



地球科学

Earth Science

ISSN 1000-2383, CN 42-1874/P

《地球科学》网络首发论文

题目: 辽河西部凹陷沙河街组烃源岩特征及油源精细对比
作者: 惠沙沙, 庞雄奇, 柳广弟, 周晓龙, 胡涛, 梅术星
收稿日期: 2021-12-07
网络首发日期: 2022-04-17
引用格式: 惠沙沙, 庞雄奇, 柳广弟, 周晓龙, 胡涛, 梅术星. 辽河西部凹陷沙河街组
烃源岩特征及油源精细对比[J/OL]. 地球科学.
<https://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1874.P.20220415.1409.003.html>



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、外文字母、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。

doi:10.3799/dqkx.2022.090

辽河西部凹陷沙河街组烃源岩特征及油源精细对比

惠沙沙^{1,2}, 庞雄奇^{1,2*}, 柳广弟^{1,2}, 周晓龙³, 胡涛^{1,2}, 梅术星^{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. 中国石油辽河油田公司勘探开发研究院, 辽宁盘锦 124010

摘要: 为了明确辽河西部凹陷南北部烃源岩条件差异、查明凹陷内不同地区原油来源, 采用 TOC、岩石热解、Ro、饱和烃色谱-质谱等方法对不同洼陷烃源岩及原油特征分析并进行精细油源对比。结果表明, 西部凹陷沙四段烃源岩在北部发育 (厚约 700 m)、有机质丰度高、但成熟度较低 (<0.5%), 有机质以陆源高等植物为主, 混有少量低等水生生物, 沉积于偏还原的咸水-微咸水环境; 沙三段及沙一段烃源岩在凹陷南部更为发育, 丰度高且成熟度高, 有机质以低等水生生物为主, 沉积于偏氧化的淡水环境。结果表明, 北部原油来自于沙四段烃源岩; 中部原油主要来自于沙三段烃源岩 (冷家地区原油存在少量沙四段原油混入), 而南部原油主要来自于沙三段和沙一段烃源岩。

关键词: 辽河西部凹陷; 烃源岩评价; 地化特征; 油源对比; 生物标志化合物。

中图分类号: P559 收稿日期: 2021-12-07

Characteristics of Paleogene Source Rocks and Fine Oil-source Correlation in Liaohe Western Depression

Hui Shasha^{1,2}, Pang Xiongqi^{1,2,*}, Liu Guangdi^{1,2}, Zhou Xiaolong³, Hu Tao^{1,2}, Mei Shuxing^{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. Exploration and Development Research Institute, PetroChina Liaohe Oilfield Company, Liaoning Panjin 124010,

基金项目: 国家重点基础研究发展计划 (973 计划) 项目 (2011CB201102); 中国石油科技项目 (HX20180604)

作者简介: 惠沙沙 (1995—), 女, 博士研究生, 主要从事油气成藏机理与资源评价研究. E-mail:

Hui_Shasha@163.com; ORCID: 0000-0002-2478-1273.

Abstract: In order to clarify the differences in source rock characteristics and investigate the source of crude oil in different areas in the Liaohe Western Depression, the TOC, rock pyrolysis, Ro, and saturated hydrocarbon gas chromatography-mass spectrometry (GC-MS) are adopted to analyze the characteristics of source rock and crude oil, and the fine oil-source correlation is carried out. Results indicate that the Es4 source rock of Liaohe Western Depression is developed in the north (about 700 m), with high organic matter abundance but low maturity ($<0.5\%$). The organic matter of the Es4 source rock was dominated by terrestrial higher plants, mixed with a small amount of lower aquatic organisms, and the sedimentary environment was a partially reduced saline-brackish water environment; The Es3 and Es1 source rocks of Liaohe Western Depression are developed in the south with high abundance and maturity. The organic matter was mainly derived from aquatic organisms and deposited in the oxidized freshwater environment. Results show that the crude oil in the northern part comes from the Es4 source rock. The crude oil in the central part mainly comes from the Es3 source rock (the crude oil in the Lengjia area comes from the Es4 and Es3 source rock). The crude oil in the southern part comes from the Es3 and Es1 source rock.

Key words: Liaohe Western Depression; source rock evaluation; geochemical characteristics; oil-source correlation; biomarker.

0 引言

渤海湾盆地辽河西部凹陷油气分布具有高丰度、广泛性等特点。纵向上, 含油层系众多, 其中, 沙河街组常规油气资源量可占整个西部凹陷常规油气资源量的 60%以上, 非常规油气资源如雷家地区沙四段页岩油地质资源量可高达 $2.3 \times 10^8 \text{t}$ (胡英杰等, 2019)。平面上, 从凹陷北部到南部, 油气资源丰度逐渐增高。除此之外, 辽河西部凹陷南北地区烃源岩条件差异明显, 北部地区烃源岩埋深浅、成熟度低, 导致稠油、低熟油普遍存在 (李素梅等, 2008; 朱芳冰等, 2018), 而南部地区烃源岩埋藏深度大、成熟度高且分布层系众多, 导致主力烃源岩难以识别。前人针对辽河西部凹陷的区域构造演化 (李明刚等, 2010)、油气富集条件 (单衍胜等, 2013, 2016; 李晓光, 2021)、成藏主控因素 (冷济高等, 2008)、油气资源潜力评价 (单俊峰等, 2007; 胡英杰等, 2008; 刘立峰等, 2010; 王延山等, 2018) 等方面做了大量的研究, 但仅局限于盆地尺度下的宏观评价, 缺乏对辽河西部凹陷南北地区不同洼陷、不同层系烃源岩特征的细致评价、规律总结及差异分析; 油气来源方面尚未得到清晰的认识, 从根本上制约了进一步油气勘探。

本次研究共采集了南北地区不同生烃洼陷及其周边的 23 口井的烃源岩样品及凹陷范围内

各大油田 52 口井的原油样品，对其进行地球化学特征分析；通过对烃源岩及原油生物标志化合物进行分析及对比，实现了油源精细对比，进一步明确了不同洼陷、不同层系烃源岩对油气成藏的贡献，为辽河西部凹陷未来常规及非常规油气勘探均提供了理论依据。

1. 区域地质概况

辽河西部凹陷是渤海湾盆地辽河坳陷中最大的生油凹陷，面积约 2530 km²，是一个呈北东向展布的东断西超、东陡西缓的中-新生代裂谷盆地，可进一步划分为 9 个次级构造单元（李明刚等，2010；单衍胜等，2016；图 1a）。研究区沉积地层自下而上可分为太古界/元古界/中生界基底、古近纪房身泡组、沙河街组、东营组，新近纪馆陶组、明化镇组及第四系。沙河街组地层自下而上又可细分为沙四段（Es4）、沙三段（Es3）、沙二段（Es2）及沙一段（Es1）（图 1b）。辽河西部凹陷新生代构造演化主要经历了初始伸展裂陷-裂陷深陷-走滑裂陷-坳陷 4 次构造演化阶段（Hao et al., 2011；单衍胜等，2013）。平面上，西部凹陷南北构造格局差异明显，北部表现为压扭隆升，以收缩-走滑构造为主；南部表现为张扭沉降，以伸展-走滑构造为主；剖面上，凹陷内表现为西部缓，东部陡（图 1c）。由于断裂活动强度的差异，生油洼陷由北向南迁移，依次形成牛心坨-台安洼陷，盘山-陈家洼陷及清水洼陷（图 1a）。南部洼陷烃源岩厚度、埋深、成熟度均高于北部；生烃中心的迁移及成熟度差异导致西部凹陷南北油气分布表现出规律化变化，由北至南表现为时代变新、埋深变大（冷济高等，2008）。

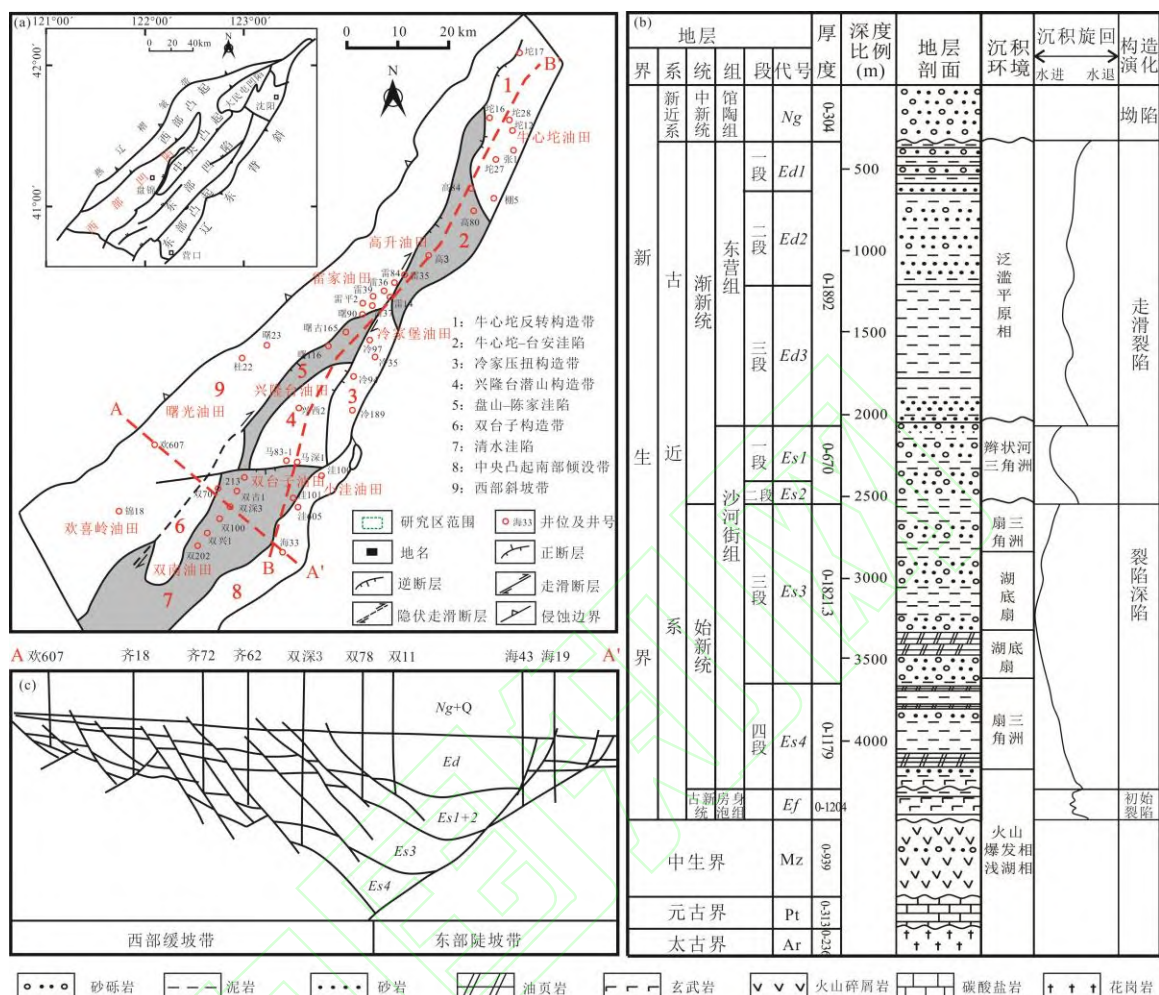


图 1 辽河西部凹陷地层及构造特征综合示意图 (修改自冷济高等, 2008)

Fig.1 Comprehensive map of structural and stratigraphic characteristics in Liaohe Western Depression

2. 样品及实验方法

本次研究测试烃源岩样品主要分布在西部凹陷牛心坨-台安洼陷、盘山-陈家洼陷、清水洼陷及其周边, 目的层段主要为沙四段、沙三段及沙一段; 原油样品采集于辽河西部凹陷各油区 (图 1)。共开展了 TOC、热解、Ro、族组分、饱和烃气相色谱-质谱等分析测试, 数据主要来源于中国石油辽河油田勘探开发研究院及中国石油大学 (北京) 油气资源探测国家重点实验室。其中, TOC 含量的测定是在实验室条件下用稀盐酸去除样品中的无机碳后, 经高温氧气流燃烧, 使总有机碳充分转化为二氧化碳, 再经 LECO CSe400 测定仪检测 (GB/T 19145-2003); 热解实验在 Rock-Eval II 型检测仪中完成, 样品经氢气流加热至 300 °C, 得到游离烃量 (S_1), 再从 300 °C 加热至 600 °C, 得到热解烃量 (S_2), 在此引入筛选标准 $420\text{ }^{\circ}\text{C} < T_{\text{max}} < 500\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Peters, 1986; Riediger et al., 2004)。Ro 是在样品碎样、油浸条件下采用 Leica DM4500P 偏光显微镜进行反射

光测试, R_o 值取 50-100 个测点的反射率的平均值, 且在 2h 后进行一次标样; 岩石中可溶有机质及原油族组分测量采用索氏抽提, 使用不同极性溶剂在硅胶-凝胶-氧化铝层析柱上进行分离, 最终可以得到饱和烃、芳香烃、非烃及沥青质组分 (SY/T 5119-2016)。气相色谱-质谱实验是在 Agilent 7890-5975c 气相色谱质谱联用仪上进行, 初始温度 50 °C, 保持 1 min; 然后以 20 °C/min 升温至 120 °C, 再以 4 °C/min 升至 250 °C, 最后以 3 °C/min 升至 310 °C 保持 30 min (GB/T 18606-2017)。

3. 烃源岩地球化学特征

3.1 分布发育特征

辽河西部凹陷主要发育 Es4、Es3 及 Es1 三套烃源岩, 其中主力烃源岩为 Es4 及 Es3 (卢松年等, 1986; 王延山等, 2018; 胡英杰等, 2019)。Es4 沉积时期, 沉积中心位于北部牛心坨洼陷, 主要发育油页岩、暗色泥岩 (毛俊莉等, 2016)。平面上, 西部凹陷 Es4 烃源岩呈北厚南薄, 东厚西薄, 北部牛心坨洼陷烃源岩厚约 700 m, 南部清水洼陷厚约 350 m, 中部陈家-盘山洼陷烃源岩厚度范围为 100~400 m (单衍胜, 2013; 图 2a)。Es3 沉积时期, 沉降中心向南迁移, 西部凹陷整体处于深湖-半深湖沉积环境。Es3 烃源岩分布面积广、沉积厚度大, 呈南厚北薄分布。南部清水洼陷为泥页岩厚度中心, 厚度可达 700~1800 m (平均 1200 m); 其次为陈家洼陷, 烃源岩平均厚度可达 850 m; 牛心坨洼陷烃源岩平均厚度 500 m (单衍胜, 2013; 王延山等, 2018; 图 2b)。Es1 沉积时期, 暗色泥岩分布连续稳定, 凹陷南部处于半深水环境中, 富含生物化石, 清水洼陷处泥岩厚度可达 600 m 以上 (图 2c)。

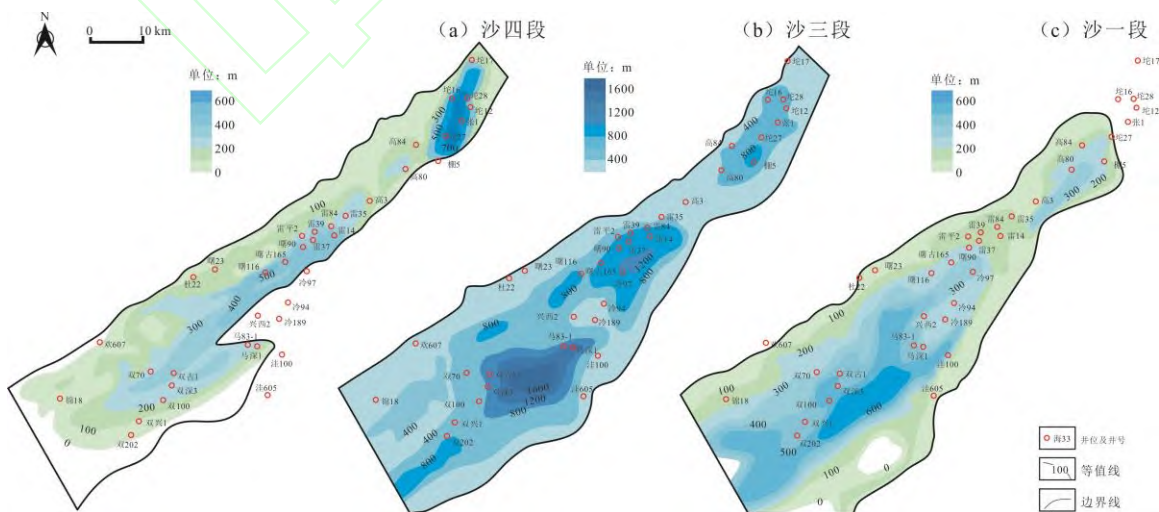


图 2 辽河西部凹陷沙河街组烃源岩厚度分布图

Fig.2 Thickness Distribution of Source Rocks in Shahejie Formation, Liaohe Western Depression

3.2 有机质丰度

烃源岩有机质丰度评价指标一般包括总有机碳量 (TOC)、生烃潜量 (S_1+S_2)、氯仿沥青 “A” 及总烃 (HC)。但考虑到氯仿沥青 “A” 和总烃 (HC) 是反映烃源岩中残余可溶有机质 (残油或残烃量) 的指标, 并不能很好的评价烃源岩的好坏 (庞雄奇等, 1995)。因此, 此次研究主要以 TOC 及生烃潜量来评价有机质丰度。

沙四段、沙三段烃源岩 TOC 含量从北至南表现出明显差异 (表 1, 图 3a)。牛心坨-台安洼陷沙三段烃源岩 TOC 平均值仅为 0.18%, 远远低于沙四段烃源岩 TOC; 盘山-陈家洼陷沙四段烃源岩 TOC 含量变化范围大, 主要位于 3.75%~6.14%, 平均 5.15%; 沙三段烃源岩 TOC 平均为 3.34%, 烃源岩自下而上 TOC 含量减小; 清水洼陷沙四段、沙三段及沙一段烃源岩 TOC 平均值分别为 1.81%, 1.82%和 1.85%, 烃源岩自下而上 TOC 含量增加。平面上, 沙四段烃源岩 TOC 含量北部高于南部, 沙三段烃源岩 TOC 含量南部高于北部, 尤其以盘山-陈家洼陷烃源岩 TOC 含量最高。纵向上, 南北生烃洼陷 TOC 含量变化趋势相反, 北部地区烃源岩自下而上 TOC 值变小, 南部地区烃源岩自下而上 TOC 值变大。

除此之外, 本文还采用生烃潜量 (S_1+S_2) 与 TOC 交汇图版来评价有机质丰度 (黄弟藩等, 1984; SY/T 5735-1995; 图 3b)。牛心坨洼陷沙三段烃源岩生烃潜量几乎全部小于 0.3 mg/g, 属于非烃源岩; 沙四段烃源岩有机质丰度表现出较强的非均质性, 整体属于中-最好烃源岩; 盘山-陈家洼陷沙四段及沙三段烃源岩生烃潜量介于 7~70 mg/g, 整体属于最好烃源岩; 清水洼陷沙四段、沙三段及沙一段烃源岩生烃潜量介于 1~20 mg/g, 属于好-最好烃源岩。因此可以得出: 从北到南各生烃洼陷烃源岩质量逐渐变好。

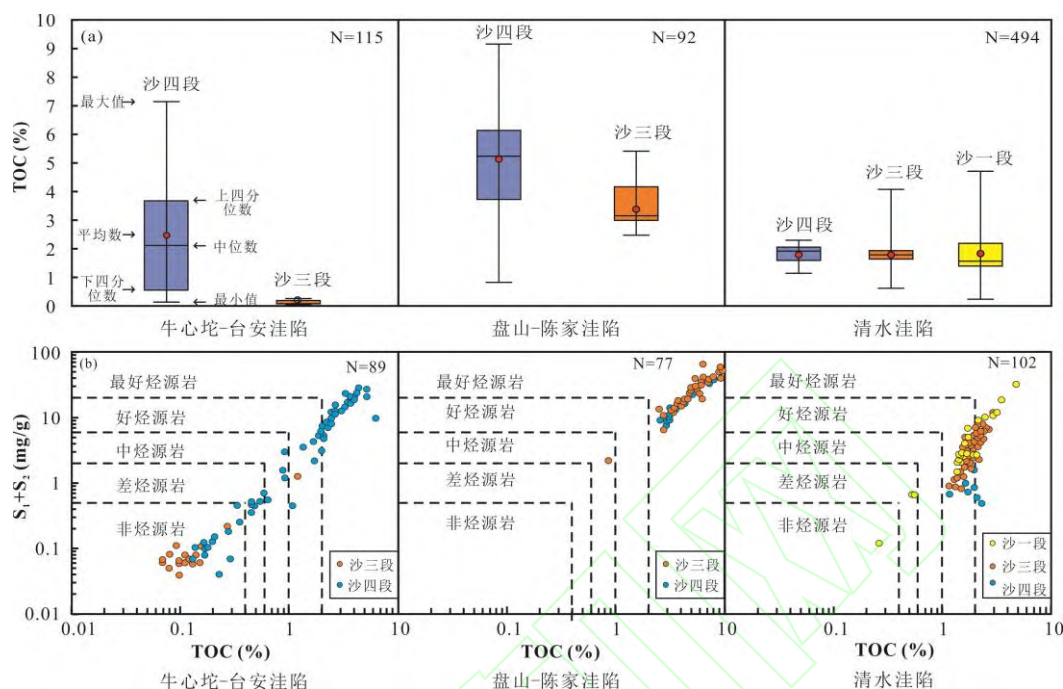


图 3 辽河西部凹陷沙河街组烃源岩有机质丰度评价 (SY/T 5735-1995)

Fig.3 Evaluation of organic matter abundance in Shahejie Formation, Liaohe Western Depression

表 1 辽河西部凹陷沙河街组烃源岩地化分析数据表

Table 1 Geochemical characteristics of source rocks in Shahejie Formation, Liaohe Western Depression

生烃洼陷	牛心坨-台安洼陷		盘山-陈家洼陷		清水洼陷		
层位 地化参数	沙四段	沙三段	沙四段	沙三段	沙四段	沙三段	沙一段
TOC (%)	0.13~7.14 2.23 (72)	0.02~1.21 0.18 (43)	0.82~9.2 5.15 (47)	0.12~5.43 3.34 (29)	1.16~1.29 1.81 (6)	0.67~4.06 1.82 (70)	0.26~4.71 1.85 (24)
S ₁ +S ₂ (mg/g)	0.04~65.86 11.16 (71)	0.04~1.22 0.15 (18)	2.22~66.91 27.86 (47)	7.68~37.77 16.27 (29)	0.5~1.6 0.85 (6)	0.82~11.97 4.36 (70)	0.12~32.47 6.16 (24)
HI mg/g TOC	17~810 350 (60)	74~93 83 (2)	246~740 481 (47)	272~490 405 (29)	15~56 34 (7)	35~4.7 190 (71)	107~674 247 (24)
Tmax (°C)	423~442 432 (60)	431~439 435 (2)	426~448°C 437 (47)	425~435 430 (29)	446~525 460 (7)	429~467 441 (71)	420~443 433 (24)
Ro (%)	0.25~0.58 0.36 (43)		0.44~1.17 0.69 (60)		0.32~1.61 0.67 (133)		0.29~0.63 0.40 (24)
显微组分 (单衍胜等, 2016)	腐泥组 (%)		(1.3~97.2)/52.8				
	壳质组 (%)		(0~68)/4.8				
	镜质组 (%)		(1~97)/35.9				
	惰质组 (%)		(0~87.2)/6.4				

注：表中数据为 $\frac{\text{最小值} \sim \text{最大值}}{\text{平均值} (\text{样品数})}$ 或 $(\text{最小值} \sim \text{最大值}) / \text{平均值}$

3.3 有机质类型

综合岩石热解数据资料与有机显微组分分析，西部凹陷沙河街组烃源岩有机质显微组分中腐泥组与镜质组平均含量可占 88.7%（表 1）；烃源岩有机质类型丰富，以腐泥腐殖型（II 型）为主，Es4 烃源岩中可见部分 I 型干酪根（图 4）。

如图 4a 所示，纵向上表现为自下而上有机质类型具有从腐泥型-腐泥腐殖混合型-腐殖型转化的特征。Es4 烃源岩有机质类型多样，以 I 型和 II₁ 型为主；而 Es3 烃源岩有机质类型主要为 II₁ 及 II₂ 型，不发育 I 型；Es1 烃源岩有机质类型则以 II₂ 型为主，含少量 II₁ 型。平面上，不同生烃洼陷烃源岩有机质类型也表现出明显的差异。从北至南，Es4 有机质类型由腐泥型-腐泥腐殖混合型-腐殖型转化（图 4b），Es3 有机质类型则表现为腐殖型-腐泥腐殖混合型转化的变化规律（图 4c）。烃源岩有机质类型与其沉积环境密切相关，沙三时期，南部清水洼陷与中部盘山-陈家洼陷处于深湖相沉积，水生生物丰富，而盆地边缘发育扇三角洲沉积，因此从盆地中心向盆地边缘逐渐转变为 III 型干酪根（朱芳冰，2002）。

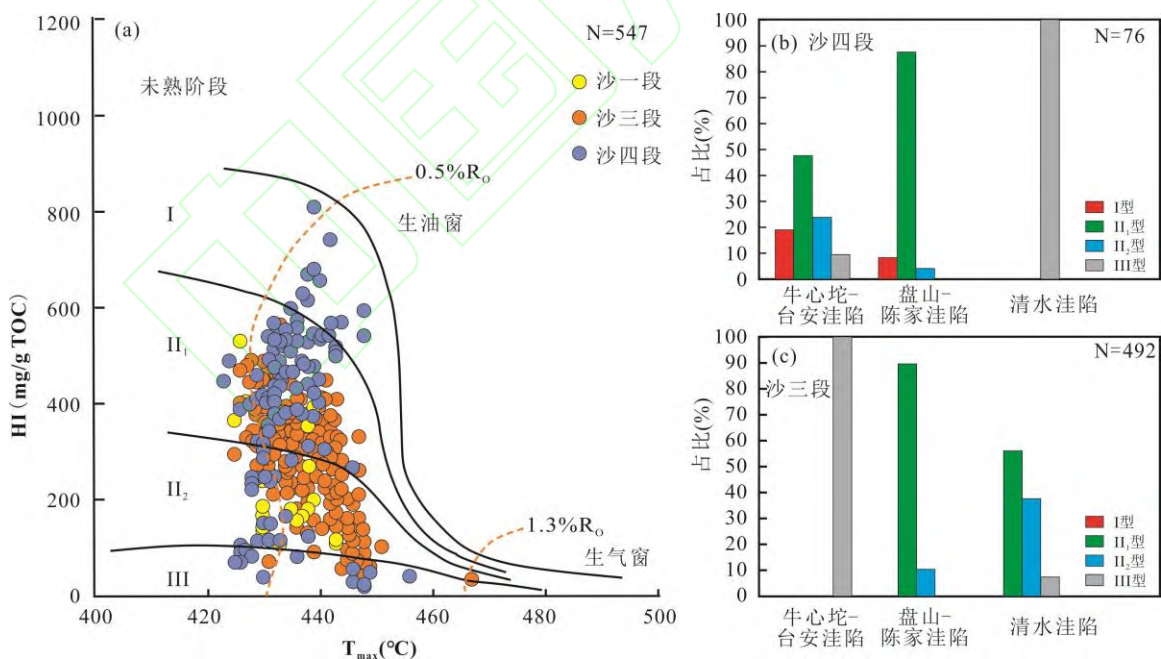


图 4 辽河西部凹陷沙河街组烃源岩有机质类型判别图（修改自蔡来星等，2020）

Fig.4 Organic matter types of source rocks in Shahejie Formation, Liaohe Western Depression

3.4 成熟度

岩石热解参数中 T_{\max} 及镜质体反射率 (R_o) 可以很好的评价烃源岩成熟度 (柳广弟等, 2009)。平面上, 从北至西南部凹陷烃源岩 T_{\max} 值逐渐增大; 纵向上, 地层自下而上 T_{\max} 值逐渐减小 (表 1)。北部牛心坨-台安洼陷 Es4 及 Es3 烃源岩 R_o 介于 0.25%~0.58%, 整体小于 0.5%, 但中部盘山-陈家洼陷 Es4 及 Es3 烃源岩 R_o 值介于 0.44%~1.17%, 平均值达到 0.69%; 南部清水洼陷 Es4 及 Es3 烃源岩 R_o 介于 0.32~1.61, 其中 R_o 值大于 0.5% 的样品占 88% (图 5), Es1 烃源岩 R_o 平均为 0.44%。总体认为, 北部牛心坨-台安洼陷烃源岩处于未成熟-低成熟阶段, 中部盘山-陈家洼陷和南部清水洼陷热演化程度差异大, 表现出从未熟-低熟-成熟-高熟的完整的热演化序列。纵向上各生烃洼陷烃源岩 R_o 值明显随埋深增大而增大, 平面上从北至南各生烃洼陷烃源岩成熟度增加 (图 5)。

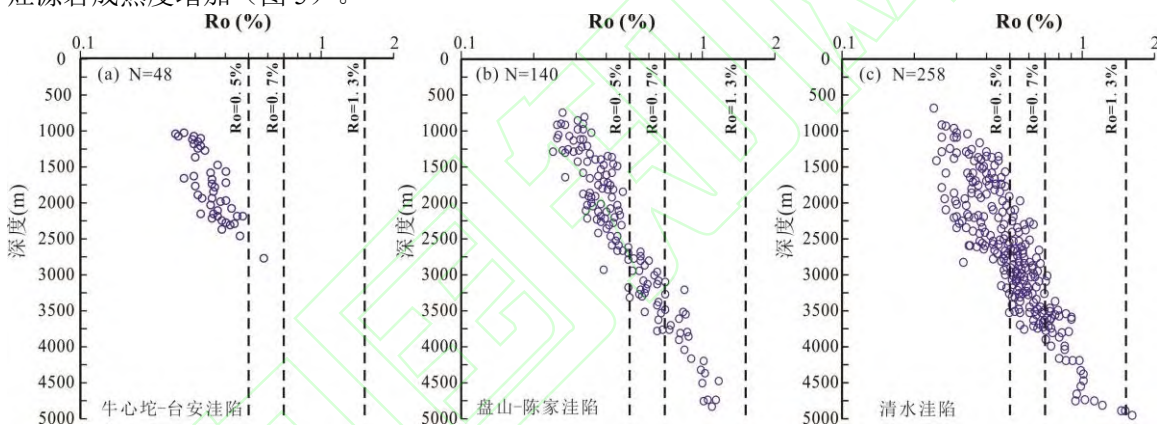


图 5 辽河西部凹陷各生烃洼陷沙河街组烃源岩 R_o 随深度变化关系 (数据来源于中国石油辽河油田勘探开发研究院)

Fig.5 Relationship between R_o and depth of Shahejie Formation in different sags of Liaohe Western Depression

3.5 烃源岩生标特征与沉积环境

3.5.1 烃源岩饱和烃特征

正构烷烃特征可以反映有机质来源 (侯读杰等, 2011)。姥值比 Pr/Ph 、 Pr/nC_{17} 、 Ph/nC_{18} 可以反映沉积环境及成熟度 (Peters and Moldowan, 1993; 卢双舫等, 2010)。一般认为, $Pr/Ph < 0.5$ 指示强还原膏盐环境, Pr/Ph 介于 0.5~1 指示还原环境, 而 $Pr/Ph > 1$ 指示氧化环境。 Pr/nC_{17} 及 Ph/nC_{18} 值越低, 有机质热演化程度越高 (卢双舫等, 2010; 赵靖舟等, 2020)。

牛心坨-台安洼陷 Es4 烃源岩正构烷烃形态具有多样性 (图 6a)。一类为单峰-后峰型, 主

峰碳为 C_{23} 且其余碳数呈正态分布；一类呈双峰型，主峰碳为 C_{17} 及 C_{23} ， Pr/Ph 值平均为 0.84、 Pr/nC_{17} 介于 0.54~2.85、 Ph/nC_{18} 介于 1.1~4.53，反映整体处于弱还原-还原的咸水环境（图 7）；Es3 烃源岩样品中正构烷烃丰度低，但仍能看出呈单峰-前峰型分布，主峰碳为 C_{18} ； Pr/Ph 值较低，为 0.29；Es3 沉积时期，洼陷处于剧烈沉降阶段，形成广泛的深湖-半深湖环境，沉积厚层的暗色泥岩，结合 Pr/nC_{17} 与 Ph/nC_{18} 关系，反映 Es3 烃源岩沉积于还原性的深水环境（Hao et al., 2010；刘晓晶等，2015；图 7）。

盘山-陈家洼陷 Es4 烃源岩正构烷烃表现为两种类型：一种为双峰型，主峰碳为 C_{17} 及 C_{23} （图 6b），一种为前峰型，主峰碳为 C_{17} （图 13b），表明 Es4 烃源岩有机质为低等水生生物为主，少量陆源高等植物混入的混合成因；而 Es3 烃源岩正构烷烃以 C_{23} 为主，且高碳数（ $>C_{23}$ ）具有明显的奇偶优势（OEP=2.69），表明母质来源以陆源高等植物为主，也表明烃源岩成熟度较低（图 6b）。从 Es4 到 Es3，其 Pr/Ph 、 Pr/nC_{17} 与 Ph/nC_{18} 值均增大，反映其沉积环境由还原环境逐渐变化为弱氧化环境（图 7）。

清水洼陷 Es4 烃源岩样品较少，正构烷烃表现为后峰型，主峰碳为 C_{25} ，反映母质来源为高等植物，形成于还原环境（图 7）；Es3 烃源岩正构烷烃表现为前峰-后峰型兼具，主峰碳多为 C_{15} 或 C_{23} ，整体反映母质来源为低等水生生物和陆源高等植物的混合来源（图 6c）。 Pr/Ph 值介于 0.47~2.35，平均 1.55、 Pr/nC_{17} 值平均 1.11、 Ph/nC_{18} 值平均 1.06，指示有机质为氧化环境的混合成因（图 7）。Es1 烃源岩正构烷烃相对丰度表明有机质来源于低等水生生物（图 6c；图 13d）。

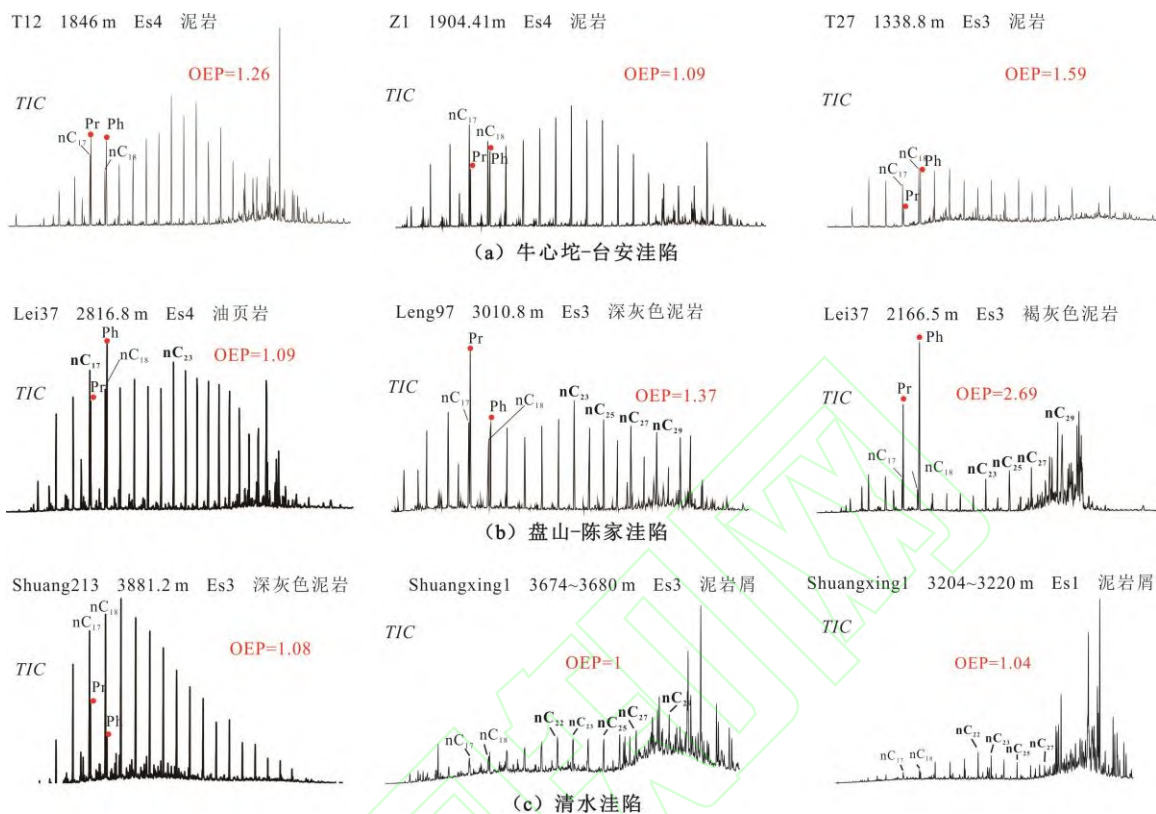


图 6 辽河西部凹陷沙河街组烃源岩气相色谱特征

Fig.6 GC characteristics of source rocks in Shahejie Formation, Liaohe Western Depression

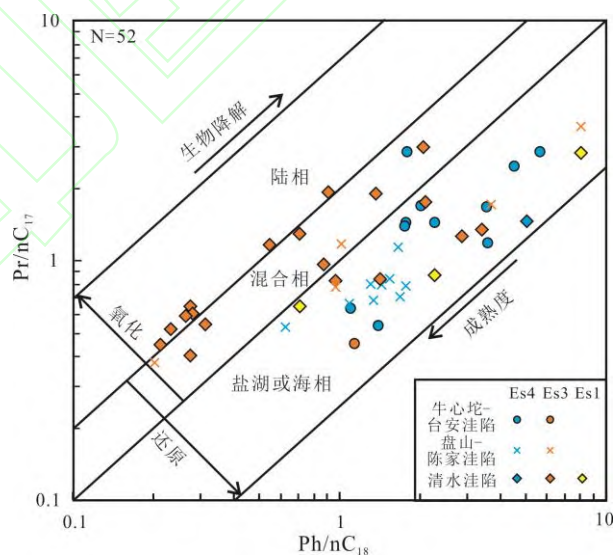


图 7 辽河西部凹陷各生烃洼陷沙河街组烃源岩 Pr/nC_{17} 和 Ph/nC_{18} 关系

Fig.7 Relationship between Pr/nC_{17} and Ph/nC_{18} of source rocks in Shahejie Formation, Liaohe

Western Depression

3.5.2 烃源岩甾烷、萜烷特征

C_{27} - C_{28} - C_{29} 规则甾烷常被用于指示母质来源,一般认为 C_{27} 甾烷来源于低等水生生物和藻类,而 C_{29} 甾烷来源于陆生高等植物或者硅藻、褐藻 (Moldowan et al., 1985); 利用 $\alpha\alpha\alpha$ - $C_{29}20S/(20S+20R)$ 、 $C_{29}\beta\beta/(\beta\beta+\alpha\alpha)$ 、 C_{31} 藿烷 $22S/(22S+22R)$ 及 Ts/Tm 等指标可以反映有机质成熟度,其比值随成熟度增加而增大 (Peters and Moldowan, 1993, 卢双舫等, 2010)。对于国内陆相沉积物,利用 $\alpha\alpha\alpha$ - $C_{29}20S/(20S+20R)$ 参数划分有机质演化阶段的界限为 <0.2 (未熟), $0.2\sim0.3$ (低熟) 及 >0.3 (成熟); 而 $C_{29}\beta\beta/(\beta\beta+\alpha\alpha)$ 的划分界限为 <0.15 (未熟), $0.15\sim0.3$ (低熟) 及 >0.3 (成熟) (侯读杰等, 2011); 而 γ -蜡烷被广泛认为是咸水还原沉积环境的标志物,水体盐度的提高会导致高伽马蜡烷指数 (γ -蜡烷/ C_{30} 藿烷) 和低 Pr/Ph (Moldowan et al., 1985; Peters et al., 2005; 侯读杰等, 2011)。

北部牛心坨-台安洼陷 Es4 烃源岩 C_{27} - C_{28} - C_{29} 规则甾烷呈“ \checkmark ”型或“L”型分布,指示生油母质来源多样,为高等植物与水生生物的双重输入 (图 8a)。三环萜烷含量较少,整体以 C_{30} 藿烷峰值最高; $\alpha\alpha\alpha$ - $C_{29}20S/(20S+20R)$ 、 $C_{29}\beta\beta/(\beta\beta+\alpha\alpha)$ 及 C_{31} 藿烷 $22S/(22S+22R)$ 平均值分别为 0.19、0.28 及 0.52, Ts/Tm 平均 0.3, 反映烃源岩成熟较低;伽马蜡烷指数介于 0.17~0.29, 平均 0.22, 反映 Es4 烃源岩沉积于咸化水体中; Es3 烃源岩样本较少, 规则甾烷呈“ \checkmark ”型, $\alpha\alpha\alpha$ - $C_{29}20S/(20S+20R)$ 、 $C_{29}\beta\beta/(\beta\beta+\alpha\alpha)$ 及 C_{31} 藿烷 $22S/(22S+22R)$ 平均值分别为 0.21、0.37 及 0.54, Ts/Tm 值为 0.64, γ -蜡烷/ C_{30} 藿烷值为 0.31, 反映 Es3 烃源岩处于低成熟-成熟阶段, 沉积环境较 Es4 更加咸化。

中部盘山-陈家洼陷 Es3 与 Es4 烃源岩规则甾烷含量存在明显差异 (图 8b, 表 2), Es4 下段烃源岩规则甾烷含量 $C_{27}<C_{28}<C_{29}$, 呈直线型; C_{31} 藿烷 $22S/(22S+22R)$ 平均 0.54, $Ts/Tm>1$, γ -蜡烷含量非常高, 指示 Es4 烃源岩处于成熟阶段, 沉积时古水体非常咸化。随埋藏变浅, C_{27} 甾烷含量逐渐增加 ($C_{27}\approx C_{28}<C_{29}$), γ -蜡烷含量逐渐减小。Es3 烃源岩规则甾烷含量 $C_{27}>C_{28}<C_{29}$, C_{29} 规则甾烷仍略占优势; $\alpha\alpha\alpha$ - $C_{29}20S/(20S+20R)$ 、 $C_{29}\beta\beta/(\beta\beta+\alpha\alpha)$ 及 C_{31} 藿烷 $22S/(22S+22R)$ 平均值分别为 0.26, 0.3 及 0.37, Ts/Tm 比值略大于 1, γ -蜡烷含量较低, 指示 Es3 烃源岩较 Es4 烃源岩成熟度偏低、沉积水体较淡、母质来源由高等植物生源为主逐渐转变为高等植物与低等水生生物的双重输入生源。

清水洼陷 Es3 烃源岩存在两类甾萜烷特征 (图 8c): 第一类 C_{27} - C_{28} - C_{29} 规则甾烷构型表现为“ \checkmark ”形态, $Ts/Tm\approx 1$, γ -蜡烷含量较高, 反映烃源岩成熟度较高, 有机质来源于混合型, 陆源高等植物占优, 形成于水体稍咸化的沉积环境; 第二类 C_{27} - C_{28} - C_{29} 规则甾烷构型表现为“V”型, 重排甾烷含量高, $Ts/Tm>>1$, γ -蜡烷含量较低, 反映烃源岩黏土矿物含量高、有机质成熟度高, 来源于低等水生生物与陆源高等植物的双重输入, 沉积水体较为淡化。Es1 烃源岩规则甾

烷呈“L”形态， $Ts/Tm < 1$ ， γ -蜡烷含量较高，指示 Es1 烃源岩成熟度较低，有机质来源以低等水生生物为主，沉积于相对咸水的湖泊环境（殷杰等，2017）。

表 2 中对比了西部凹陷不同生烃洼陷不同层位烃源岩生标特征，发现各亚段烃源岩在沉积环境、有机质来源及成熟度等方面存在明显差异。结合前文所述，可以得出：Es4 烃源岩成熟度低，有机质来源为陆源高等植物为主的混合相，沉积于强还原的咸水环境；凹陷南部 Es3 烃源岩成熟度高，有机质来源为混合相，沉积于氧化性的淡水环境；Es1 烃源岩成熟度低，有机质来源为低等水生生物，形成于弱还原的较咸水环境。

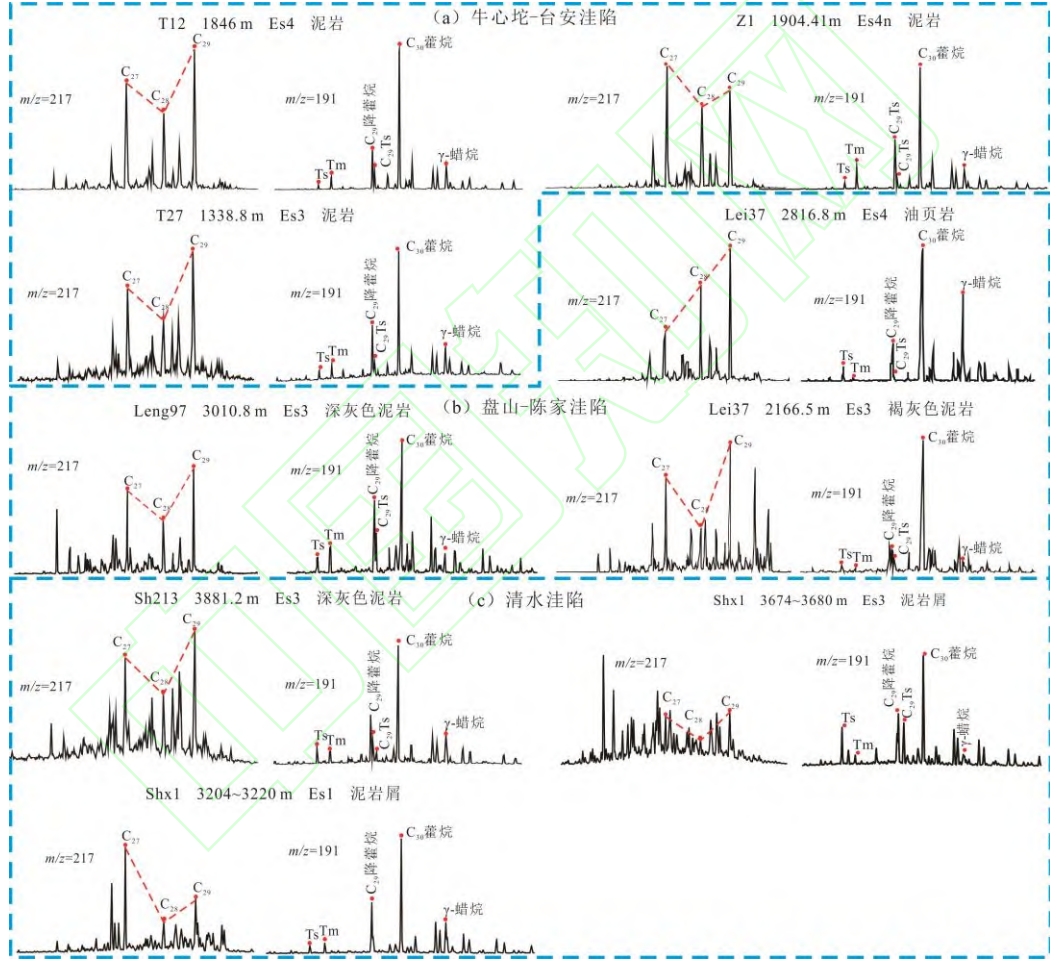


图 8 辽河西部凹陷沙河街组烃源岩甾烷、萜烷特征

Fig.8 Characteristics of steranes and terpanes of source rocks in Shahejie Formation, Liaohe Western Depression

表 2 辽河西部凹陷沙河街组烃源岩生物标志化合物组成特征

Table 2 Biomarkers from source rocks in Liaohe Western Depression

洼陷	层位	Pr/Ph	Pr/C ₁₇	Ph/C ₁₈	$\alpha\alpha\alpha$ -C ₂₉ S/(S+R)	C ₂₉ $\beta\beta/(\alpha\alpha+\beta\beta)$	C ₃₁ 藿烷(S/S+R)	Ts/Tm	γ -蜡烷 /C ₃₀ H	$\alpha\alpha\alpha$ 20R C ₂₇ /C ₂₉
----	----	-------	--------------------	--------------------	--	---	---------------------------	-------	------------------------------------	--

牛心坨- 台安洼陷	Es3	0.29	0.45	1.15	0.21	0.37	0.54	0.64	0.31	0.66
	Es4	0.84	1.54	2.38	0.19	0.28	0.52	0.3	0.22	0.94
盘山-陈 家洼陷	Es3	1.36	0.78	0.61	0.26	0.3	0.37	/	0.05	0.74
	Es4	0.62	0.76	1.35	0.25	/	0.54	/	0.37	0.4
清水洼陷	Es1	0.86	0.65	0.71	0.23	0.2	0.57	0.25	0.29	1.31
	Es3	1.55	1.11	1.06	0.51	0.46	0.6	0.96	0.1	0.74

4. 原油地球化学特征

4.1 原油分布及物性特征

西部凹陷原油物性在纵向上表现出的一定的差异性（图 9）。Es1、Es2 原油整体表现为高密度、高粘度、低凝固点、高含蜡量、多胶、低硫；Es3、Es4 原油性质相似，为中-重质、高凝、含蜡、胶质、低硫油。整体而言，西部凹陷除 Ng 原油外，其它层位原油相对密度、粘度均适中，含硫量、含蜡量普遍偏低，凝固点随层位变浅而逐渐变低，胶质-沥青质含量随层位变浅而逐渐变大。

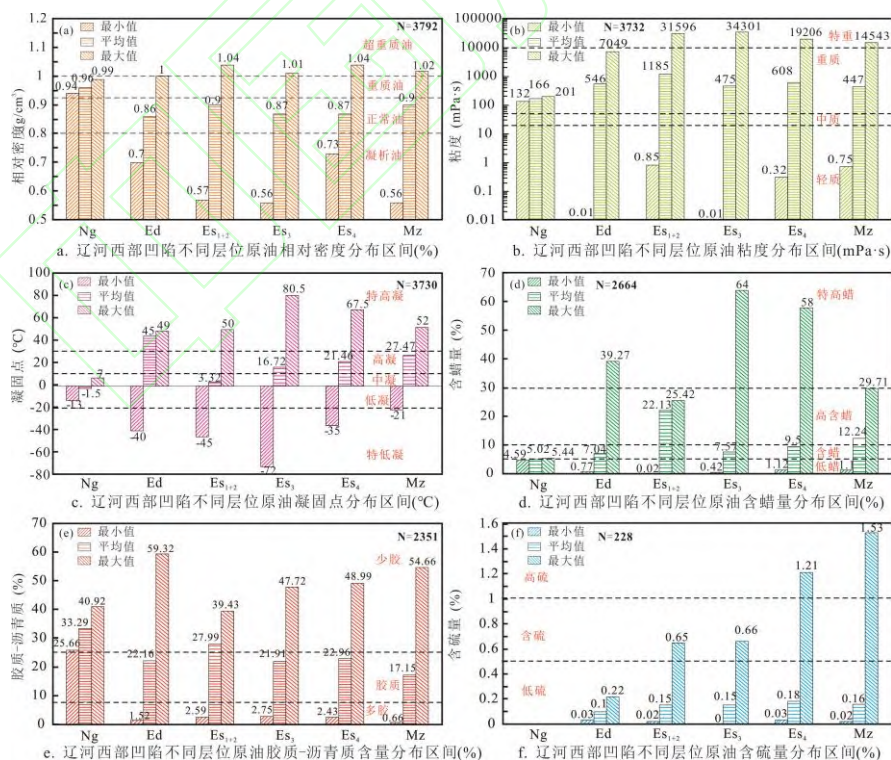


图 9 辽河西部凹陷原油物性直方图

Fig.9 Histogram of physical property of crude oil in Liaohe Western Depression

4.2 原油族组成

根据原油族组成可明显将辽河西部凹陷沙河街组原油族分为两类（图 10）。第 I 类原油表现为中-低饱和烃含量（20%~60%）、低芳烃含量、中-高非烃+沥青质含量，主要分布在研究区北部和中部；而第 II 类原油表现为高饱和烃含量（>60%）、低芳香烃含量、低非烃+沥青质含量，主要分布在南部地区。从层位上来看，Es4 原油饱和烃含量介于 22.59%~90.31%，平均 44.67%；芳香烃含量介于 4.35%~19.56%，平均 13.86%；Es3 原油饱和烃含量 20.28%~70.22%，平均 41.89%；芳香烃含量介于 10.01%~32.61%，平均 28%；Es1 原油饱和烃含量介于 22.37%~62.65%，平均 40.34%；芳香烃含量介于 10.22%~35.67%，平均 20.9%；可以看出，随着层位变新，原油中饱和烃含量变低，芳香烃含量先增大后减小，表现出一定的非均质性。

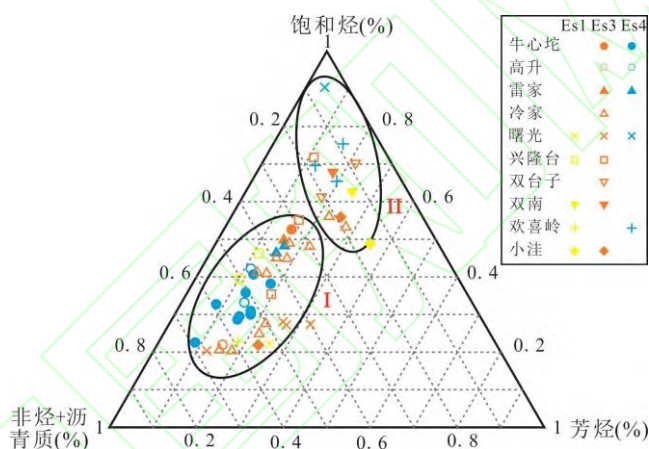


图 10 辽河西部凹陷不同油区沙河街组原油族组成特征

Fig.10 Group composition of crude oil in different oil fields in Liaohe Western Depression

4.3 原油生物标志物特征

4.3.1 原油饱和烃特征

研究区不同区块、不同层位原油饱和烃特征存在较大差异，反映了西部凹陷原油在有机质来源、沉积环境、成熟度、次生蚀变等方面存在差异。研究区北部牛心坨油区 Es4 原油正构烷烃主峰碳为 C_{23} ，表现为单峰-后峰型（图 11a）。Pr/ nC_{17} 与 Ph/ nC_{18} 关系显示，原油成熟度低，其生油母质沉积于还原性的咸水环境（图 12）。研究区中部雷家油区 Es4 及 Es3 原油正构烷烃特征表现出一定的继承性，属于双峰型，主峰碳为 C_{17} 及 C_{23} ，指示生油母质主要为高等植物生源，并混有低等水生生物输入的特点（图 11b,c）；雷家地区原油成熟度较高（OEP=1.51），其生油母质形成于还原性的咸水环境（图 12）。冷家油区 Es3 原油正构烷烃为前峰型，主峰碳为

C₁₇；说明生油母质主要来自低等水生生物生源形成于弱还原-弱氧化的淡水环境中（图 11d；图 13c）。兴隆台地区南部 Es3 及 Es1 原油正构烷烃特征相似，主峰碳均为 C₁₇ 及 C₂₂，C₂₇-C₂₈-C₂₉ 规则甾烷均呈“L”型，表明生油母质均为低等水生生物；但 Es3 原油成熟度高（OEP=1.02，Ts/Tm=1.59、孕甾烷/升孕甾烷=3.96），其生油母质形成于氧化性的淡水环境（Pr/Ph=1.42、低伽马含量）；Es1 原油成熟度低（Ts/Tm=1.05、孕甾烷/升孕甾烷=1.54），生油母质形成于弱还原性的较咸水环境（Pr/Ph=0.8、中伽马含量）（图 11e,f，图 12）；南部 Es3 原油正构烷烃基线漂移，遭受严重生物降解，正构烷烃等轻质组分缺失；原油成熟度高，形成于氧化性的淡水环境（李素梅等，2008；图 11h；图 12）。

从原油平面分布和层位分布来看，从北至南，随层位变浅，原油 Pr/Ph 逐渐增大、Pr/nC₁₇ 及 Ph/nC₁₈ 值逐渐减小，反映原油成熟度逐渐增大，其生油母质沉积环境由还原性的咸水环境逐渐变为氧化性的淡水环境（图 12）。造成这种原油成熟度随层位变新而变大的原因主要是由于 Es1、Es2 原油主要集中分布在研究区南部，Es4 原油主要分布在研究区北部，区域差异性构造运动致使研究区北部埋深浅、原油成熟度偏低，而研究区南部埋深大，原油成熟度偏高。

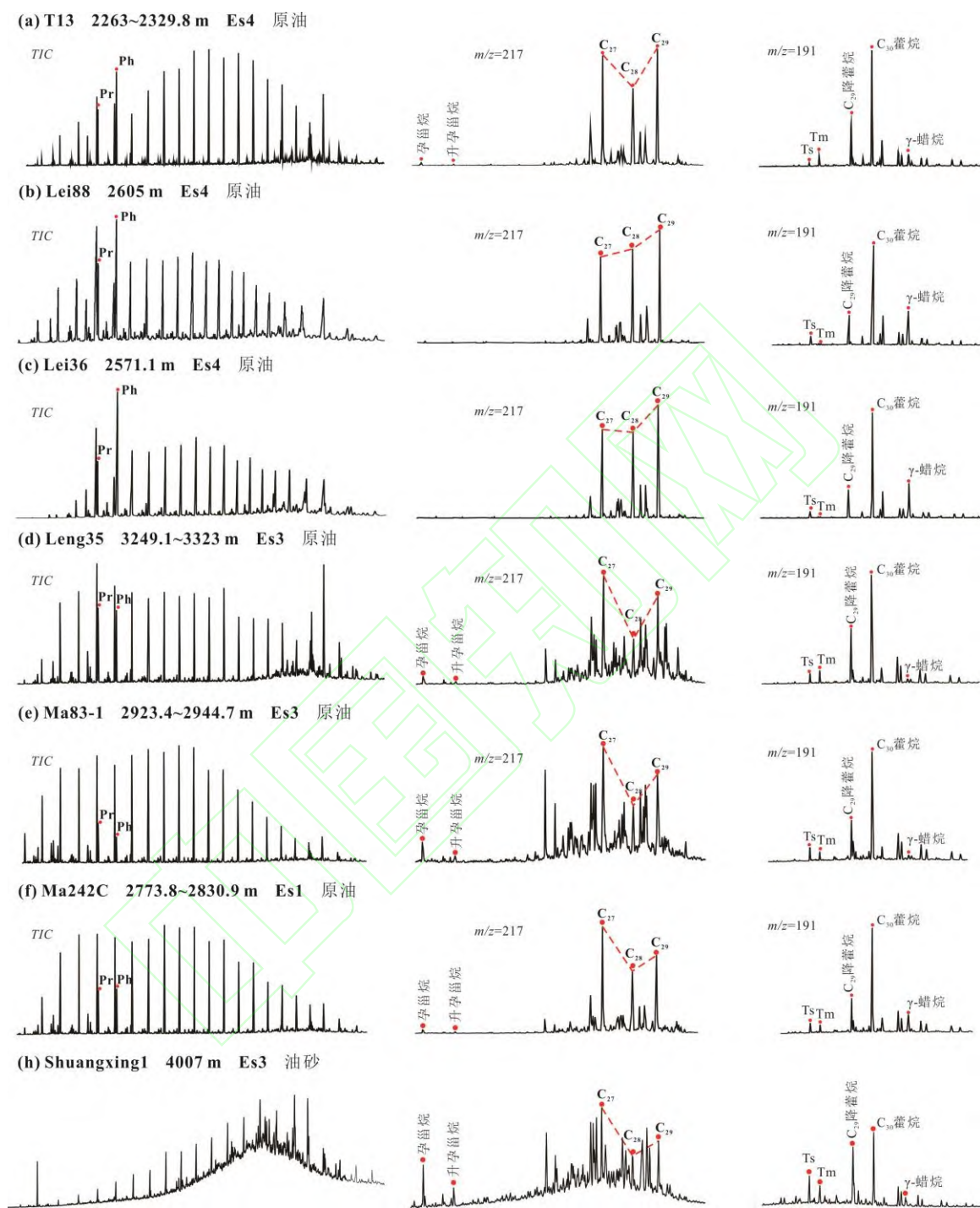


图 11 辽河西部凹陷沙河街组原油色谱-质谱特征

Fig.11 GC-MS characteristics of crude oil in Shahejie Formation, Liaohe Western Depression

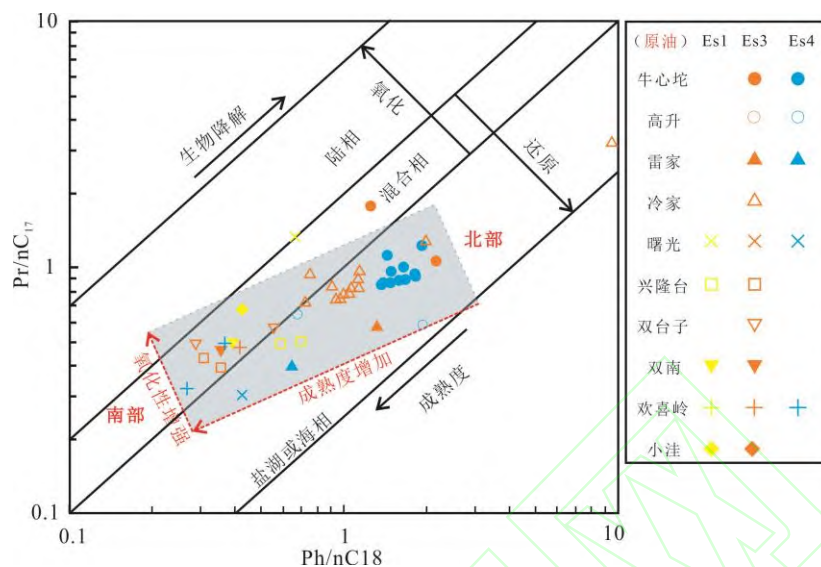


图 12 辽河西部凹陷沙河街组原油 Pr/nC_{17} 和 Ph/nC_{18} 相关性

Fig.12 Relationship between Pr/nC_{17} and Ph/nC_{18} of crude oil in Shahejie Formation, Liaohu Western Depression

4.3.2 原油甾烷、萜烷特征

西部凹陷原油甾烷系列主要由 $C_{27}\sim C_{29}$ 规则甾烷组成，规则甾烷分布构型包括“√”型 ($C_{29}>C_{27}>C_{28}$)、“L”型 ($C_{27}>C_{29}>C_{28}$) 及直线斜坡型 ($C_{27}<C_{28}<C_{29}$) 三类 (图 11)。研究区北部牛心坨 Es4 原油以“√”型为主，伴随少量“L”型，以 C_{29} 规则甾烷占优势，反映生油母质主要为高等植物为主，伴随少量低等水生生物的输入 (图 11a)。高升油田、雷家油田 Es4 原油规则甾烷以直线斜坡型和“√”型为主，反映陆源高等植物生源 (图 11b,c)。冷家油田 Es3 原油则以“L”型为主反映生油母质主要为低等水生生物 (图 11d)。南部原油从深层向浅层，甾烷构型由“√”型变为“L”型， C_{27} 甾烷含量逐渐增加，反映有机质来源从陆生高等植物为主逐步转变为低等水生生物 (图 11e~h)。

规则甾烷/ $17\alpha(H)$ -藿烷比值可以反映真核生物 (主要是藻类和高等植物) 与原核生物 (细菌) 对沉积有机质的贡献。一般来说，高规则甾烷/藿烷值 (≥ 1) 反映浮游或底栖藻类生物的海相有机质，低规则甾烷/藿烷值指示陆源或经微生物改造等特征 (侯读杰等, 2011)。研究区北部油区，包括牛心坨油田 Es4 原油、高升油田 Es4 原油、冷家油田 Es4 原油等，具有低 $\alpha\alpha\alpha-C_{29}20S/(20S+20R)$ 值、低 $C_{29}\beta\beta/(\beta\beta+\alpha\alpha)$ 、低 Ts/Tm 、低 (孕甾烷+升孕甾烷)/ $\alpha\alpha\alpha-C_{29}20R$ 值，反映原油成熟度较低，属于低熟原油 (表 3)；高升油区原油的高伽马蜡烷指数和规则甾烷/藿烷值指示沉积水体主要为咸水环境，并且其生油母质可能有藻类的混入。南部油区原油具有高 $\alpha\alpha\alpha-C_{29}20S/(20S+20R)$ 值、高 $C_{29}\beta\beta/(\beta\beta+\alpha\alpha)$ 、高 Ts/Tm 、高 (孕甾烷+升孕甾烷)/ $\alpha\alpha\alpha-C_{29}20R$ 值，反映原油成熟度高；其规则甾烷/藿烷值偏低，可能

是微生物降解导致（李素梅等，2008）。

表 3 辽河西部凹陷原油甾萜类生物标志化合物组成特征

Table 3 Biomarkers of sterane and terpane from crude oil in Liaohe Western Depression

油区	γ -蜡烷 /C ₃₀ 藿烷	$\alpha\alpha\alpha$ -C ₂₉ S/(S+R)	C ₂₉ $\beta\beta$ / ($\alpha\alpha$ + $\beta\beta$)	Ts/Tm	C ₃₁ 藿烷 (S/S+R)	$\alpha\alpha\alpha$ -20R C ₂₇ /C ₂₉	规则甾烷 /藿烷	(孕甾烷+升孕 甾烷) / $\alpha\alpha\alpha$ - C ₂₉ 20R
牛心坨	0.17	0.22	0.25	0.36	0.55	0.71	0.83	0.02
高升	0.29	0.25	0.23	0.26	0.55	0.5	1.12	0
冷家	0.14	0.36	0.32	0.46	0.56	0.6	0.52	0.06
曙光	0.27	0.36	0.35	0.58	0.57	0.62	0.39	0.13
兴隆台	0.11	0.42	0.41	1.64	0.58	0.8	0.34	0.3
双台子—双南	0.22	0.38	0.41	1.08	0.58	0.89	0.39	0.29
欢喜岭	0.23	0.36	0.35	1.18	0.57	0.73	0.31	0.17
小洼	0.26	0.44	0.38	0.66	0.56	0.78	0.4	0.15

5. 油源对比

5.1 正构烷烃特征对比

利用烃源岩及原油饱和烃色谱图中正构烷烃的相对丰度进行对比，可以非常直观的对油-源进行亲缘关系对比。如图 13a 所示，牛心坨地区 Es3 与 Es4 原油都与牛心坨-台安洼陷 Es4 泥岩正构烷烃曲线相似，而与 Es3 烃源岩正构烷烃曲线表现出明显的差异，反映牛心坨油区原油来自于 Es4 烃源岩。高升地区与雷家地区原油与盘山-陈家洼陷 Es4 烃源岩正构烷烃曲线表现出相似的特征，主峰碳 nC₁₇ 相对丰度格外高，说明两者具有较好的亲缘关系（图 13b）。兴隆台地区原油与冷家地区原油的正构烷烃曲线分布相似，其与盘山-陈家洼陷 Es3 表现出了较为相似的正构烷烃分布特征，表明可能来自于 Es3 段烃源岩（图 13c）。小洼地区 Es3 原油与清水洼陷 Es3 烃源岩正构烷烃曲线分布相似，Es2 原油正构烷烃为前峰型，与 Es3 烃源岩正构烷烃曲线分布相似，表明小洼 Es3 及 Es2 原油可能来自 Es3 烃源岩，不能排除 Es1 源岩的贡献（图 13d）。

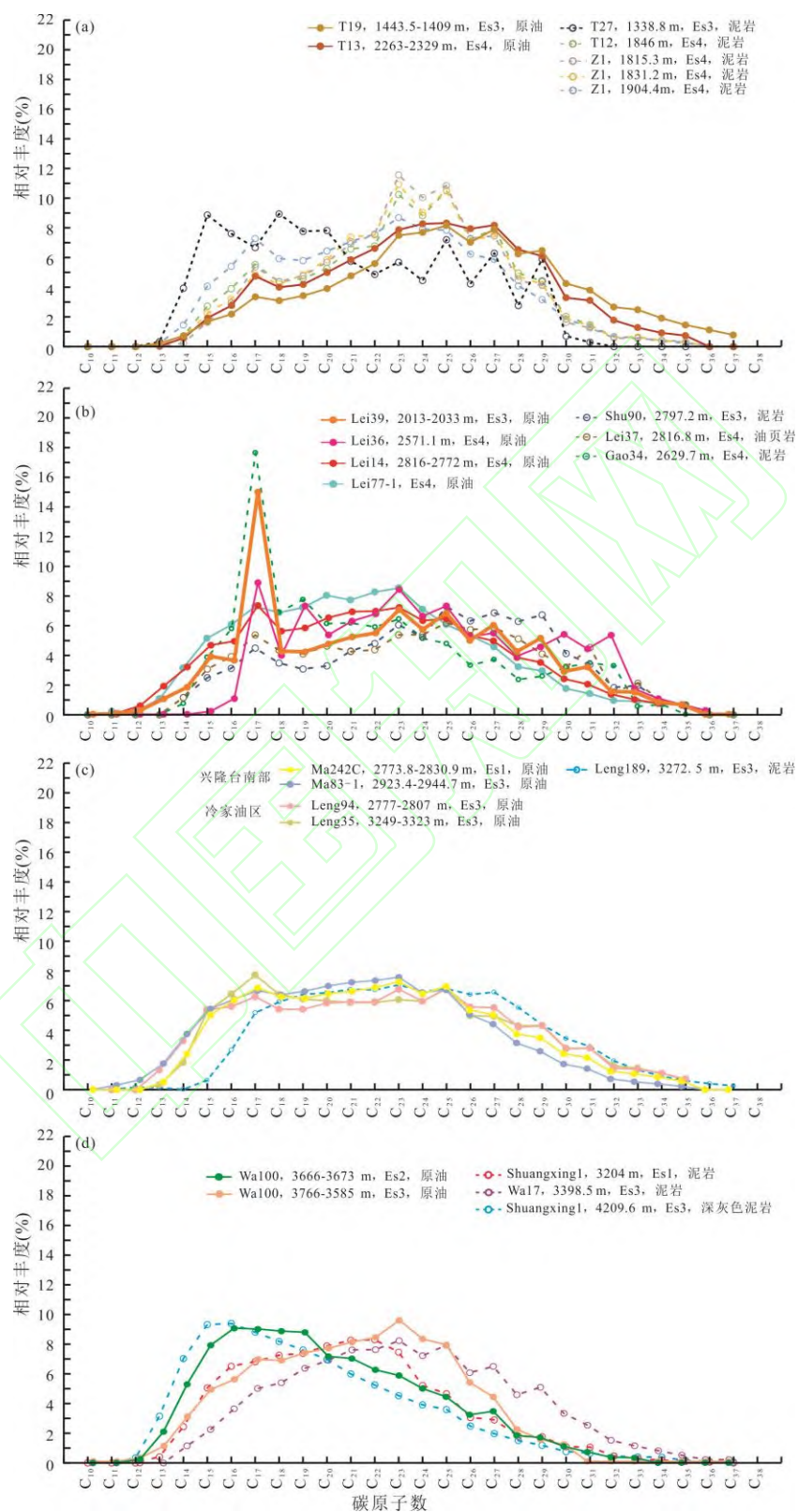


图 13 辽河西部凹陷沙河街组油-岩正构烷烃分布曲线对比图

Fig.13 Correlation of n-alkanes between crude oil and source rock in Shahejie Formation, Liaohu

Western Depression

5.2 甾烷、萜烷生物标志化合物特征对比

通过对辽河西部凹陷沙河街组原油 C_{27} – C_{29} – C_{28} 规则甾烷及萜烷特征进行分析, 结合原油族组成特征, 认为西部凹陷原油生烃母质类型大致可以分为两类 (图 14a): I 类生烃母质主要来自于低等水生生物与陆源高等植物的双重输入, 高等植物占优, 主要包括研究区中北部与南部深层 II 类主要源自低等水生生物/藻类。通过对不同生烃洼陷和油区的油-岩规则甾烷特征与萜烷特征进行对比, 发现牛心坨地区 Es3 及 Es4 原油与牛心坨-台安洼陷 Es4 源岩规则甾烷特征相似, 二者 γ -蜡烷含量高、Ts/Tm 值较低, 反映二者具有较好的亲缘关系 (图 14b, 图 15a)。高升、雷家地区 Es3 及 Es4 原油与盘山-陈家洼陷 Es4 烃源岩具有相似的母质来源 (图 14c; 图 15b); 而冷家地区 Es3 原油规则甾烷特征与盘山-陈家洼陷 Es3 源岩规则甾烷特征相似, 可能有少量 Es4 原油的混入 (图 14c; 图 15c); 兴隆台南部地区 Es3 原油甾、萜烷特征表现为明显的低伽马蜡烷值、高成熟度, 与 Es3 烃源岩生标特征相符 (图 14c; 图 15c); 曙光地区 Es3 及 Es4 原油应来自于盘山-陈家洼陷 Es4 烃源岩, 而 Es1 原油来自于 Es3 烃源岩 (图 14c; 图 15b); 南部地区如双台子地区、双南地区 Es1 原油规则甾烷相对组成特征与清水洼陷 Es1 源岩组成特征相似, 而 Es3 原油如小洼地区 Es3 原油规则甾烷相对组成特征、双南地区 Es3 原油萜烷特征与清水洼陷 Es3 源岩生标特征相似, 表现出了较好的亲缘关系 (图 14d; 图 15d)。

综合多种地化参数对辽河西部凹陷沙河街组原油及烃源岩进行全面对比分析, 图 16 为沿凹陷北东向展布所做油藏剖面, 结果表明牛心坨地区 Es3 及 Es4 原油是由牛心坨-台安洼陷 Es4 烃源岩生成的油气经短距离的侧向及垂向运移聚集形成, 属于近源-源内成藏 (图 16)。高升、雷家地区 Es4 原油是由盘山-陈家洼陷 Es4 烃源岩生成的油气在早期经长距离运移形成, 具体表现在原油饱和烃含量低 (<50%)、碳同位素轻、成熟度低 (李美俊等, 2000); 冷家地区原油主要集中在 Es3, 为 Es3 烃源岩近源聚集成藏, 存在少量的 Es4 原油的混入; 曙光地区 Es3 及 Es4 原油是由盘山-陈家洼陷 Es4 烃源岩经侧向运移在西部斜坡带聚集成藏; 兴隆台 Es3 原油来自于盘山-陈家洼陷 Es3 烃源岩; 南部地区 Es1 浅层原油均来自于清水洼陷 Es1 烃源岩, 并经长聚集运移, 遭受一定的生物降解, 而 Es3 原油则为 Es3 烃源岩近源成藏 (李素梅等, 2008); 小洼地区 Es3 原油是由清水洼陷 Es3 烃源岩经侧向运移聚集形成。

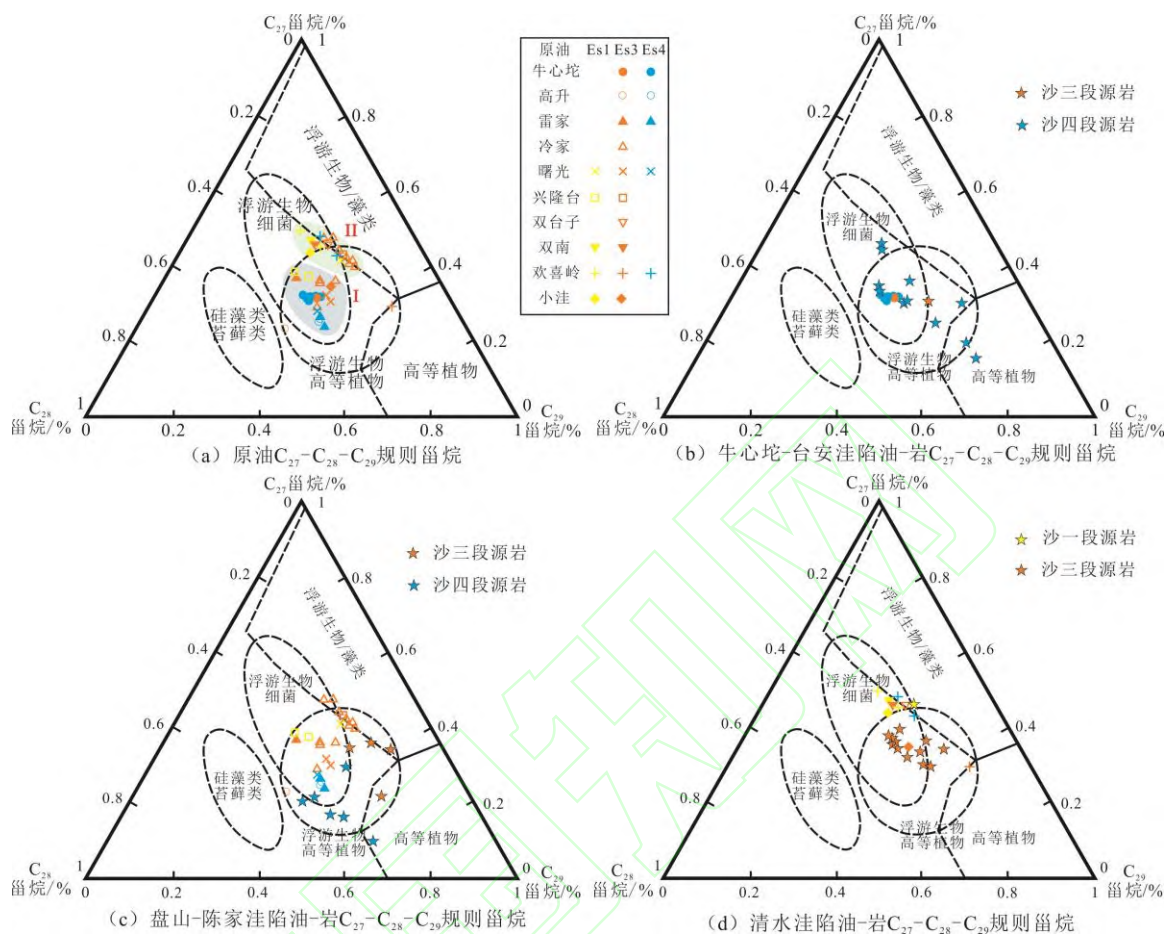


图 14 辽河西部凹陷沙河街组油-岩规则甾烷含量特征对比
Fig. 14 Triangle diagram of regular sterane content of crude oil and source rocks in Shahejie Formation, Liaohe Western Depression

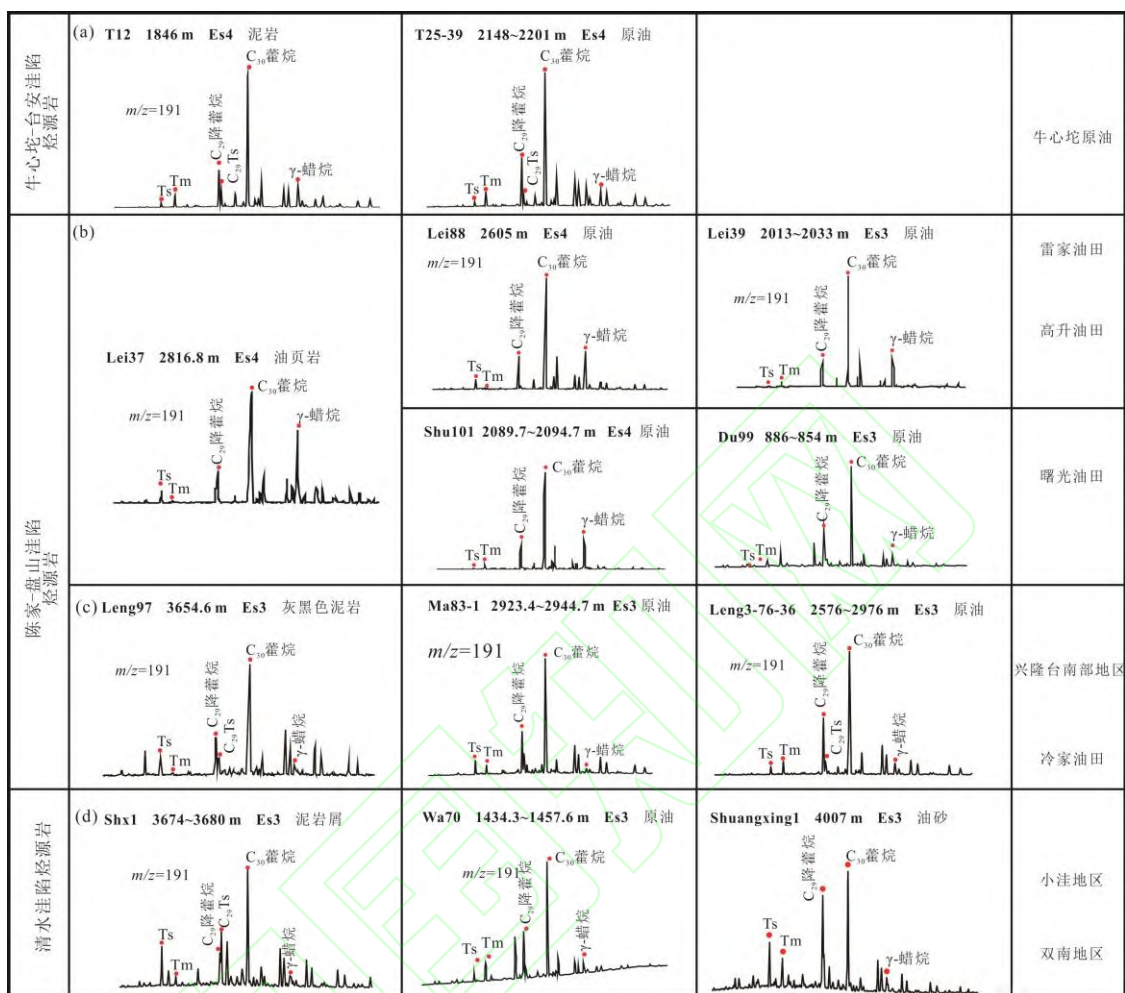


图 15 辽河西部凹陷沙河街组油-岩萜烷特征对比

Fig.15 Terpane characteristics of crude oil and source rocks in Shahejie Formation, Liaohe Western Depression

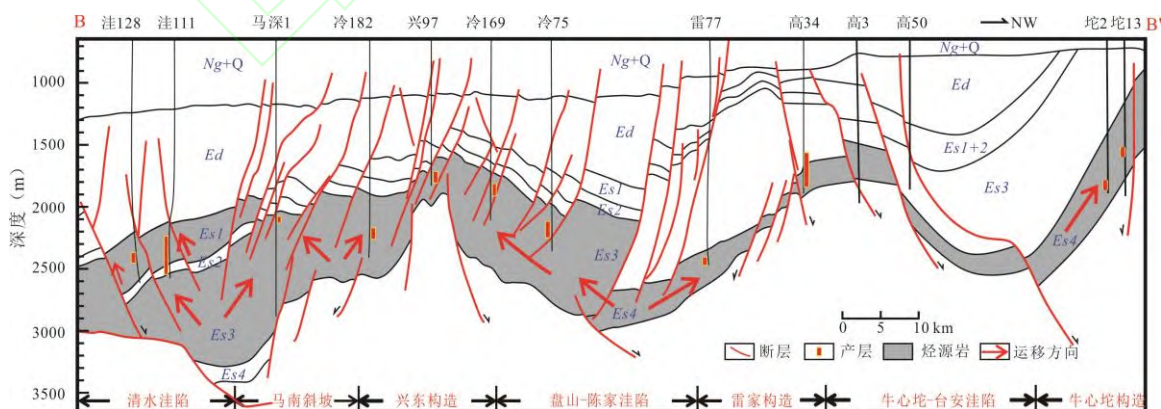


图 16 辽河西部凹陷沙河街组沿凹陷北东向展布剖面油源对比示意图

Fig.16 Profile of oil-source correlation in Shahejie Formation, Liaohe Western Depression

6. 结论

(1) 辽河西部凹陷三大生烃洼陷烃源岩地球化学特征表现出明显差异, Es4 沉积时期, 烃源岩厚度中心主要位于北部牛心坨-台安洼陷, 其 TOC 含量高 (平均 2.23%), 有机质类型主要以 II 型为主, 成熟度较低, 整体属于中-最好烃源岩; Es3 沉积中心向南偏移, 以中部盘山-陈家洼陷及南部清水洼陷为主 (平均厚度可达 850m 及 1200m), TOC 含量高 (平均为 3.34% 及 1.82%), 成熟度高。Es1 烃源岩厚度中心主要集中在南部清水洼陷 (>600m), TOC 含量高 (平均 1.85%), 成熟度较低。从北到南各生烃洼陷烃源岩质量逐渐变好。自下而上有机质类型具有从腐泥型-腐泥腐殖混合型-腐殖型转化的特征, 烃源岩成熟度逐渐减小。

(2) 辽河西部凹陷原油大致可以分为两类, I 类表现为中-低饱和烃、中-高非烃+沥青质含量; 正构烷烃为单峰-后峰型或双峰型, Pr/Ph 值较低, Pr/nC₁₇、Ph/nC₁₈ 较高, 规则甾烷表现为“√”型 (C₂₉>C₂₇>C₂₈) 或直线斜坡型 (C₂₇<C₂₈<C₂₉), 表明生烃母质以陆源高等植物为主, 混有少量的低等水生生物, 母源沉积环境为偏还原环境的咸水-淡咸水环境。第 II 类表现为高饱和烃、低非烃+沥青含量; 正构烷烃表现为前峰型, Pr/Ph 值较高, Pr/nC₁₇、Ph/nC₁₈ 较低, 规则甾烷表现为“L”型 (C₂₇>C₂₉>C₂₈), 表明生烃母质以低等水生生物为主, 母源沉积环境为偏氧化的淡水环境。

(3) 油源对比结果表明北部牛心坨油区原油来自于台安-牛心坨洼陷 Es4 烃源岩; 高升油区、雷家油区、曙光油区原油主要来自于盘山-陈家洼陷 Es4 烃源岩; 冷家油区原油则来自于 Es4 及 Es3 的混源; 兴隆台油区 Es3 原油来自于盘山-陈家洼陷 Es3 烃源岩; 欢喜岭地区、双台子地区及双南地区浅层原油均来自于清水洼陷 Es1 烃源岩, Es3 原油则来自于 Es3 烃源岩; 小洼油区原油来自于清水洼陷 Es3 烃源岩。

References

- Allen, M.B., Macdonald, D.I.M., Xun, Z., et al., 1997. Early Cenozoic Two-phase Extension and Late Cenozoic Thermal Subsidence and Inversion of the Bohai Basin, Northern China. *Marine and Petroleum Geology*. 14, 951–972.
- Cai, L.X., Xiao, G. L., Dong, H.P., et al., 2020. Characteristics of Mesozoic Source Rocks and Exploration Direction of Oil and Gas in the Eastern Depression, North Yellow Sea Basin. *Earth Science*. 45(2): 583-601. (in Chinese with English abstract)
- Hao, F., Zhou, X., Zhu, Y., et al., 2010. Charging of oil fields surrounding the Shaleitian uplift from multiple source rock intervals and generative kitchens, Bohai Bay Basin, China. *Marine and Petroleum Geology*. 27, 1910–1926.
- Hou, D.J., Feng, Z.H., 2011. Oil and Gas Geochemistry. Beijing: *Petroleum Industry Press*, 202-

242+265-269.

- Hu, Y.J., Wang, Y.S., Huang, S.Q., et al., 2019. Petroleum Geological Conditions, Resource Potential and Exploration Direction in Liaohe Depression. *Marine Oil and Gas Geology*, 24: 43-54 (in Chinese with English abstract).
- Huang, D.F., Li, J.C., Zhang, D.J., et al., 1984. Evolution and Hydrocarbon Generation Mechanism of Continental Organic Matter. Beijing: *Petroleum Industry Press* (in Chinese with English abstract).
- Leng, J.G., Pang, X.Q., Li X.G., et al., 2008. Main Controlling Factors of Oil and Gas Accumulation in the Western Sag of Liaohe Fault Depression. *Journal of paleogeography*, 473-480 (in Chinese with English abstract).
- Li, M.J., Ren, P., Hu, L.G., et al., 2000. Application of Carbon Isotope Type Curve in Oil Source Correlation in Liaohe Basin. *Special Oil and Gas Reservoirs*, 02: 11-12 (in Chinese with English abstract).
- Li, M.G., Qi, J.F., Tong, H.M., et al., 2010. Cenozoic Fault Structural Characteristics and Hydrocarbon Accumulation in Western Liaohe Sag. *Petroleum Exploration and Development*, 37: 281-288 (in Chinese with English abstract).
- Li, S.M., Pang, X.Q., Gao, X.Z., et al., 2008. Genetic Mechanism of Heavy Oil in Western Liaohe Depression. *Chinese Science (Series D: geoscience)*, S1: 138-149 (in Chinese).
- Li, X.G., 2021. Reservoir Forming Conditions and Key Exploration and Development Technologies of Heavy Oil in Huanxiling oilfield, Liaohe depression. *Journal of Petroleum*, 42 (4): 541-560 (in Chinese with English abstract).
- Liu, G.D., Zhang, H.F., 2009. *Petroleum Geology*. Beijing: Petroleum Industry Press (in Chinese).
- Liu, L.F., Jiang, Z.X., Zhou, X.M., et al., 2010. Analysis of Hydrocarbon Generation Potential Recovery and Hydrocarbon Expulsion Characteristics of Source Rocks—Taking Paleogene Source Rocks in Western Liaohe Sag as an Example. *Petroleum Exploration and Development*, 37(3): 378-384 (in Chinese with English abstract).
- Lu, S.F., Zhang, M., 2010. Oil and Gas Geochemistry. Beijing: Petroleum Industry Press (in Chinese).
- Lu, S.N., Li, W.M., Gao, J.J., et al., 1986. The Biological Markers in the Crude Oil and Source Rocks of Lower Tertiary from Western Depression, Liaohe Basin. *Earth Science*, 11(3): 295-302 (in Chinese).
- Mao, J.L., Jing, T.Y., Han, X., et al. 2016. Petrological Types and Organic Geochemical Characteristics of High-quality Shale Intervals in Western Liaohe Sag. *Geoscience Front*, 23 (1): 185-194 (in Chinese with English abstract).

- Moldowan, J.M., Seifert, W.K., Gallegos, E.J., 1985. Relationship Between Petroleum Composition and Depositional Environment of Petroleum Source Rocks. *AAPG Bulletin*, 69, 1255-1268.
- Pang, X.Q., 1995. Theory and Application of Hydrocarbon Expulsion Threshold Control. Beijing: Petroleum Industry Press (in Chinese).
- Peters, K.E., 1986. Guidelines for Evaluating Petroleum Source Rock Using Programmed Pyrolysis. *AAPG Bulletin*, 70: 318-329.
- Peters, K.E., Moldowan, J.M., 1993. The Biomarker Guide-Interpreting Molecular Fossils in Petroleum and Ancient Sediments. New Jersey: Prentice Hall.
- Peters, K.E., Walters, C.C., Moldowan, J.M., 2005. The Biomarker Guide: Volume 2, Biomarkers and Isotopes in Petroleum Systems and Earth History (II). Cambridge: Cambridge University Press.
- Riediger, C., Carrellian, G., Zonneveld, J.P., 2004. Hydrocarbon Source Rock Characterization and Thermal Maturity of the Upper Triassic Baldonnel and Pardonet Formations, Northeastern British Columbia, Canada. *Bulletin of Canadian Petroleum Geology*, 52: 277-301.
- Shan, J.F., Gao, X.F., Li, Y.J., et al, 2007. Oil and Gas Resource Potential and Key Zone Selection in Liaohe Oil Region. *Special oil and Gas Reservoirs*, 02: 18-21 (in Chinese with English abstract).
- Shan, Y.S., 2013. Accumulation Conditions and Distribution of Paleogene Shale Oil and Gas in Liaohe Depression (Dissertation), China University of Geosciences (Beijing):142 (in Chinese with English abstract).
- Shan, Y.S., Zhang, J.C., Li, X.G., et al., 2016. Enrichment Conditions and Distribution Model of Continental Shale Oil and Gas in Western Liaohe Sag of Bohai Bay Basin. *Experimental Petroleum Geology*, 38: 496-501 (in Chinese with English abstract).
- Wang, Y.S., Hu, Y.J., Huang, S.Q., et al., 2018. Natural Gas Geological Conditions, Resource Potential and Exploration Direction in Liaohe Depression, Bohai Bay Basin. *Natural Gas Geoscience*, 29: 1422-1432 (in Chinese with English abstract).
- Yin, J., Wang, Q., Hao, F., 2017. Palaeolake Environment and Depositional Model of Source Rocks of the Lower Submember of Sha1 in Raoyang Sag, Bohai Bay Basin. *Earth Science*, 42(7): 1209-1222 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, J.Z., Meng, X.G., Han, Z.H., 2020. Near-source hydrocarbon accumulation: geochemical evidence of lacustrine crude oil from the Member 6 of Yanchang Formation, eastern margin of Ordos Basin. *Acta Petrolei Sinica*, 41(12): 1513-1526 (in Chinese with English abstract).
- Zhu, F.B., 2002. Study on Source Rock Characteristics and Distribution Law of Low Mature Oil in Western Sag of Liaohe Basin. *Geoscience*, 01: 25-29 (in Chinese with English abstract).

Zhu, F.B., Zhou, H., 2018. Biomarker Types of Crude Oil in the Western Depression of Liaohe Basin and Their Geochemical Significance. *Geoscience*, 43 (2): 594-598 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

蔡来星, 肖国林, 董贺平, 等, 2020. 北黄海盆地东部坳陷中生界烃源岩特征及其指示的油气勘探方向. *地球科学*, 45(2): 583-601.

侯读杰, 冯子辉, 2011. 油气地球化学. 北京: 石油工业出版社, 202-242+265-269.

胡英杰, 王延山, 黄双泉, 等, 2019. 辽河坳陷石油地质条件、资源潜力及勘探方向: 海相油气地质, 24: 43-54.

黄弟藩, 李晋超, 张大江, 等, 1984. 陆相有机质的演化和成烃机理. 北京: 石油工业出版社.

冷济高, 庞雄奇, 李晓光, 等, 2008. 辽河断陷西部凹陷油气成藏主控因素: 古地理学报, 473-480.

李美俊, 任平, 胡礼国, 等, 2002. 碳同位素类型曲线在辽河盆地油源对比中的应用. 特种油气藏, 02: 11-12.

李明刚, 漆家福, 童亨茂, 等, 2010. 辽河西部凹陷新生代断裂构造特征与油气成藏: 石油勘探与开发, 37: 281-288.

李素梅, 庞雄奇, 高先志, 等, 2008. 辽河西部凹陷稠油成因机制. 中国科学(D 辑: 地球科学). S1: 138-149.

李晓光, 2021. 辽河坳陷欢喜岭油田稠油成藏条件及勘探开发关键技术. 石油学报, 42(4): 541-560.

刘立峰, 姜振学, 周新茂, 等, 2010. 烃源岩生烃潜力恢复与排烃特征分析——以辽河西部凹陷古近系烃源岩为例. 石油勘探与开发, 37(3): 378-384.

柳广弟, 张厚福, 2009. 石油地质学. 北京: 石油工业出版社.

刘晓晶, 谢庆宾, 徐翔, 等, 2015. 辽河盆地东部凹陷古近系沙河街组层序地层及沉积相研究. 东北石油大学学报, 39(6), 1-11+13.

卢双舫, 张敏, 2010. 油气地球化学. 北京: 石油工业出版社.

卢松年, 李伟民, 郜建军, 等, 1986. 辽河盆地西部凹陷下第三系原油和生油岩的生物标记化合物研究. 地球科学—武汉地质学院学报, 11(3): 295-302.

毛俊莉, 荆铁亚, 韩霞, 等, 2016. 辽河西部凹陷优质页岩层段岩石学类型及其有机地球化学特征: 地学前缘, 23(1): 185-194.

庞雄奇, 1995. 排烃门限控油气理论与应用. 北京: 石油工业出版社.

单俊峰, 高险峰, 李玉金, 等, 2007. 辽河油区油气资源潜力及重点区带选择. 特种油气藏, 02:

18-21.

单衍胜, 2013. 辽河坳陷古近系页岩油气聚集条件与分布(博士学位论文). 北京: 中国地质大学(北京), 142.

单衍胜, 张金川, 李晓光, 等, 2016. 渤海湾盆地辽河西部凹陷陆相页岩油气富集条件与分布模式. 石油实验地质, 38: 496-501.

王延山, 胡英杰, 黄双泉, 等, 2018. 渤海湾盆地辽河坳陷天然气地质条件、资源潜力及勘探方向. 天然气地球科学, 29: 1422-1432.

殷杰, 王权, 郝芳, 等, 2017. 渤海湾盆地饶阳凹陷沙一下亚段古湖泊环境与烃源岩发育模式. 地球科学, 42(7): 1209-1222.

赵靖舟, 孟选刚, 韩载华, 2020. 近源成藏——来自鄂尔多斯盆地延长组湖盆东部“边缘”延长组6段原油的地球化学证据. 石油学报, 41(12): 1513-1526.

朱芳冰, 2002. 辽河盆地西部凹陷源岩特征及低熟油分布规律研究. 地球科学, 1: 25-29.

朱芳冰, 周红, 2018. 辽河盆地西部凹陷原油的生物标志物类型及其地球化学意义. 地球科学, 43(2): 594-598.