中的烃类流体均具有很强的继承性。沉积特征从客观上影响着次生改造作用的发生,在扇体叠置且流体环境相对开放的盐家地区,原油热裂解生气和外部气侵可有效地影响烃类流体的垂向分布,形成凝析气藏和干气气藏。而流体环境相对封闭的浊积扇体中,烃类流体往往保持单一类型。另外,断层活动期间的输导作用会引起气烃中轻组分的散失。

(3) 根据东营凹陷深层烃类流体的分布差异和成因机制,建立了两类烃类流体差异化形成模式,一

是热演化-次生改造主导的相态垂向分异模式,二是热演化-断层输导主导的气体组分分异模式。

References

- Bao Youshu, Zhang Linye, Zhang Shouchun, Wang Yurong, Zhang Lei. 2009. Distribution of phase type of hydrocarbon resources in Dongying depression. *Acta Petrolei Sinica*, 30(4): 530~535 (in Chinese with English abstract).
- Behar F, Kressmann S, Rudkiewicz J L, Vandebroucke M. 1992. Experimental simulation in a confined system and kinetic modelling of kerogen and oil cracking. *Organic Geochemistry*, 19(1-3): 173~189.
- Chen Chengsheng, Deng Rui, Zhang Haizhu, Wang Yunpeng. 2023. Quantitative simulation of phase evolution for ultra-deep oil and gas from Lower Cambrian strata of well Luntan-1 in the Tarim basin. *Natural Gas Geoscience*, 34(1): 96~110 (in Chinese with English abstract).
- Chen Jianping, Wang Xulong, Deng Chunping, Liang Digang, Zhang Yueqian, Zhan Zhe, Ni Haiyan, Zhi Dongming, Yang Haibo, Wang Yutao. 2016. Oil and gas source, occurrence and petroleum system in the Junggar basin, northwest China. *Acta Geologica Sinica*, 90(3): 421~450 (in Chinese with English abstract).
- Chen Yong, Zhou Zhenzhu, Gao Yongjin, Wang Xintao, Gao Ting, Chen Zhonghong. 2014. Hydrocarbon inclusions in salt rock of Dongying sag, Jiyang depression, and their geological implications. *Geological Review*, 60(2): 464~472 (in Chinese with English abstract).
- Chen Zhonghong, Qiao Rongzhen, Li Chenyi, Wang Dongye, Gao Yang. 2022. Hydrocarbon generation potential and model of the deep lacustrine source rocks in the Dongying depression, Bohai Bay basin. *Marine and Petroleum Geology*, 140 (105656): 1~22.
- Di Primo R, Horsfield B. 2006. From petroleum-type organofacies to hydrocarbon phase prediction. *AAPG Bulletin*, 90(7): 1031~1058.
- Guo Ligou, Xiao Xianming, Tian Hui, Song Zhiguang. 2009. Distinguishing gases derived from oil cracking and kerogen maturation: Insights from laboratory pyrolysis experiments. *Organic Geochemistry*, 40(10): 1074~1084.

- He Dengfa, Ma Yongsheng, Liu Bo, Cai Xunyu, Zhang Yijie, Zhang Jian. 2019. Main advances and key issues for deep-seated exploration in petrolierous basins in China. *Earth Science Frontiers*, 26(1): 1~12 (in Chinese with English abstract).
- He Haiqing, Fan Tuzhi, Guo Xujie, Yang Tao, Zheng Min, Huang Fuxi, Gao Yang. 2021. Major achievements in oil and gas exploration of PetroChina during the 13th Five-Year Plan period and its development strategy for the 14th Five-Year Plan. *China Petroleum Exploration*, 26 (1): 17 ~ 30 (in Chinese with English abstract).
- Horsfield B, Schenk H J, Mills N, Welte D H. 1992. An investigation of the in-reservoir conversion of oil to gas: Compositional and kinetic findings from closed-system programmed-temperature pyrolysis. *Organic Geochemistry*, 19 (1-3): 191~204.
- Jia Chengzao, Zhang Shuichang. 2023. The formation of marine ultra-deep petroleum in China. *Acta Geologica Sinica*, 97 (9): 2775~2801 (in Chinese with English abstract).
- Kissin Y V. 1987. Catagenesis and composition of petroleum: Origin of *n*-alkanes and isoalkanes in petroleum crudes. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 51(9): 2445~2457.
- Lafargue E, Barker C. 1988. Effect of water washing on crude oil compositions. *AAPG Bulletin*, 72(3): 263~276.
- Li Jianzhong, Tao Xiaowan, Bai Bin, Huang Shipeng, Jiang Qingchun, Zhao Zhenyu, Chen Yanyan, Ma Debo, Zhang Liping, Li Ningxi, Song Wei. 2021. Geological conditions, reservoir evolution and favorable exploration directions of marine ultra-deep oil and gas in China. *Petroleum Exploration & Development*, 48 (1): 52 ~ 67 (in Chinese with English abstract).
- Li Yanjun, Song Guoqi, Guo Ruichao, Yang Xiancheng, Chen Yicai, Luo Yijun. 2010. A fossil oil-reservoir and the gas origin in the Lower Sha-4 Member of the well Fengshen-1 area, thenorth Dongying zone of the Jiyang depression. *Oil & Gas Geology*, 31(2): 173~179 (in Chinese with English abstract).
- Liu Hua, Jiang Youlu, Xu Haoqing, Song Guoqi, Cai Dongmei. 2012. Genetic types and accumulation model of the deep cracked gas pools of Mingfeng area in Dongying sag. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 42(6): 1638 ~ 1646 (in Chinese with English abstract).
- Liu Huimin. 2022. Geological particularity and exploration practice of Paleogene shale oil in Jiyang depression: A case study of the upper submember of Member 4 to the lower submember of Member 3 of Shahejie Formation. *Acta Petrolei Sinica*, 43(5): 581~594 (in Chinese with English abstract).
- Losh S, Cathles L, Meulbroek P. 2002. Gas washing of oil along a regional transect, offshore Louisiana. *Organic Geochemistry*, 33(6): 655~663.
- Peters K E, Walters C C, Moldowan J M. 2005. The Biomarker Guide: Volume 2, Biomarkers and Isotopes in Petroleum Systems and Earth History. Cambridge: Cambridge University Press.
- Ping Hongwei, Chen Honghan, Song Guoqi, Liu Huimin. 2012. Accumulation history of the deeply buried condensate reservoir in Minfeng sag of the northern Dongying depression and its exploration significance. *Acta Petrolei Sinica*, 33(6): 970~977 (in Chinese with English abstract).
- Ping Hongwei, Chen Honghan, Jia Guanghua. 2017. Petroleum accumulation in the deeply buried reservoirs in the northern Dongying depression, Bohai Bay basin, China: New insights from fluid inclusions, natural gas geochemistry, and 1-D basin modeling. *Marine and Petroleum Geology*, 80: 70~93.
- Qiao Rongzhen, Chen Zhonghong. 2022. Petroleum phase evolution at high temperature: A combined study of oil cracking experiment and deep oil in Dongying depression, eastern China. *Fuel*, 326: 124978.
- Qiao Rongzhen, Chen Zhonghong, Li Chenyi, Wang Dongye, Gao Yang, Zhao Lanquan, Li Youqiang, Liu Jinyou. 2022. Geochemistry and accumulation of petroleum in deep lacustrine reservoirs: A case study of Dongying depression, Bohai Bay basin. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 213: 110433.
- Rooney M A, Claypool G E, Chung H M. 1995. Modeling thermogenic gas generation using carbon isotope ratios of natural gas hydrocarbons. *Chemical Geology*, 126 (3-4): 219 ~ 232.
- Shi Hesheng, Niu Chengmin, Hu Anwen, Li Huiyong, Yu Haibo. 2018. Phase characteristic of middle and deep hydrocarbon in the southwest zone of Bozhong sag and its controlling factors. *Oil Drilling & Production Technology*, 40 (S1): 9 ~ 13 (in Chinese with English abstract).
- Song Mingshui, Wang Huiyong, Zhang Yunxin. 2019. “Extrusion, tension and strike-slip” mountain forming mechanism and reservoir type of buried hills in Jiyang depression. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 26(4): 1~8 (in Chinese with English abstract).
- Song Mingshui, Wang Yongshi, Hao Xuefeng, An Tianxia. 2021. Petroleum systems and exploration potential in deep Paleogene of the Dongying sag, Bohai Bay basin. *Oil & Gas Geology*, 42 (6): 1243~1254 (in Chinese with English abstract).
- Wang Jian, Peng Jie, Cao Yingchang, Liu Keyu, Song Mingshui, Liu Huimin. 2022. Mid-Late Eocene paleoclimate characteristics and significance in the Dongying depression: An example from well HK-1. *Acta Sedimentologica Sinica*, 40(4): 1059 ~ 1072 (in Chinese with English abstract).
- Wang Lin, Zhao Mengjun, Meng Qingxiang, Wang Peng, Wang Ke, Yuan Haili, Shen Lejun, Lei Gang. 2017. Analysis of hydrocarbon accumulation process in middle-deep reservoirs of Yingxi area, Qaidambasin. *Natural Gas Geoscience*, 28(12): 1846~1854 (in Chinese with English abstract).
- Wang Shengzhu, Jin Qiang, Tian Yimin. 2005. Study of oil source and hydrocarbon accumulation characteristics in Shengtuoregion of Dongying depression. *Special Oil & Gas Reservoirs*, (4): 24 ~ 27+104 (in Chinese with English abstract).
- Wang Yongshi, Hao Xuefeng, Hu Yang. 2018. Orderly distribution and differential enrichment of hydrocarbon in oil-rich sags: A case study of Dongying sag, Jiyang depression, Bohai Bay basin, East China. *Petroleum Exploration and Development*, 45(5): 785~794 (in Chinese with English abstract).
- Wang Yongshi, Chen Tao, Zhang Pengfei, Zhai Zheng. 2021. Exploration potential and direction of Palaeogene light crude oil reservoirs in Jiyang depression. *Acta Petrolei Sinica*, 42(12): 1605~1614 (in Chinese with English abstract).
- Wang Yongshi, Gong Jianqiang, Chen Dongxia, Qiu Yibo, Mao Shuwei, Lei Wenzhi, Wang Qiaochu. 2023a. Phase evolution and accumulation mode of hydrocarbons in deep coarse-grained clastic reservoirs in the Yanjia area, Dongying sag, Bohai Bay basin. *Oil & Gas Geology*, 44(5): 1159 ~ 1172 (in Chinese with English abstract).
- Wang Yongshi, Hao Xuefeng, An Tianxia, Zhang Pengfei, Xiong Wei, Qin Feng. 2023b. 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. *Acta Petrolei Sinica*, 44(7): 1058 ~ 1071, 1150 (in Chinese with English abstract).
- Welte D H, Tissot P B. 1984. Petroleum formation and occurrence. Berlin: Springer-Verlag, 1~554.
- Yang Haijun, Chen Yongquan, Tian Jun, Du Jinhua, Zhu Yongfeng, Pan Wenqing, Yang Pengfei, Li Yong, An Haiping. 2022. An important discovery in well Luntan-1 of the Tarim basin, China, and its significance for ultra-deep oil and gas exploration. *China Petroleum Exploration*, 25 (2): 62 ~ 72 (in Chinese with English abstract).
- Yu Cuiling, Zeng Jianhui, Lin Chengyan, Li Baogang, Guan Xiaoyan. 2005. Evidences of fluid flow along fault zones in Shengbei fault zone of Dongying depression. *Acta Petrolei Sinica*, 26(4): 34~38 (in Chinese with English abstract).

- Zhang Shuichang, Zhang Bin, Yang Haijun, Zhu Guangyou, Su Jin, Wang Xiaomei. 2012. Adjustment and alteration of hydrocarbon reservoirs during the late Himalayan period, Tarim basin, NW China. *Petroleum Exploration and Development*, 39 (6): 668~680 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Zhiyao, Zhang Yijie, Zhu Guangyou, Chi Linxian, Han Jianfa. 2019. Impacts of thermochemical sulfate reduction, oil cracking, and gas mixing on the petroleum fluid phase in the Tazhong area, Tarim basin, China. *Energy & Fuels*, 33(2): 968~978.
- Zhao Wenzhi, Liu Wenhui. 2008. *Basic Research on Formation and Distribution of High-Efficiency Gas Reservoirs and Economic Development of Condensate and Low-Efficiency Gas Reservoirs*. Beijing: Science Press (in Chinese with English abstract).
- Zhou Xinhua, Zhang Rucai, Li Huiyong, Wang Baoquan, Guo Yonghua. 2017. Major controls on natural gas accumulations in deep-buried hills in Bohai depression, Bohai Bay basin. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)*, 41(1): 42~50 (in Chinese with English abstract).
- Zhu Guangyou, Li Jingfei, Zhang Zhiyao. 2021. Origin of deep oil and gas phase state diversity and evaluation of secondary geochemistry intensity: A case study of marine oil and gas in Tarim basin. *Earth Science*, 1~17 (in Chinese with English abstract).
- 宋明水, 王惠勇, 张云银. 2019. 济阳坳陷潜山“挤-拉-滑”成山机制及油气藏类型划分. *油气地质与采收率*, 26(4): 1~8.
- 宋明水, 王永诗, 郝雪峰, 安天下. 2021. 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. *石油与天然气地质*, 42(6): 1243~1254.
- 王健, 彭捷, 操应长, 刘可禹, 宋明水, 刘惠民. 2022. 东营凹陷中晚始新世古气候演化特征及其意义——以Hk1井为例. *沉积学报*, 40(4): 1059~1072.
- 王琳, 赵孟军, 孟庆洋, 王鹏, 王科, 袁海莉, 申磊军, 雷刚. 2017. 柴达木盆地英西地区中深层油气成藏过程分析. *天然气地球科学*, 28(12): 1846~1854.
- 王圣柱, 金强, 田义民. 2005. 东营凹陷胜坨地区油源及其成藏特征研究. *特种油气藏*, (4): 24~27+104.
- 王永诗, 郝雪峰, 胡阳. 2018. 富油凹陷油气分布有序性与富集差异性——以渤海湾盆地济阳坳陷东营凹陷为例. *石油勘探与开发*, 45(5): 785~794.
- 王永诗, 陈涛, 张鹏飞, 翟正. 2021. 济阳坳陷古近系轻质原油油藏勘探潜力与方. *石油学报*, 42(12): 1605~1614.
- 王永诗, 巩建强, 陈冬霞, 邱怡博, 范书巍, 雷文智, 杨怀宇, 王翘楚. 2023a. 渤海湾盆地东营凹陷盐家地区深层砂砾岩油气藏相态演化及成藏过程. *石油与天然气地质*, 44(5): 1159~1172.
- 王永诗, 郝雪峰, 安天下, 张鹏飞, 熊伟, 秦峰. 2023b. 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. *石油学报*, 44(7): 1058~1071, 1150.
- 杨海军, 陈永权, 田军, 杜金虎, 朱永峰, 李洪辉, 潘文庆, 杨鹏飞, 李勇, 安海亭. 2022. 塔里木盆地轮探1井超深层油气勘探重大发现与意义. *中国石油勘探*, 25(2): 62~72.
- 于翠玲, 曾溅辉, 林承焰, 李宝刚, 管小燕. 2005. 断裂带流体活动证据的确定——以东营凹陷胜北断裂带为例. *石油学报*, 26(4): 34~38.
- 张文昌, 张斌, 杨海军, 朱光友, 苏劲, 王晓梅. 2012. 塔里木盆地喜马拉雅晚期油气藏调整与改造. *石油勘探与开发*, 39(6): 668~680.
- 赵文智, 刘文汇. 2008. 高效天然气藏形成分布与凝析、低效气藏经济开发的基础研究. 北京:科学出版社.
- 周心怀, 张如才, 李慧勇, 王保全, 郭永华. 2017. 渤海湾盆地渤海凹陷深埋古潜山天然气成藏主控因素探讨. *中国石油大学学报(自然科学版)*, 41(1): 42~50.
- 朱光友, 李婧菲, 张志遥. 2021. 深层油气相态多样性成因与次生地球化学作用强度评价——以塔里木盆地海相油气为例. *地球科学*, 1~17. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1874.P.20211108.1622.004.html>.

参 考 文 献

- 包友书, 张林晔, 张守春, 王宇蓉, 张蕾. 2009. 东营凹陷油气资源相态类型分布规律. *石油学报*, 30(4): 530~535.
- 陈承声, 邓瑞, 张海祖, 王云鹏. 2023. 塔里木盆地轮探1井下寒武统超深层油气相态演化定量模拟. *天然气地球科学*, 34(1): 96~110.
- 陈建平, 王绪龙, 邓春萍, 梁狄刚, 张越迁, 赵喆, 倪云燕, 支东明, 杨海波, 王屿涛. 2016. 准噶尔盆地油气源、油气分布与油气系统. *地质学报*, 90(3): 421~450.
- 陈勇, 周振柱, 高永进, 王鑫涛, 高婷, 陈中红. 2014. 济阳坳陷东营凹陷盐岩中的烃类包裹体及其地质意义. *地质论评*, 60(2): 464~472.
- 何登发, 马永生, 刘波, 蔡勋育, 张义杰, 张健. 2019. 中国含油气盆地深层勘探的主要进展与科学问题. *地学前缘*, 26(1): 1~12.
- 何海清, 范土芝, 郭绪杰, 杨涛, 郑民, 黄福喜, 高阳. 2021. 中国石油“十三五”油气勘探重大成果与“十四五”发展战略. *中国石油勘探*, 26(1): 17~30.
- 贾承造, 张文昌. 2023. 中国海相超深层油气形成. *地质学报*, 97(9): 2775~2801.
- 李建忠, 陶小晚, 白斌, 黄士鹏, 江青春, 赵振宇, 陈燕燕, 马德波, 张立平, 李宁熙, 宋微. 2021. 中国海相超深层油气地质条件、成藏演化及有利勘探方向. *石油勘探与开发*, 48(1): 52~67.
- 李延钧, 宋国奇, 李文涛, 郭瑞超, 杨显成, 陈义才, 罗文军. 2010. 济阳坳陷东营凹陷北带丰深1井区深层沙四下古油藏与天然气成因. *石油与天然气地质*, 31(2): 173~179.
- 刘华, 蒋有录, 徐浩清, 宋国奇, 蔡冬梅. 2012. 东营凹陷丰华北地区深层裂解气藏成因类型与成藏模式. *吉林大学学报(地球科学版)*, 42(6): 1638~1646.
- 刘惠民. 2022. 济阳坳陷古近系页岩油地质特殊性及勘探实践——以沙河街组四段上亚段—沙河街组三段下亚段为例. *石油学报*, 43(5): 581~594.
- 平宏伟, 陈红汉, 宋国奇, 刘惠民. 2012. 东营凹陷北带民丰洼陷深层凝析油藏成藏史及其勘探意义. *石油学报*, 33(6): 970~977.
- 施和生, 牛成民, 胡安文, 李慧勇, 于海波. 2018. 渤中西南环中深层油气相态特征及其控制因素. *石油钻采工艺*, 40(S1): 9~13.
- 宋明水, 王惠勇, 张云银. 2019. 济阳坳陷潜山“挤-拉-滑”成山机制及油气藏类型划分. *油气地质与采收率*, 26(4): 1~8.
- 宋明水, 王永诗, 郝雪峰, 安天下. 2021. 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. *石油与天然气地质*, 42(6): 1243~1254.
- 王健, 彭捷, 操应长, 刘可禹, 宋明水, 刘惠民. 2022. 东营凹陷中晚始新世古气候演化特征及其意义——以Hk1井为例. *沉积学报*, 40(4): 1059~1072.
- 王琳, 赵孟军, 孟庆洋, 王鹏, 王科, 袁海莉, 申磊军, 雷刚. 2017. 柴达木盆地英西地区中深层油气成藏过程分析. *天然气地球科学*, 28(12): 1846~1854.
- 王圣柱, 金强, 田义民. 2005. 东营凹陷胜坨地区油源及其成藏特征研究. *特种油气藏*, (4): 24~27+104.
- 王永诗, 郝雪峰, 胡阳. 2018. 富油凹陷油气分布有序性与富集差异性——以渤海湾盆地济阳坳陷东营凹陷为例. *石油勘探与开发*, 45(5): 785~794.
- 王永诗, 陈涛, 张鹏飞, 翟正. 2021. 济阳坳陷古近系轻质原油油藏勘探潜力与方. *石油学报*, 42(12): 1605~1614.
- 王永诗, 巩建强, 陈冬霞, 邱怡博, 范书巍, 雷文智, 杨怀宇, 王翘楚. 2023a. 渤海湾盆地东营凹陷盐家地区深层砂砾岩油气藏相态演化及成藏过程. *石油与天然气地质*, 44(5): 1159~1172.
- 王永诗, 郝雪峰, 安天下, 张鹏飞, 熊伟, 秦峰. 2023b. 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. *石油学报*, 44(7): 1058~1071, 1150.
- 杨海军, 陈永权, 田军, 杜金虎, 朱永峰, 李洪辉, 潘文庆, 杨鹏飞, 李勇, 安海亭. 2022. 塔里木盆地轮探1井超深层油气勘探重大发现与意义. *中国石油勘探*, 25(2): 62~72.
- 于翠玲, 曾溅辉, 林承焰, 李宝刚, 管小燕. 2005. 断裂带流体活动证据的确定——以东营凹陷胜北断裂带为例. *石油学报*, 26(4): 34~38.
- 张文昌, 张斌, 杨海军, 朱光友, 苏劲, 王晓梅. 2012. 塔里木盆地喜马拉雅晚期油气藏调整与改造. *石油勘探与开发*, 39(6): 668~680.
- 赵文智, 刘文汇. 2008. 高效天然气藏形成分布与凝析、低效气藏经济开发的基础研究. 北京:科学出版社.
- 周心怀, 张如才, 李慧勇, 王保全, 郭永华. 2017. 渤海湾盆地渤海凹陷深埋古潜山天然气成藏主控因素探讨. *中国石油大学学报(自然科学版)*, 41(1): 42~50.
- 朱光友, 李婧菲, 张志遥. 2021. 深层油气相态多样性成因与次生地球化学作用强度评价——以塔里木盆地海相油气为例. *地球科学*, 1~17. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1874.P.20211108.1622.004.html>.

Differential formation mechanism and model of Paleogene deep sandy conglomerate reservoirs in the Dongying sag

LEI Wenzhi^{1,2)}, CHEN Dongxia^{*1,2)}, CHENG Ming³⁾, WANG Yongshi⁴⁾, GONG Jianqiang⁵⁾,
QIU Yibo⁵⁾, WANG Qiaochu^{1,2)}, CAI Chenyang^{1,2)}, ZHANG Wanrong^{1,2)}

1) State Key Laboratory of Petroleum Resources and Prospecting, China University of Petroleum, Beijing 102249, China;

2) College of Geosciences, China University of Petroleum, Beijing 102249, China;

3) Changbei Operating Company, Petrochina Changqing Oilfield, Yulin, Shaanxi 719100, China;

4) Shengli Oilfield Company, Sinopec, Dongying, Shandong 257001, China;

5) Research Institute of Exploration and Development, Shengli Oilfield Company, Sinopec,
Dongying, Shandong 257015, China

*Corresponding author: lindachen@cup.edu.cn

Abstract

The deep sandy conglomerate reservoirs in the Dongying sag have great potential for oil and gas exploration, and revealing the spatial distribution and formation mechanism of petroleum is conducive to further understanding the deep oil and gas accumulation process. Through organic geochemistry, reservoir fluid inclusions, and basin simulation, the characteristics and differences of deep oil and gas were clarified, and the differential formation mechanism and model of hydrocarbon fluids were revealed. The results show that dry gas, condensate gas and light oil are distributed vertically from deep to shallow in the Yanjia area of the Dongying sag. The Shengtuo area is dominated by oil phase, and the associated gas components of crude oil in different types of reservoirs are different. The factors that lead to the differentiation of deep hydrocarbon fluids are reflected in the generation, reconstruction, and preservation. The hydrocarbon accumulation process in the sandy conglomerate has a strong succession. The thermal evolution history of the source rock determines the initial petroleum phase. The influence of the late secondary alteration depends on the fluid environment. The open fluid environment formed by the overlapping transport fan facilitates the process of gas invasion, thereby promoting the vertical phase differentiation of oil and gas. Oil and gas usually maintain a single phase in a relatively closed environment. In addition, fault transport can lead to the loss of light components in oil and gas, which is also an important factor affecting the differentiation of hydrocarbon fluids. Based on the understanding of the distribution characteristics and genetic mechanism of hydrocarbon fluids, two kinds of differential formation models were established. One is the vertical differentiation of hydrocarbon phase state type dominated by thermal evolution and secondary alteration, another is the gas component differentiation type dominated by thermal evolution and fault transport. Understanding the differential formation mechanism of deep hydrocarbon fluids in the Dongying sag can provide scientific guidance for predicting the distribution of different types of hydrocarbon fluids in deep formations.

Key words: Dongying sag; north steep slope zone; glutenite; deep oil and gas; causes of differentiation of hydrocarbon fluids