

渤海湾盆地L油田群油源分析

王海更¹, 张宏友², 王月杰¹, 张博文¹, 孟宪伟¹

(1. 中海石油(中国)有限公司蓬勃作业公司, 天津 300459; 2. 中海石油(中国)有限公司天津分公司渤海石油研究院, 天津 300459)

摘要: 利用原油和壁心抽提物的色谱-质谱分析数据, 在原油特征分析以及生物标志物油源对比的基础上, 对渤海湾盆地L油田群的油源进行了系统研究, 结果表明: L油田群原油主要来源于两个烃源岩层位、三个生烃凹陷, 其中L1油田南部原油主要来自黄河口凹陷沙三段烃源岩, L1油田北部原油主要来源于油田东北侧渤东凹陷和庙西凹陷北洼的东营组烃源岩, L1油田中部及L2油田原油为渤东凹陷、庙西凹陷东营组烃源岩和黄河口凹陷沙三段烃源岩的混源油, 而L3油田原油主要来源于油田东南侧庙西凹陷南洼的沙三段烃源岩。本文研究结果对油田开发和区域勘探具有一定的指导意义。

关键词: 油源对比; 混源油; 沙三段; 东营组; 生烃凹陷

中图分类号: TE132 **文献标志码:** A

Oil source analysis of L Oilfield group in Bohai Bay Basin

WANG Haigeng¹, ZHANG Hongyou², WANG Yuejie¹, ZHANG Bowen¹, MENG Xianwei¹

(1. CNOOC China Limited-Pengbo Operating Company, Tianjin 300459, China;

2. Bohai Petroleum Research Institute, Tianjin Company of CNOOC China Limited, Tianjin 300459, China)

Abstract: Based on the comparison of crude oil characteristics and biomarker oil sources, the oil sources of L Oilfield group in the Bohai Bay Basin were systematically studied by using chromatography-mass spectrometry analysis data of crude oil and extracts of side-wall cores. The results show that the crude oil of L Oilfield group mainly comes from two hydrocarbon source rock layers and three hydrocarbon-producing depressions. The crude oil in the southern part of L1 Oilfield mainly comes from the Es³ hydrocarbon source rocks of the Huanghekou Depression; the crude oil in the northern part of L1 Oilfield mainly comes from the hydrocarbon source rocks of the Dongying Formation in the Bohai East Depression and the North Depression of the Miaoxi Depression on the northeast side of the oilfield; the crude oil in the central part of L1 Oilfield and L2 Oilfield is a mixed source oil from hydrocarbon source rocks of the Dongying Formation in the Bohai East Depression and the Miaoxi Depression, and the Es³ Formation in the Huanghekou Depression; the crude oil in L3 Oilfield mainly comes from the hydrocarbon source rocks of the Miaoxi Depression on the southeast side of the oilfield. The study results have a certain guiding significance for oilfield development and regional exploration.

Key words: oil-source correlation; mixed source oil; the third member of Shahejie Formation source rocks; Dongying Formation hydrocarbon generation depression

渤海湾盆地L油田群周围发育多个生烃凹陷, 油田自1999年发现以来, 油气来源问题一直是研究和争论的焦点。对于L3油田的油源, 目前研究普遍认为其原油主要来源于庙西凹陷沙三段烃源岩^[1-2], 而对于L1油田和L2油田, 国内研究普遍认为其原油是古近系东营组和沙河街组烃源岩的混源油, 对于油源的具体凹陷, 也存在比较大的争议: 对于L1油田和L2油田东营组烃源岩的贡献, 主要有来源于渤中凹陷、渤东凹陷和庙西凹陷北洼等不同观点; 对于沙河街组烃源岩的贡献, 主要有来源于渤中凹陷、庙西凹陷和黄河口凹陷等不同观点^[3-6]。本文在梳理前人研究成果的基础上, 结合

当前对油田及周边凹陷的认识, 利用渤海湾盆地L油田群原油和壁心抽提物的色谱-质谱分析结果, 进一步研究分析了渤海湾盆地L油田群的油源。

1 油田概况

渤海湾盆地L油田群位于渤海海域的中南部, 包括L1油田、L2油田和L3油田。L1油田位于渤南低凸起的东端, 是整个油田群的开发主体, L2油田

收稿日期: 2021-02-19; 改回日期: 2022-05-11。

第一作者简介: 王海更(1980—), 高级工程师, 现主要从事油田开发研究工作。E-mail: whg80@163.com。

位于L1油田东北侧,以近南北向的走滑断层与L1油田分隔,是向东倾伏的单斜构造,L3油田位于L1油田东南侧的背斜构造,同样以近南北向的走滑断层与L1油田分隔。油田群发育在渤南低凸起带基底隆起背景上,主要含油气层系为新渐系馆陶组和明化镇组下段,含油层段厚约100~600 m,油田群周围发育4个生烃凹陷,分别为渤中凹陷、渤东凹陷、庙西凹陷、黄河口凹陷(图1)。

目的储层主要划分为12个油组,其中L50-L120油组属于馆陶组,L10-L40油组属于明化镇组下段。L1油田北部和L2油田主要含油层段为L10-L100油组,L1油田南部含油层段主要为L10-L120油组,L3油田含油层段主要为L50-L120油组。L1油田及L2油田馆陶组及明化镇组下段储层具有中高孔、高渗的特征,L3油田馆陶组上段储层具有中高孔、中高渗特征,而馆陶组中下段储层则表现出中孔、中渗的特征。油田群的区域性盖层发育在明上段,是一套广泛分布的黑灰色—黑色含钙质泥岩,可见贝壳化石,属于湖相沉积^[7]。

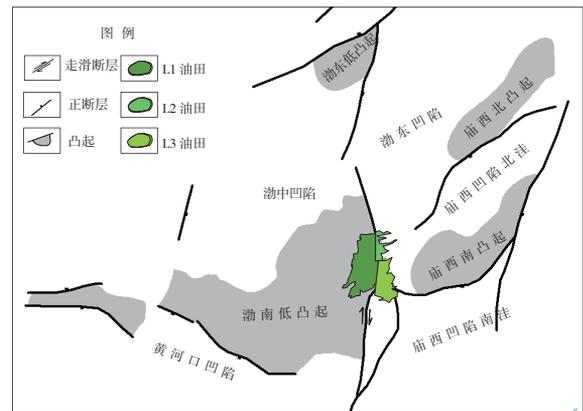


图1 渤海湾盆地L油田群地理位置及构造位置

2 烃源岩地球化学特征

渤海湾盆地是位于中国东部的古近系和新近系湖相盆地,盆地经历了古近纪的同裂谷期和新近纪—第四纪的后裂谷期两个构造演化阶段。同裂谷期的沉积包括孔店组、沙河街组和东营组,后裂谷期的沉积包括馆陶组、明化镇组和平原组,其中同裂谷期是主要的烃源岩发育时期。前人研究表明,渤中地区主要发育三套优质烃源岩,即沙河街组沙一段、沙三段和东营组烃源岩,烃源岩地球化学特征^[8]见表1。

表1 渤中地区烃源岩地球化学特征

| 层位 | 主要岩性 | 有机碳含量/ % | 氯仿沥青“A”/ % | 总烃/ ($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$) | 生烃潜量/ ($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$) | 有机质 类型 | 热解峰温/ $^{\circ}\text{C}$ |
|-----|-----------------------------------|-------------|---------------|--|--|---------------------------------------|-----------------------------|
| 沙三段 | 浅灰色泥岩,油页岩与灰白、浅灰色砂砾岩,粉砂岩不等厚互层 | 0.52~11.02 | 0.162~2.371 | 629.0~12 527.0 | 1.0~68.9 | II ₁ 、II ₂ | 430~450 |
| 沙一段 | 深灰色泥岩夹薄钙质页岩,粉砂岩 | 0.52~2.85 | 0.004~4.575 | 184.0~5 928.6 | 3.2~20.3 | II ₁ | 400~450 |
| 东营组 | 浅灰色砂岩、粉砂岩与深灰色泥岩、厚层深灰色泥岩夹浅灰色砂岩、粉砂岩 | 0.40~5.32 | 0.015~1.190 | 62.0~6 856.9 | 0.08~42.2 | II ₁ 、II ₂ 、III | 430~450 |

生物标志化合物记录了生物碳骨架的分子结构信息,是研究原油与沉积环境之间关系的参数,而综合应用几种生物标志化合物参数可以对烃源岩进行区分,目前在渤中地区常用的生物标志化合物为伽马蜡烷(GAM)和4-甲基甾烷(4-MS)。伽马蜡烷含量一般随沉积环境的盐度增加而上升,通常认为4-甲基甾烷来自甲藻,渤中地区的沙河街组源岩多数含有甲藻甾烷,而东营组一般不含或极少含有甲藻甾烷。应用生物标志物参数伽马蜡烷/ C_{30} 藿烷(GAM/ $C_{30}H$)和4-甲基甾烷/ ΣC_{29} 甾烷(4-MS/ C_{29} 甾烷)可以有效区分渤中地区的三套烃源岩:对于

沉积于淡、微咸水湖相环境的沙三段,伽马蜡烷低,4-甲基甾烷高,GAM/ $C_{30}H$ 一般小于0.15,4-MS/ C_{29} 甾烷的值一般情况下大于0.5;发育于半咸水、咸水环境的沙一段烃源岩伽马蜡烷含量较高,4-甲基甾烷含量较低,GAM/ $C_{30}H$ 一般大于0.15,4-MS/ C_{29} 甾烷的值一般小于0.5,沉积于淡水环境的东营组烃源岩4-甲基甾烷和伽马蜡烷含量均较低,GAM/ $C_{30}H$ 通常小于0.15,4-MS/ C_{29} 甾烷的值小于0.5^[9-11]。另外,因甾烷系列的两个参数 $C_{29}\alpha\alpha\alpha 20S/(\alpha\alpha\alpha 20S+20R)$ 和 $C_{29}\alpha\beta\beta/(\alpha\alpha\alpha+\alpha\beta\beta)$ 不受生源的影响,本次用于评价具有多个油源的L1油田的原油成熟度,而Ts/

(Ts+Tm)比值可以表征相似沉积环境的原油成熟度变化,用于计算等效镜质体反射率。

3 油气来源分析

3.1 原油样品说明

本次研究采集了来自L油田群L3-1、L1-1、L2-B42等7口评价井和5口开发井,共54个样品,其中24个样品为壁心抽提物,30个为原油样品,样品深度分布范围为1 128.5~1 994.5 m,层位分布范围为L40-L120油组,纵向上形成了较连续的样品分布,另外平面上样品具有代表性,在油田群的北部、中部和南部均有分布(图2)。主要考虑的生物标志物及参数有伽马蜡烷、4-甲基甾烷、25-降霍烷、GAM/C₃₀H、C₂₉ααα20S/(20S+20R)、C₂₉αββ/(ααα+αββ)以及Ts/(Ts+Tm)等。

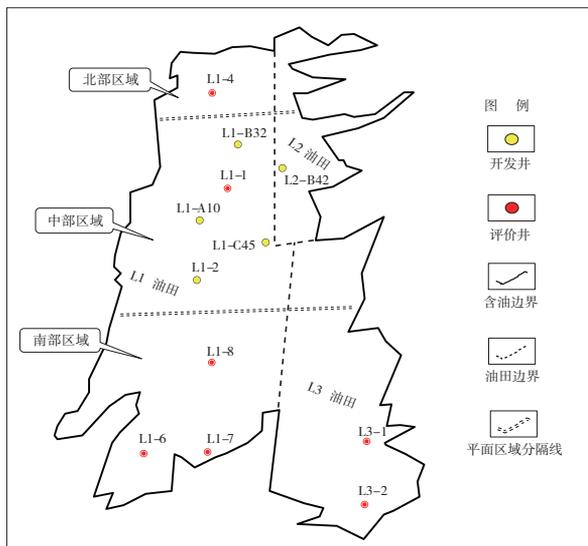


图2 采样井分布

3.2 油源对比分析

3.2.1 原油生物降解程度

生物降解主要受温度控制,温度越低,越容易降解,同时生物降解还与距离油水界面的远近程度有关,距离油水界面越近,越容易降解,另外生物降解还受居留时间影响,居留时间越短,降解程度越弱。一般认为25-降霍烷是在生物降解较严重时才产生,本次选择25-降霍烷/C₃₀H比值分析样品的降解程度(表2)。从生物降解程度来看,油田群西南部的L1-7、L1-6、L1-8井生物降解最严重。油田群中北部的L1-1、L1-2、L2-B42和L1-4等井生物降解程度中等。油田群东南部的L3-1、L3-2井原油生物降解程度最轻。

表2 生物标志物参数25-降霍烷/C₃₀H分布

| 井名 | 样品数 | 最小值 | 最大值 | 平均值 |
|--------|-----|------|------|------|
| L1-7 | 5 | 0.17 | 0.27 | 0.21 |
| L1-6 | 2 | 0.31 | 0.33 | 0.32 |
| L1-8 | 18 | 0.03 | 0.61 | 0.24 |
| L3-2 | 10 | 0.02 | 0.06 | 0.04 |
| L3-1 | 6 | 0.04 | 0.10 | 0.07 |
| L1-2 | 3 | 0.06 | 0.17 | 0.10 |
| L1-C45 | 19 | 0.06 | 0.48 | 0.19 |
| L1-A10 | 14 | 0.06 | 0.12 | 0.07 |
| L1-1 | 2 | 0.05 | 0.21 | 0.13 |
| L2-B42 | 11 | 0.09 | 0.34 | 0.24 |
| L1-B32 | 10 | 0.01 | 0.17 | 0.10 |
| L1-4 | 8 | 0.16 | 0.30 | 0.23 |

3.2.2 原油物性特征

渤海湾盆地L油田群原油物性平面差异较大,存在明显的分区性,整体呈现中北部好,南部差的特点。油田群西南部的L1-7、L1-6、L1-8井生物降解最严重,原油密度0.963~0.991 g/cm³,平均0.980 g/cm³,原油黏度147.00~944.00 mPa·s,平均442.96 mPa·s,属于重质稠油,原油品质较差。油田群中北部区域L1-1、L1-2等井原油密度0.915~0.960 g/cm³,平均0.937 g/cm³,原油黏度9.07~95.20 mPa·s,平均32.33 mPa·s,属于中重质中高黏度原油,原油性质相对较好。油田群东南部的L3-1、L3-2井原油密度0.926~0.945 g/cm³,平均0.935 g/cm³,原油黏度18.9~50.4 mPa·s,平均29.83 mPa·s,属于重质中黏度原油,原油性质相对较好(图3)。

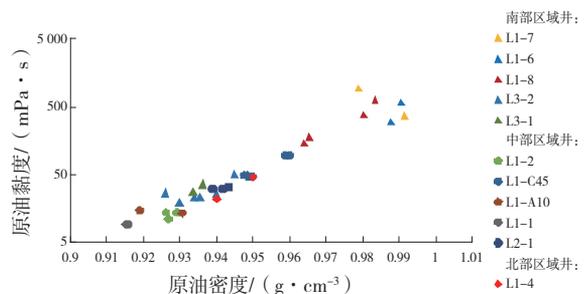


图3 渤海湾盆地L油田群密度-黏度交会图

3.2.3 原油热成熟度分析

根据国内研究结果,L油田群周围4个凹陷烃源岩成熟度差异较大。渤中凹陷、渤东凹陷以及庙西凹陷北洼沙三段烃源岩已达成熟一过成熟阶段,而庙西凹陷南洼、黄河口凹陷东部洼陷沙三段烃源岩属于低成熟一成熟阶段。渤中凹陷、渤东凹陷沙

一段烃源岩已达成熟—高成熟阶段,而庙西凹陷和黄河口凹陷沙一段烃源岩则处于低成熟阶段。渤中凹陷、渤东凹陷以及庙西凹陷北洼东营组烃源岩均处于成熟或过成熟阶段,而南部的庙西凹陷南洼以及黄河口凹陷东营组烃源岩处于低成熟或未成熟阶段^[12-15]。

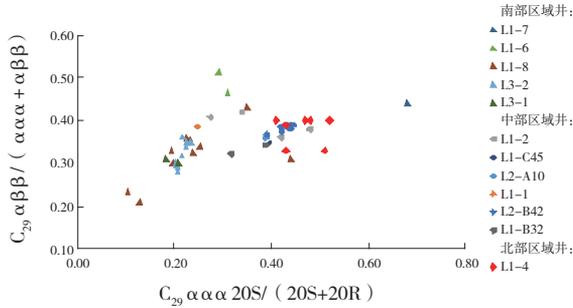


图4 甾烷参数 $C_{29}\alpha\alpha\alpha 20S/(20S+20R)$ 和 $C_{29}\alpha\beta\beta/(\alpha\alpha\alpha+\alpha\beta\beta)$ 相关关系

渤海湾盆地L油田群甾烷的 $C_{29}\alpha\alpha\alpha 20S/(20S+20R)$ 范围为 0.10~0.68, $C_{29}\alpha\beta\beta/(\alpha\alpha\alpha+\alpha\beta\beta)$ 范围为 0.21~0.49, 还没有达到平衡状态(图4), 说明在油气充注过程中, 烃源岩仍处于早期生油阶段。利用 $Ts/(Ts+Tm)$ 参数计算的蓬莱油田等效镜质体反射率 R_o 值分布范围为 0.6~0.8%, 根据陈建渝等^[16] 的划分标准, 油气仍然处于低—中等成熟度阶段(表3)。

表3 等效镜质体反射率 R_o 值(%)分布

| 井名 | 样品点计数 | 最小值 | 最大值 | 平均值 |
|--------|-------|------|------|------|
| L1-7 | 5 | 0.62 | 0.63 | 0.62 |
| L1-6 | 2 | 0.72 | 0.73 | 0.72 |
| L1-8 | 4 | 0.61 | 0.62 | 0.61 |
| L3-2 | 10 | 0.61 | 0.64 | 0.63 |
| L3-1 | 2 | 0.68 | 0.70 | 0.69 |
| L1-2 | 1 | 0.71 | 0.71 | 0.71 |
| L1-C45 | 1 | 0.70 | 0.70 | 0.70 |
| L1-A10 | 3 | 0.70 | 0.71 | 0.71 |
| L1-1 | 1 | 0.71 | 0.71 | 0.71 |
| L2-B42 | 11 | 0.66 | 0.70 | 0.69 |
| L1-B32 | 2 | 0.67 | 0.70 | 0.68 |
| L1-4 | 8 | 0.75 | 0.81 | 0.78 |

3.2.4 油源对比

(1)油田群原油沙一段烃源岩特征不明显。如图5所示, 样品点的 4-MS/ C_{29} 甾烷的范围为 0.08~0.59, $GAM/C_{30}H$ 范围为 0.05~0.3。其中大部分样品的伽马蜡烷/ C_{30} 藿烷都小于 0.15, 多数样品的 4-MS/

C_{29} 甾烷大于 0.3, 根据前述的标准, 只有 2 个样品点值 $GAM/C_{30}H$ 略大于 0.15, 4-MS/ C_{29} 甾烷略小于 0.5, 判断沙一段烃源岩对L油田群贡献很小。

(2)油田群南部原油主要表现为沙三段烃源岩特征。油田群南部的L1-7井、L3-2井, 4-MS/ C_{29} 甾烷范围为 0.42~0.59, 大部分样本点该值大于 0.5, $GAM/C_{30}H$ 皆在 0.1 以下, 反映了沙三段烃源岩的特征。

(3)油田群北部原油主要表现为东营组烃源岩特征。油田群北部的L1-4井 4-MS/ C_{29} 甾烷为 0.08~0.21, 明显小于 0.5, 但目前认为东营组甲藻甾烷含量很低, 该参数值仍然比典型的东营组烃源岩高。另外, $GAM/C_{30}H$ 范围为 0.08~0.12, 据前述, 因东营组沉积环境为淡水环境, 沙三段为淡、微咸水湖相环境, 理论上东营组 $GAM/C_{30}H$ 较沙三段更低, 而油田群北面L1-4井部分样本点该参数高于或接近于油田群南部L1-7井和L3-2井沙三段烃源岩, 综合判断油田北部主要受东营组烃源岩充注影响, 但可能混有沙三段烃源岩的贡献。

(4)油田群中部原油表现为沙三段和东营组烃源岩混源特征。油田群中部L1-8、L1-2、L1-C45、L1-A10、L1-1、L2-B42、L1-B32等样品点 4-MS/ C_{29} 甾烷为 0.27~0.48, $GAM/C_{30}H$ 范围为 0.05~0.27, 反映了混源油特征。

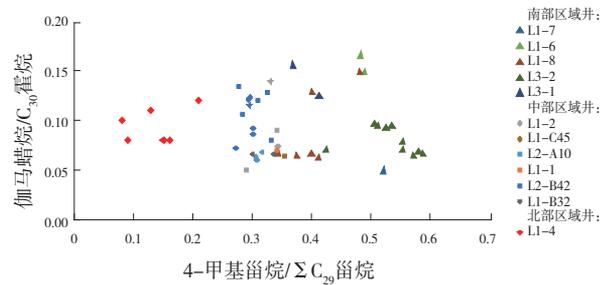


图5 4-MS/ C_{29} 甾烷和 $GAM/C_{30}H$ 相关关系

3.3 油源综合分析结果

根据油源对比分析, 渤海湾盆地L油田群的原油主要来源于沙三段和东营组两套烃源岩, 沙一段烃源岩对油田群贡献很小。北面原油主要来源于东营组烃源岩, 南面原油主要来源于沙三段烃源岩, 中部原油多为混源。对于原油具体来源于哪个生烃凹陷, 结合各个生烃凹陷的烃源岩热演化情况进行了具体分析。

油田群南部原油认为是来自南面的黄河口凹陷和庙西凹陷南洼沙三段。原因之一是油田群南部原油的成熟度较低, R_o 仅为 0.6~0.8%, 而渤东凹

陷或渤中凹陷沙三段烃源岩处于中高成熟阶段或更高的热演化阶段。原因之二是油源对比结果显示沙一段烃源岩对本区贡献小,如果油田群南部原油均来自于渤中凹陷或者渤东凹陷沙三段和东营组,没有明显的沙一段烃源岩贡献是很难解释的。如前所述,黄河口凹陷烃源岩成熟度略高于庙西凹陷南洼,判断L1油田南部原油来自黄河口凹陷沙三段,L3油田南部原油来自庙西凹陷南洼沙三段,这种认识与前人的研究成果基本一致。沙三段原油的输导体系为走滑断层和馆陶组底部的L120油组砂岩,在油田群南部,L120油组以砂岩沉积为主,砂地比很高,多达到50%以上,且单层砂岩厚度较大。

油田群北部原油主要来自于北部的渤东凹陷或者庙西凹陷北洼东营组。原因之一是L1-4井原油的成熟度高, R_o 为0.78%,与渤东凹陷和庙西北洼比较接近,而渤中凹陷烃源岩 R_o 为0.9~1.2%,已经到了中高演化阶段,对油田群北部成藏贡献不大;二是根据油气运移的理论,成熟度降低的方向通常指示油气的运移方向,接近源岩的位置油气成熟度最高;三是南面的黄河口凹陷东部洼陷和庙西凹陷南洼东营组烃源岩尚不成熟,不能对本区成藏有贡献。东营组原油的输导体系是走滑断层和馆陶组L100油组砂岩,在油田群北部,L100油组砂岩发育很好,厚度大(一般大于10 m)且连片分布,具有很好的侧向连通性。

油田群中部混源油来自南面的黄河口凹陷和庙西凹陷南洼以及西北方向的渤东凹陷和庙西凹陷北洼。

4 结论

(1)通过油源对比,认为渤海湾盆地L油田群的原油主要来自东营组烃源岩和沙河街组沙三段烃源岩,沙一段烃源岩对油田群贡献很小。平面上,北部区域原油主要表现为东营组烃源岩特征,南部区域表现为沙三段烃源岩特征,而油田群中部区域原油表现为沙三段和东营组烃源岩混源特征。

(2)结合油田群各个生烃凹陷的烃源岩热演化情况,认为渤海湾盆地L油田群南部原油来自南面的黄河口凹陷和庙西凹陷南洼沙三段,油田群北部原油主要来自于东北侧的渤东凹陷或者庙西凹陷北洼东营组,油田群中部混源油来自南面的黄河口凹陷和庙西凹陷南洼以及西北方向的渤东凹陷和庙西凹陷北洼。

参考文献:

- [1] 贾楠,刘池洋,张东东.渤海湾盆地庙西凹陷烃源岩评价及油源分析[J].西北大学学报(自然科学版),2013,43(3):461-465.
- [2] 张宏国,官大勇,宿雯,等.庙西凹陷中南洼烃源岩评价及其勘探启示[J].海洋石油,2015,35(1):52-57.
- [3] 郭太现,刘春成,吕洪志,等.蓬莱19-3油田地质特征[J].石油勘探与开发,2001,28(2):26-28.
- [4] 胡建武,郝芳,邹华耀,等.渤中拗陷活跃烃源岩分布特征及其对蓬莱19-3油气成藏的控制作用[J].石油天然气学报,2006,28(1):13-15.
- [5] HAO F, ZHOU X H, ZHU Y M, et al. Charging of the Neogene Penglai 19-3 field, Bohai Bay Basin, China: oil accumulation in a young trap in an active fault zone [J]. AAPG Bulletin, 2009, 93(2): 155-179.
- [6] 郭永华,周心怀,凌燕玺,等.渤海海域蓬莱19-3油田油气成藏特征新认识[J].石油和天然气地质,2001,32(3):327-332.
- [7] 薛永安,邓运华,王德英,等.蓬莱19-3油田特大型油田成藏条件及勘探开发关键技术[J].石油学报,2019,40(9):1125-1146.
- [8] 张成.渤中地区典型构造油气运移输导通道及其成藏模式[D].武汉:中国地质大学,2006.
- [9] 王培荣,张大江,宋孚庆,等.区分渤中拗陷三套烃源岩的地球化学参数组合[J].中国海上油气(工程),2004,16(3):157-160.
- [10] 李友川,黄正吉,张功成.渤中地区东下段烃源岩评价及油源研究[J].石油学报,2001,22(2):44-48.
- [11] 邹华耀,周心怀,郝芳.渤中地区蓬莱19-3油田油源分析及其成藏与勘探意义[J].西安石油大学学报(自然科学版),2009,24(1):13-16.
- [12] 杨永才,李友川.渤海湾盆地渤中凹陷烃源岩地球化学与分布特征[J].矿物岩石,2012,32(4):65-72.
- [13] 何文祥,文志刚,孙臻礲.渤东凹陷PL2-2-1井区烃源岩生排烃门限研究[J].江汉石油学院学报,2004,26(2):11-12.
- [14] 刘丹丹,汤国民,王飞龙.渤海海域东部凹陷烃源岩特征及油源分析[J].西安石油大学学报(自然科学版),2020,35(1):12-13.
- [15] 崔海忠,王飞龙,王清斌,等.蓬莱20-2油田原油地球化学特征与油源分析[J].石油地质与工程,2019,33(6):47-52.
- [16] 陈建渝,王启军,何炳骏.中国渤海湾北部凝析油的特征和成因[J].地球科学,1990(1):1-8.

(编辑 刘义梅)