

渤海湾盆地黄骅坳陷沙河街组一段混源油藏地球化学特征及烃源岩成藏贡献

周城汉^{1,2}, 罗群^{1,2}, 高静怡^{1,2}, 李卓^{1,2}, 罗书杰^{1,2}, 姜振学^{1,2}, 王仕琛^{1,2}, 蒲秀刚³, 韩文中³

[1. 中国石油大学(北京)油气资源与工程全国重点实验室, 北京 102249; 2. 中国石油大学(北京)非常规油气科学技术研究院, 北京 102249; 3. 中国石油大港油田公司, 天津 300280]

摘要:渤海湾盆地黄骅坳陷沙河街组油气混源现象普遍, 确定混源油藏充注比例有助于预测油气藏的分布。通过总有机碳含量(TOC)测试、岩石热解实验和饱和烃气相色谱-质谱(GC-MS)分析, 系统研究了烃源岩和原油的地球化学特征; 同时采用聚类分析(HCA)和主成分分析(PCA)方法建立了多参数混源油藏充注比例定量模型, 量化不同烃源岩对混源油藏的成藏贡献。研究表明, 沙(沙河街组)三段和沙一段烃源岩有机质丰度中等-好, 干酪根类型为 II_2 - II_1 混合型有机质, 均已经达到成熟阶段。油-源对比结果显示, A类原油来自沙一段烃源岩, 形成于高盐和还原环境, 有机质来源以低等水生生物为主; B类原油由沙三段烃源岩单独供烃, 形成于中盐和弱氧化-弱还原环境, 有机质来源以陆生植物为主; C类原油为沙三段和沙一段烃源岩形成的混源油, 其地球化学特征取决于沙三段和沙一段烃源岩相对供烃量。混源油藏充注比例定量模型表明, 沙一段烃源岩对混源油藏的贡献率为22.73%~59.11%, 沙三段烃源岩的贡献率为40.89%~77.27%。结合实验室人工混油实验对模型进行验证, 结果显示模型的预测误差为0.44%~9.94%, 平均预测误差为5.26%, 表明该模型具有较高的预测精度。

关键词:地球化学; 油-源对比; 充注比例; 混源油藏; 烃源岩; 沙河街组一段; 黄骅坳陷; 渤海湾盆地

中图分类号: TE122.1

文献标识码: A

Geochemical features of and source rock contributions to mixed-source oil reservoirs in the 1st member of the Shahejie Formation, Huanghua Depression, Bohai Bay Basin

ZHOU Chenghan^{1,2}, LUO Qun^{1,2}, GAO Jingyi^{1,2}, LI Zhuo^{1,2}, LUO Shujie^{1,2}, JIANG Zhenxue^{1,2},
WANG Shichen^{1,2}, PU Xiugang³, HAN Wenzhong³

[1. State Key Laboratory of Petroleum Resources and Engineering, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China;
2. Unconventional Petroleum Research Institute, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China; 3. Dagang Oil Company, PetroChina, Tianjin 300280, China]

Abstract: The Shahejie Formation in the Huanghua Depression boasts abundant mixed-source hydrocarbons. Determining the charging ratio for mixed-source oil reservoirs is critical to the prediction of hydrocarbon reservoir distribution in the depression. Through the analysis and tests of total organic carbon (TOC) content, rock pyrolysis, and gas chromatography-mass spectrometry (GC-MS) experiments on saturated hydrocarbons, we systematically examine the geochemical characteristics of source rocks and crude oil in the formation. A multi-parameter quantitative model for determining the charging ratio for mixed-source oil reservoirs is established by combining hierarchical cluster analysis (HCA) and principal component analysis (PCA). With this model, we quantify the contributions of different source rocks to the formation of mixed-source oil reservoirs therein. The results indicate that the source rocks in the 3rd member (Es^3 ; the Sha 3 Member) and the 1st member (Es^1 ; the Sha 1 Member) of the Shahejie Formation show moderate to high organic matter abundance and mixed kerogen types of II_2 and II_1 , respectively, suggesting the presence of mature

收稿日期: 2025-03-18; 修回日期: 2025-05-17。

第一作者简介: 周城汉(1998—), 男, 博士研究生, 油气成藏机理。E-mail: chenghanz1998@163.com。

基金项目: 国家科技重大专项(2024ZD1400101)。

source rocks. Oil-source rock correlation reveals that Class A crude oil is derived from source rocks in the Es¹ and formed in high-salinity, reducing environments, with organic matter originating primarily from lower-class aquatic organisms. Class B crude oil originates solely from source rocks in the Es³ and is formed in medium-salinity, weakly oxidizing to weakly reducing environments, with organic matter sourced mainly from terrestrial plants. Class C crude oil represents mixed oil derived from source rocks in both Es¹ and Es³. Calculations using the quantitative model indicate that the contribution rates of source rocks in the Es¹ and Es³ to the mixed-source oil reservoirs range from 22.73 % to 59.11 % and from 40.89 % to 77.27 %, respectively. Model validation using laboratory artificial oil mixing experiments shows prediction errors ranging from 0.44 % to 9.94 % (average: 5.26 %), indicating high predictive accuracy.

Key words: geochemistry, oil-source rock correlation, charging ratio, mixed-source oil reservoir, source rock, 1st member of the Shahejie Formation (Es¹), Huanghua Depression, Bohai Bay Basin

引用格式:周城汉,罗群,高静怡,等. 渤海湾盆地黄骅坳陷沙河街组一段混源油藏地球化学特征及烃源岩成藏贡献[J]. 石油与天然气地质,2026,47(1):162-179. DOI:10.11743/ogg20260111.

ZHOU Chenghan, LUO Qun, GAO Jingyi, et al. Geochemical features of and source rock contributions to mixed-source oil reservoirs in the 1st member of the Shahejie Formation, Huanghua Depression, Bohai Bay Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2026, 47(1): 162-179. DOI: 10.11743/ogg20260111.

混源油藏是由多套烃源岩或同一套烃源岩在不同时期生成的油气混合充注而成的,其特征受到不同烃源岩成藏贡献的影响,其差异主要体现在有机质来源、沉积环境和成熟度^[1-4]。目前,关于量化不同烃源岩对混源油贡献的方法仍存在争议,特别是当烃源岩具有相近的沉积环境和形成时间时^[5-8]。目前现有的对原油混合比例确定方法可以分为3类:①物质平衡法。其原理是利用端元油和混源油中碳同位素或生物标志物的特征参数共同计算不同端元油的贡献,但不同参数的计算结果存在差异^[9-10]。②人工实验室配比法。其原理是按照不同的比例将端元油进行混合,通过对比人工混合油和混源油的地球化学特征,确定混源比例^[11-12]。③数理统计法。其原理是利用交替最小二乘法 and 灰色关联法等数学方法对混源油生物标志物的绝对浓度进行统计分析,计算混源油中各端元油的相对贡献^[1,13]。王宁等^[14]采用单体碳同位素和气相色谱综合确定了白云凹陷原油的混源比例;蒋文龙等^[15]采用交替最小二乘算法,在不确定端元油的情况下,确定了玛东斜坡的端元油组成和贡献比例。因此,对于混源油藏充注比例的问题,应该结合油藏的地质条件和资料的分布情况选择合适的方法进行研究。

油气地球化学在油-源对比、古环境恢复和油气藏预测中发挥着重要作用^[16-17]。传统方法采用单一生物标志物或同位素组成进行定性分析,但在复杂地质背景下常面临多参数整合和解释主观性强等困难。化学计量学(如聚类分析和主成分分析等)是通过数学建模与统计学方法实现多维数据的定量解析,可以最大限度地从复杂的数据中获取有用信息^[18]。聚类分析

是通过 n 维空间(n 表示所选参数的数量)计算聚类距离,根据距离的远近将相同维度的不同样本组合成不同的簇,来判断样本间的相关性^[19]。主成分分析是使用少量相互独立的变量来反映原来多维变量信息,同时要求各主成分的方差要足够大^[20]。目前,化学计量学广泛应用于油-源对比和地质评价。例如,朱必清等^[19]通过主成分分析确定鄂尔多斯盆地甘泉地区的Ⅰ类原油由长(延长组)7段烃源岩贡献,Ⅱ类原油为长8段和长9段烃源岩共同贡献。

渤海湾盆地中部的黄骅坳陷是一个典型的叠合含油气坳陷,发育多套烃源岩和多类型油气藏,油气资源丰富^[21-23]。地球化学资料表明,黄骅坳陷古近系沙河街组时期发育微咸水湖泊,原油形成于弱氧化-弱还原环境,有机质类型为陆生高等植物和低等水生生物混合型^[24-25]。沙河街组主要发育沙(沙河街组)一段和沙三段烃源岩,其中沙一段的腐泥型有机质含量略高于沙三段^[26]。大量勘探证实,沙一段砂岩油藏由沙三段和沙一段烃源岩共同供烃^[27]。因此,沙一段原油在生物标志物的分布和含量上具有相似的特征。为此,其他学者做了大量的研究工作:Song等^[28]根据原油的物理性质、分子组成和饱和烃气相色谱图将歧口凹陷原油分为2类,并且认为第2类原油受生物降解影响较大;孙肖等^[29]根据类异戊二烯烷烃和甾萜烷将歧口凹陷原油分为8类;王艺帆^[30]证实姥/植比和伽马蜡烷指数是区分黄骅坳陷原油类型的主要参数,并且认为中、高部位的油气来自沙三段烃源岩,低部位的油气来自沙一段烃源岩。然而,对于油气混源现象普遍的黄骅坳陷来说,尚未有学者对混源油藏充注比例进行定量研究。

本文以黄骅坳陷沙一段油藏和沙三段、沙一段烃源岩为研究对象,通过总有机碳含量(TOC)测试、岩石热解实验和饱和烃气相色谱-质谱分析系统研究了烃源岩和原油的地球化学特征,明确其有机质来源、沉积环境和成熟度等多元影响因素;结合聚类分析和主成分分析建立沙一段混源油藏充注比例定量模型;在此基础上,通过人工实验室混油实验,验证混源油藏充注比例模型。本研究定量计算了沙三段和沙一段烃源岩对混源油藏的贡献,为黄骅坳陷油藏分布预测提供了支撑。

1 区域地质概况

渤海湾盆地是中生代最大的裂陷盆地之一^[31-32]。受燕山褶皱带、太行山造山带、鲁西隆起区及辽东-鲁东隆起带的限制^[33],盆地整体呈“菱形”展布(图 1a)。在始新世早期扬子板块楔入和太平洋板块俯冲的作用下,渤海湾盆地形成 4 条主要断裂带,分别是营口-辽东湾-潍坊右旋走滑断裂带、黄骅-东濮右旋走滑断裂带、霸县-束鹿-汤阴右旋走滑断裂带和北京-蓬莱左旋走滑断裂

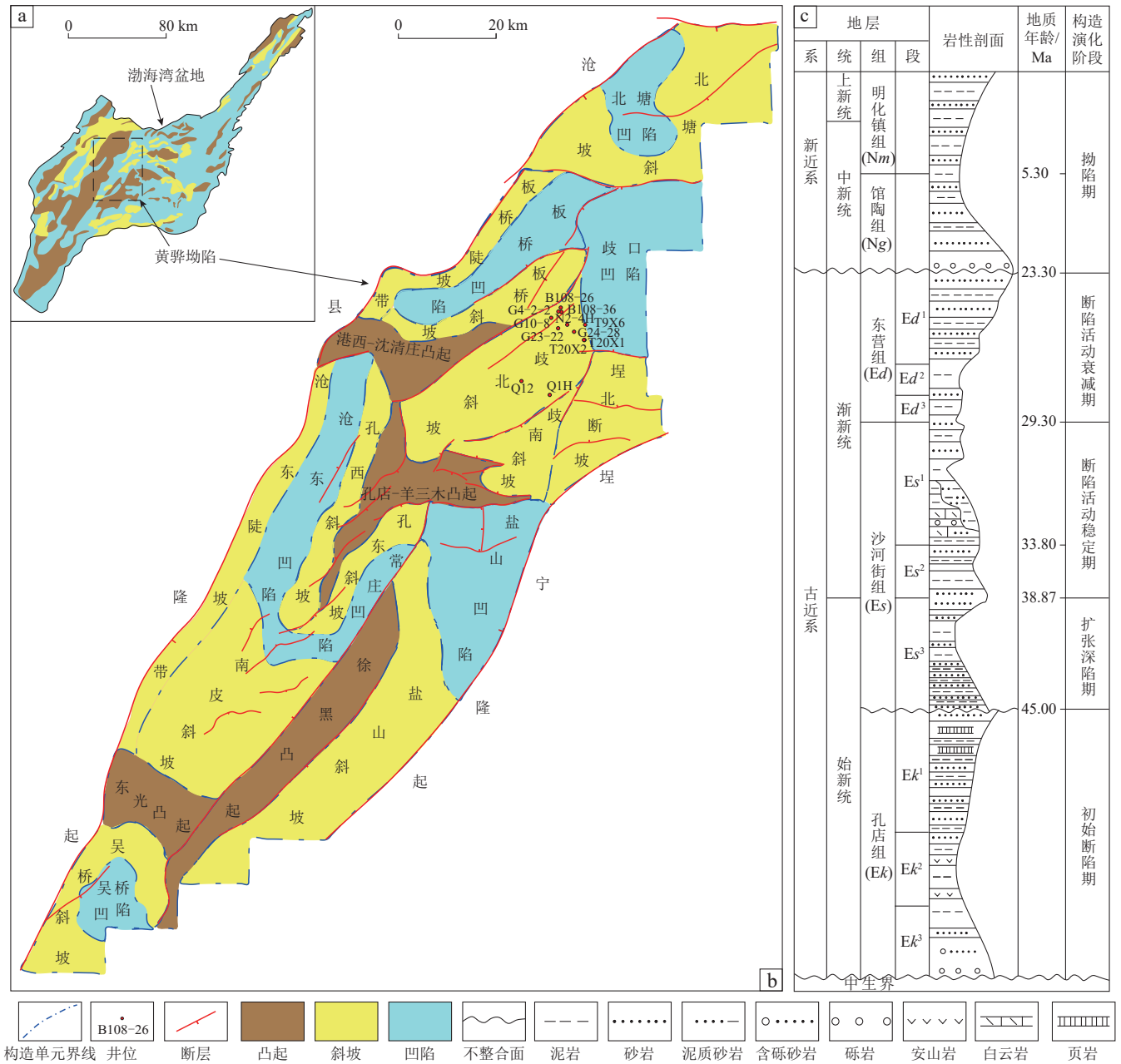


图1 黄骅坳陷地质构造和地层综合特征(据文献[43]修改)

Fig. 1 Geological structure maps and composite stratigraphic column of the Huanghua Depression (modified after reference [43])

a. 黄骅坳陷在渤海湾盆地位置;b. 黄骅坳陷构造纲要;c. 黄骅坳陷地层柱状图

带^[34-35]。这些断裂带和盆地裂陷作用共同控制盆地内部凹陷和凸起的分布,形成了现今的构造格局。

黄骅拗陷位于渤海湾盆地的中部,总面积 $1.8 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。在地幔物质上涌和盆地裂陷的作用下,拗陷延展方向由南区向北区逐渐由NE向转变为WE向^[36-37]。拗陷北部与燕山褶皱带相连,东部与沙垒田凸起相接,西部与沧县隆起相望,东、南部以埕宁隆起相隔^[38-39]。根据现今的构造格局,拗陷内部可以划分为23个次级构造带(图1b)。

黄骅拗陷主要发育古近系和新近系,自下而上分别是孔店组、沙河街组、东营组、馆陶组和明化镇组(图1c)。其中沙河街组进一步分为沙三段、沙二段和沙一段。沙三段的沉积相为湖泊相和三角洲相,下部地层以灰色和棕色泥岩为主,中间夹薄层砂、砾岩,上部地层为深灰色泥岩夹薄层砂岩,整体呈现由粗到细的正旋回特征^[40-41]。该套地层自北向南超覆在古近系地层之上,厚度具有北厚、南薄的分布特点。沙一段以厚层暗色湖相泥岩和三角洲相砂岩为主,下部地层发育深灰色泥岩夹薄层白云岩,中部为灰白色砂岩,顶部为深灰色泥岩夹薄层粉砂岩^[42]。

2 样品和实验方法

歧北斜坡是黄骅拗陷的主要产油区之一,具有“复式输导、两期充注”的成藏特征^[44, 45]。因此,选取位于黄骅拗陷歧北斜坡12口井的原油和烃源岩样品(图1b),原油样品取样层位为沙一段,烃源岩样品取样层位为沙三段和沙一段。分析测试在中国石油大学(北京)油气资源与工程全国重点实验室完成,包括TOC测试、岩石热解实验、饱和烃气相色谱-质谱分析、聚类分析和主成分分析。此外,从中国石油大港油气分公司勘探开发研究院获得烃源岩总有机碳含量和岩石热解资料176件。

2.1 TOC测试

TOC测试的仪器为LECO CS230碳硫仪,实验标准参照《沉积岩中总有机碳测定》(GB/T19145—2022)。将烃源岩样品粉碎并通过200目筛,然后加入稀盐酸去除无机碳,接着用去离子水洗净蒸干,最后置入仪器中测试TOC。

2.2 岩石热解实验

岩石热解实验是在ROCK-EVAL6热解仪中完成,实验标准参照《岩石热解分析》(GB/T18602—2012)。将粉碎后的烃源岩样品加热至300℃测得游

离烃含量(S_1),再加热至600℃测得热解烃含量(S_2), S_2 峰最高点对应的温度为最高热解峰温($T_{\max}$)。

2.3 饱和烃气相色谱-质谱分析

饱和烃气相色谱-质谱实验采用Agilent 6890-5975气相色谱质联用仪测试,实验标准为《气相色谱-质谱法测定沉积物和原油中生物标志物》(GB/T18606—2017)。色谱部分以流速为1.0 mL/min的He气不分流进样,初始温度为80℃,以3℃/min升至310℃,保留20 min;质谱部分的离子源温度为230℃,四极杆温度为150℃,电离能为70 eV,分别通过全扫描(SCAN)与选择离子检测(SIM)获取数据(扫描范围 m/z 50~570)。

2.4 聚类分析和主成分分析

使用IBM SPSS Statistics对地球化学参数进行聚类分析和主成分分析。为了消除不同量纲参数的影响,在多元统计之前,对所有参数进行标准化处理。在进行聚类分析时,不预设参数范围,通过欧氏距离和组间连接方法进行分类。在进行主成分分析时,首先对数据进行KMO检验和Bartlett's球状检验,确定各组分是否相互独立。当 $KMO > 0.5$ 或 $Sig < 0.05$ 时(KMO 和 Sig 为主成分分析数据的检验方式),表明数据适合进行主成分分析。

2.5 人工实验室混油实验

采用石油醚溶解不同比例的端元油(2:8,4:6,6:4和8:2),充分震荡直到完全混合;当试剂瓶中液体的颜色均匀并且瓶身没有残余物质时,原油混合效果较好;最后,从混合好的原油样品中分离出饱和烃,开展色谱-质谱分析。

3 烃源岩展布与地球化学特征

3.1 烃源岩展布

沙三段是黄骅拗陷的主要烃源岩,平面上可见多个次洼呈“坨状”分布(图2a);其中歧口主凹和歧北次凹沉积厚度最大,分别为1300 m和1200 m。沙一段烃源岩厚度仅次于沙三段烃源岩,为800 m,平面上呈现歧口主凹向边缘逐渐减薄的趋势(图2b);相比于沙三段烃源岩,沙一段具有沉积范围小、沉积层厚度薄的特征。

3.2 地球化学特征

沙三段烃源岩的氢指数(HI)和 $T_{\max}$ 分别处在

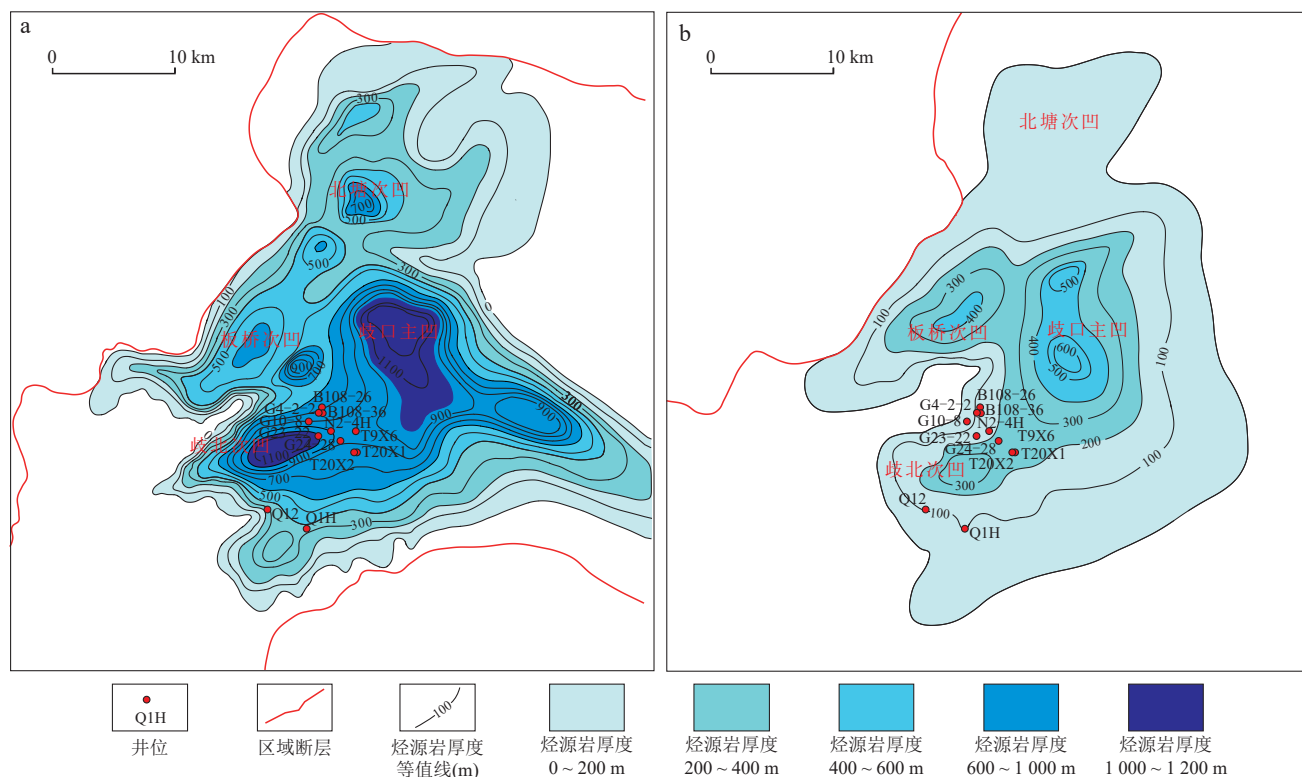


图2 黄骅拗陷沙三段(a)和沙一段(b)烃源岩平面展布(据文献[24]修改)

Fig. 2 Mapping of source rocks in the Es³ (a) and Es¹ (b), Huanghua Depression (modified after reference [24])

77.60 ~ 440.54 mg/g 和 391.00 ~ 452.00 °C, 平均值分别为 191.22 mg/g 和 442.21 °C。依据 $HI-T_{max}$ 有机质类

型判别图版^[46](图 3a), 认为沙三段烃源岩干酪根类型为 II₂ 型, 为陆生植物和水生生物混合型有机质。

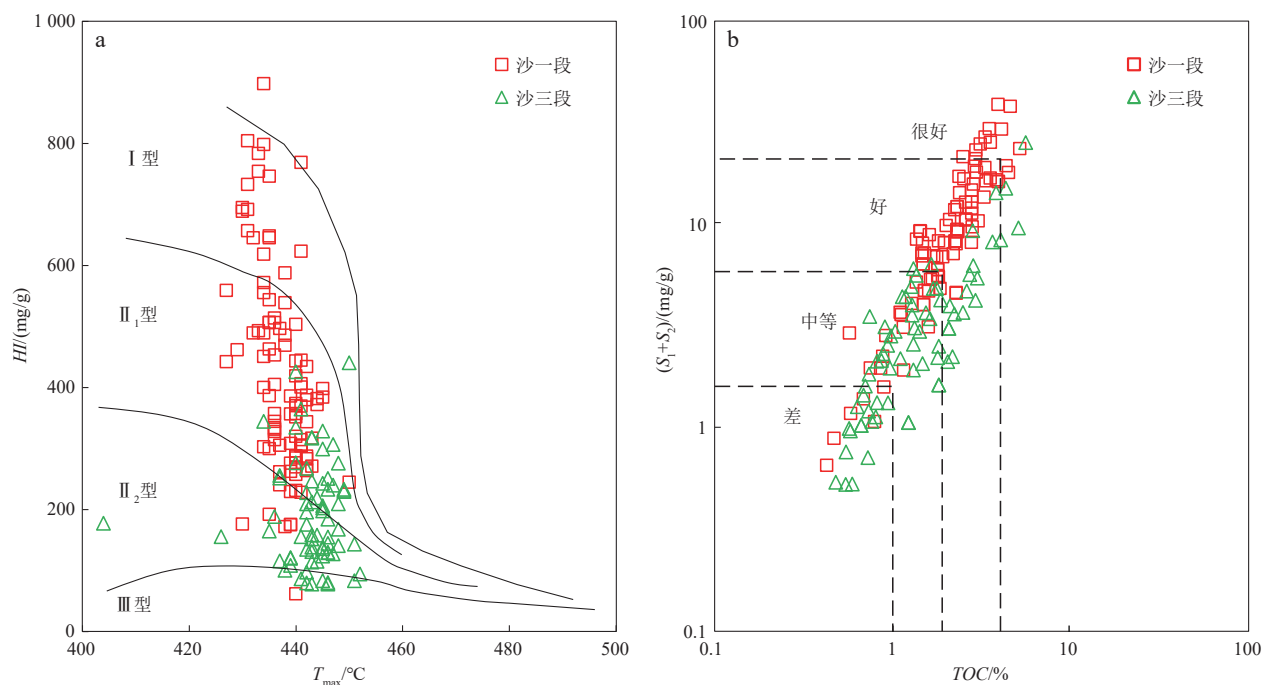


图3 黄骅拗陷沙三段和沙一段烃源岩有机质类型(a)和生烃潜力(b)判别图版(图版来自文献[46])

Fig. 3 Cross plot of the organic matter types (a) and hydrocarbon-generating potential (b) of source rocks in the Es³ and Es¹, Huanghua Depression (after reference [46])

(HI 为氢指数; T_{max} 为最高热解峰温; S_1 为游离烃含量; S_2 为热解烃含量; TOC 为总有机碳含量。)

生烃潜力判别图版(图3b)显示,沙三段烃源岩的残余有机碳含量和生烃潜量(S_1+S_2)分别分布在0.48%~5.57%和0.52~24.56 mg/g,平均值分别为1.64%和3.66 mg/g,为中等烃源岩。有机质成熟度(镜质体反射率 R_o)分布在0.37%~1.58%,处于高成熟阶段。

从烃源岩的有机质类型判别图版(图3a)来看,沙一段烃源岩HI为61.90~897.97 mg/g,平均值为420.45 mg/g; T_{max} 分布在427.00~450.00 °C,平均值为437.54 °C。因此,沙一段烃源岩有机质类型主要为II₁型,为水生生物和陆生植物混合输入,但水生生物的贡献更大^[46]。沙一段烃源岩的残余有机碳含量和 S_1+S_2 分别为0.42%~5.22%和0.65~37.74 mg/g,平均值分别为2.38%和11.79 mg/g,为好烃源岩(图3b)。 R_o 分布在0.35%~1.20%,处于成熟阶段。

在本文研究的烃源岩样品中,沙一段烃源岩的样

品有机质类型为II₁型, TOC 为2.30%, R_o 为1.10%;沙三段烃源岩的样品有机质类型为II₂型, TOC 为1.60%, R_o 为1.40%。两套烃源岩样品可以反映黄骅坳陷沙一段和沙三段烃源岩的真实特征。

4 烃源岩和原油生物标志物特征

4.1 正构烷烃与类异戊间二烯烃分布

图4展示了黄骅坳陷原油样品和烃源岩样品的饱和烃和烃气相色谱图。这些色谱图具有完整的正构烷烃系列(nC_{12} — nC_{38}),并且正构烷烃系列的相对丰度明显高于类异戊间二烯烃(图4)。谱图表现为前峰型,具有不明显的双峰态,主峰碳主要以 nC_{21} 为主,少量样品为 nC_{15} 和 nC_{17} (表1)。所有原油样品的饱和烃色谱基线

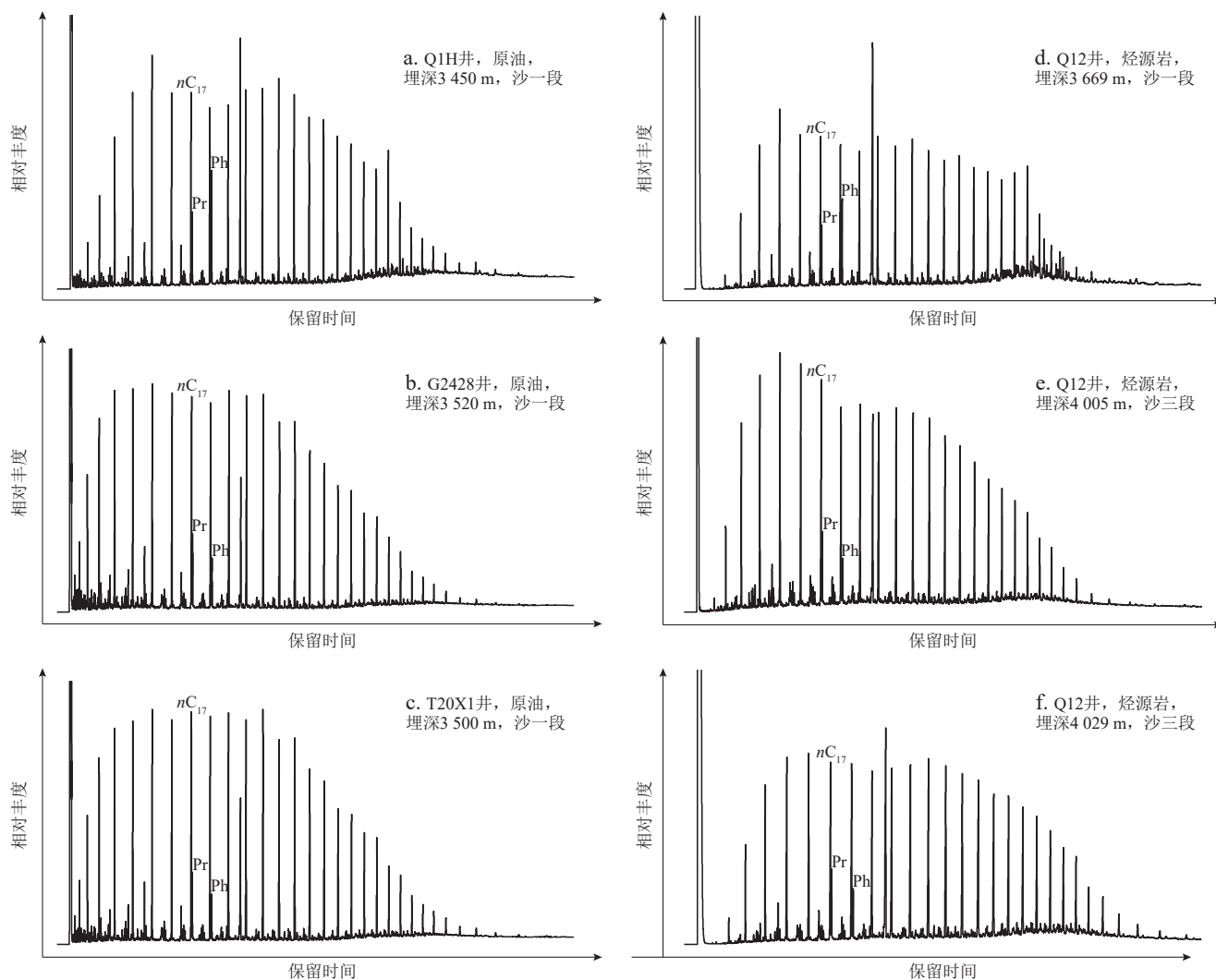


图4 黄骅坳陷原油和烃源岩正构烷烃分布

Fig. 4 Gas chromatogram of saturated hydrocarbons in crude oil and source rocks in the Huanghua Depression

(Pr为姥鲛烷;Ph为植烷; nC_{17} 为正十七烷。)

表1 黄骅坳陷原油和烃源岩饱和烃气相色谱参数

Table 1 Parameters of gas chromatograms of saturated hydrocarbons in crude oil and source rocks in the Huanghua Depression

序号	样品编号	深度/m	层位	类型	主峰碳	Pr/Ph	CPI	OEP
1	G2428	—	Es ¹	原油	C ₂₁	1.37	1.11	1.04
2	B10826	—	Es ¹	原油	C ₂₁	1.21	1.10	1.03
3	N24H	—	Es ¹	原油	C ₁₇	1.32	1.10	1.04
4	G422	—	Es ¹	原油	C ₁₇	1.28	1.11	1.07
5	B10836	—	Es ¹	原油	C ₂₁	1.28	1.11	1.03
6	G108	—	Es ¹	原油	C ₂₁	1.33	1.11	1.05
7	T20X2	—	Es ¹	原油	C ₂₁	1.56	1.10	1.02
8	T20X1	—	Es ¹	原油	C ₂₁	1.33	1.10	1.04
9	T9X6	—	Es ¹	原油	C ₂₁	1.14	1.13	1.05
10	Q1H	—	Es ¹	原油	C ₁₅	0.58	0.99	0.99
11	G2322	—	Es ¹	原油	C ₂₁	0.96	1.10	1.04
12	Q12-1	3 669	Es ¹	烃源岩	C ₁₅	0.57	1.00	1.16
13	Q12-2	3 677	Es ¹	烃源岩	C ₁₅	0.61	0.97	1.10
14	Q12-3	4 005	Es ³	烃源岩	C ₁₆	1.48	0.99	1.02
15	Q12-4	4 029	Es ³	烃源岩	C ₂₂	1.27	1.02	0.97

注:Pr/Ph为姥/植比;CPI为碳优势指数;OEP为奇偶优势比。“—”代表无此数据。

均平直,未观察到明显的“驼峰”(UCM),说明原油样品没有受到生物降解作用的影响(图4a—c)。沙三段烃源岩和大部分原油样品都显示出姥鲛烷(Pr)相对丰度大于植烷(Ph)丰度的特征(图4b,c,e,f),但沙一段烃源岩和少量原油样品展示出相反的趋势(图4a,d)。

类异戊间二烯烃比值(姥鲛烷/植烷含量比值Pr/Ph)可以指示沉积环境和有机质类型:Pr/Ph≤1,指示还原环境;1<Pr/Ph≤3,指示弱氧化-弱还原环境;Pr/Ph>3,指示氧化环境^[47-48]。在研究区,原油Pr/Ph值变化范围为0.58~1.56,平均值为1.21,整体为弱氧化-弱还原环境;只有少量原油样品的Pr/Ph值小于1.00,为还原环境。在烃源岩中,沙一段Pr/Ph平均值为0.59,指示还原环境;沙三段Pr/Ph平均值为1.37,指示弱氧化-弱还原环境。由Pr/nC₁₇(姥鲛烷/正十七烷含量比值)-Ph/nC₁₈(植烷/正十八烷含量比值)交汇图可知(图5a),沙三段烃源岩和大部分原油样品的有机质类型为Ⅱ-Ⅲ型混合有机质,沉积环境为弱氧化-弱还原环境,成熟度偏高;沙一段烃源岩和Q1H井原油母质类型为Ⅰ-Ⅱ型混合有机质,沉积环境为还原环境,成熟度相对偏低。此外,这些样品的碳优势指数(CPI)和奇偶优势比(OEP)分别在0.97~1.11和0.97~1.16,均低于1.20,表明原油和烃源岩已经达到成熟阶段。

4.2 三环萜烷(TT)分布

通常认为,C₁₉TT和C₂₀TT的形成与陆相有机质有

关,C₂₃TT则形成于海洋或咸湖环境,并且这些生物标志化合物具有较高的稳定性^[49-51]。大部分原油(图6b,c)和沙三段烃源岩(图6e,f)样品的C₁₉—C₂₄TT三环萜烷系列都以C₂₁TT为主要同系物,少量原油(图6a)和沙一段烃源岩(图6d)样品则以C₂₃TT为主要同系物。研究区原油的(C₁₉TT+C₂₀TT)/C₂₃TT含量比值分布在0.37~1.74,表明有机质来源受低等水生生物和陆生植物双重控制。其中,以低等水生生物为主的原油占55%,以陆生植物为主的原油占45%。此外,沙一段烃源岩的(C₁₉TT+C₂₀TT)/C₂₃TT含量比值小于1.00、平均值为0.50,沙三段烃源岩的(C₁₉TT+C₂₀TT)/C₂₃TT含量比值大于1.00、平均值为1.40,表明沙一段烃源岩有机质中低等水生生物占主导地位,沙三段有机质中陆生植物占主导地位。

4.3 五环三萜分布

研究区发育完整的五环三萜系列化合物。就相对丰度而言,大部分原油和烃源岩样品具有C₃₀藿烷(C₃₀H)最高、18α(H)-C₂₇三降藿烷(Ts)>17α(H)-C₂₇三降藿烷(Tm)、奥利烷(O)较低、伽马蜡烷(G)变化大的特点(图7);但沙一段烃源岩和少量原油样品呈现出Ts相对丰度小于或近似等于Tm、伽马蜡烷较高的趋势(图7a,d)。

Ts/(Ts+Tm)含量比值可以用来反映烃源岩和原油的成熟度^[51]。研究区原油和烃源岩Ts/(Ts+Tm)值

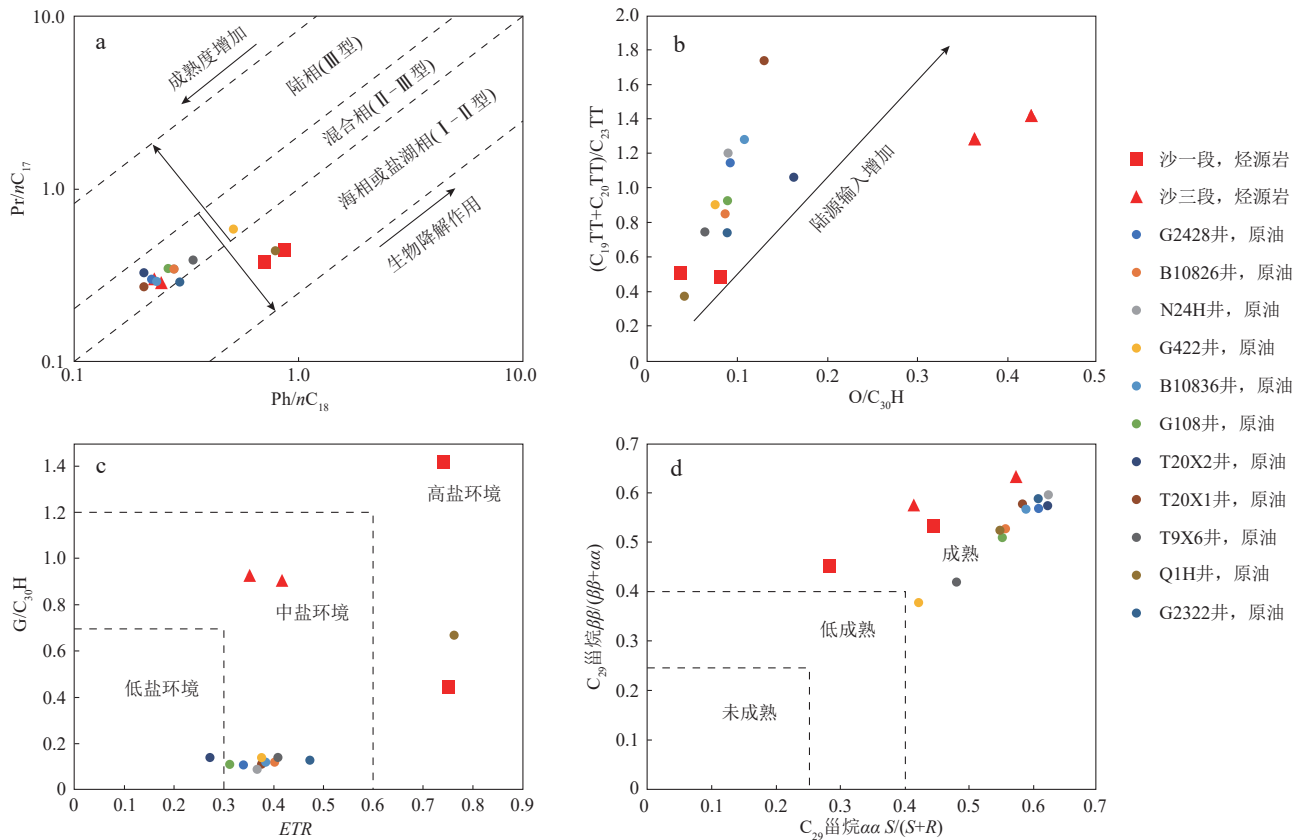


图5 黄骅坳陷原油和烃源岩油-源对比参数(图版来自文献[49,53])

Fig. 5 Parameters for oil-source rock correlation of crude oil and source rocks from the Huanghua Depression (after references [49,53])
a. Pr/nC_{17} and Ph/nC_{18} 交汇图; b. $(C_{19}TT+C_{20}TT)/C_{23}TT$ 和 $O/C_{30}H$ 交汇图; c. $G/C_{30}H$ 和 ETR 交汇图; d. C_{29} 甾烷 $\beta\beta/(\beta\beta+\alpha\alpha)$ 和 C_{29} 甾烷 $\alpha\alpha S/(S+R)$ 交汇图
[C_{29} 甾烷 $\beta\beta/(\beta\beta+\alpha\alpha)$ 和 C_{29} 甾烷 $\alpha\alpha S/(S+R)$ 为 C_{29} 规则甾烷异构化参数比。其余符号说明见正文。]

分布在 0.42 ~ 0.92, 平均值为 0.64, 表明原油和烃源岩达到成熟阶段。奥利烷指数 ($O/C_{30}H$) 含量比值可以反映陆生植物对源岩和原油的贡献^[52]。在研究区, 原油 $O/C_{30}H$ 值分布在 0.04 ~ 0.16, 平均值为 0.90; 沙一段烃源岩 $O/C_{30}H$ 值为 0.04 ~ 0.08, 平均值为 0.06; 沙三段烃源岩 $O/C_{30}H$ 值为 0.34 ~ 0.43, 平均值为 0.39; 由 $O/C_{30}H$ 与 $(C_{19}TT+C_{20}TT)/C_{23}TT$ 交汇图可知(图 5b), 陆生植物对沙三段烃源岩的贡献大于沙一段, 原油处于两套烃源岩之间。研究表明, 长链三环萜烷指数 (ETR , $ETR = (C_{28}TT + C_{29}TT)/(C_{28}TT + C_{29}TT + Ts)$) 可以反映烃源岩沉积时期水体的盐度, 伽马蜡烷指数 ($G/C_{30}H$) 可以反映水体的分层情况^[53]。由 $G/C_{30}H$ 与 ETR 交汇图可知(图 5c), 沙三段烃源岩和大部分原油样品形成于中盐环境, 而沙一段和 Q1H 井原油为高盐环境。

4.4 规则甾烷分布

C_{27} — C_{29} 规则甾烷的分布与相对含量已广泛应用到油-源对比中, 其中 C_{27} 规则甾烷是低等水生生物的

标志物, C_{29} 规则甾烷主要来源于陆生植物^[54]。所有原油和烃源岩 C_{27} — C_{28} — C_{29} 规则甾烷在气相色谱-质谱图上都呈“V”型或“L”型(图 8), 表明原油和烃源岩有机质为水生生物和陆生植物双重输入。其中, 大部分原油和沙三段烃源岩的规则甾烷含量表现为 C_{29} 甾烷 > C_{27} 甾烷的特点, 而少量原油和沙一段烃源岩则呈 C_{29} 甾烷 < C_{27} 甾烷的趋势, 表明沙一段烃源岩低等水生生物的贡献大于陆生植物, 沙三段烃源岩则相反。研究区烃源岩和原油样品规则甾烷含量比值 C_{29} 甾烷 $\beta\beta/(\beta\beta+\alpha\alpha)$ 和甾烷 $C_{29}\alpha\alpha S/(S+R)$ 分别处在 0.45 ~ 0.63 和 0.28 ~ 0.62, 平均值分别为 0.53 和 0.53, 表明烃源岩和原油均达到成熟阶段(图 5d)。

4.5 油-源对比

在开展油-源对比时, 需要对参数进行优选, 并且选取的参数应尽可能代表原油和烃源岩的全部信息。在研究区, 沙三段和沙一段烃源岩在形成时间、沉积环境和母质类型等方面存在较大的相似性, 有些地球化学指标不能很好地对它们进行区分, 需要选取特征参

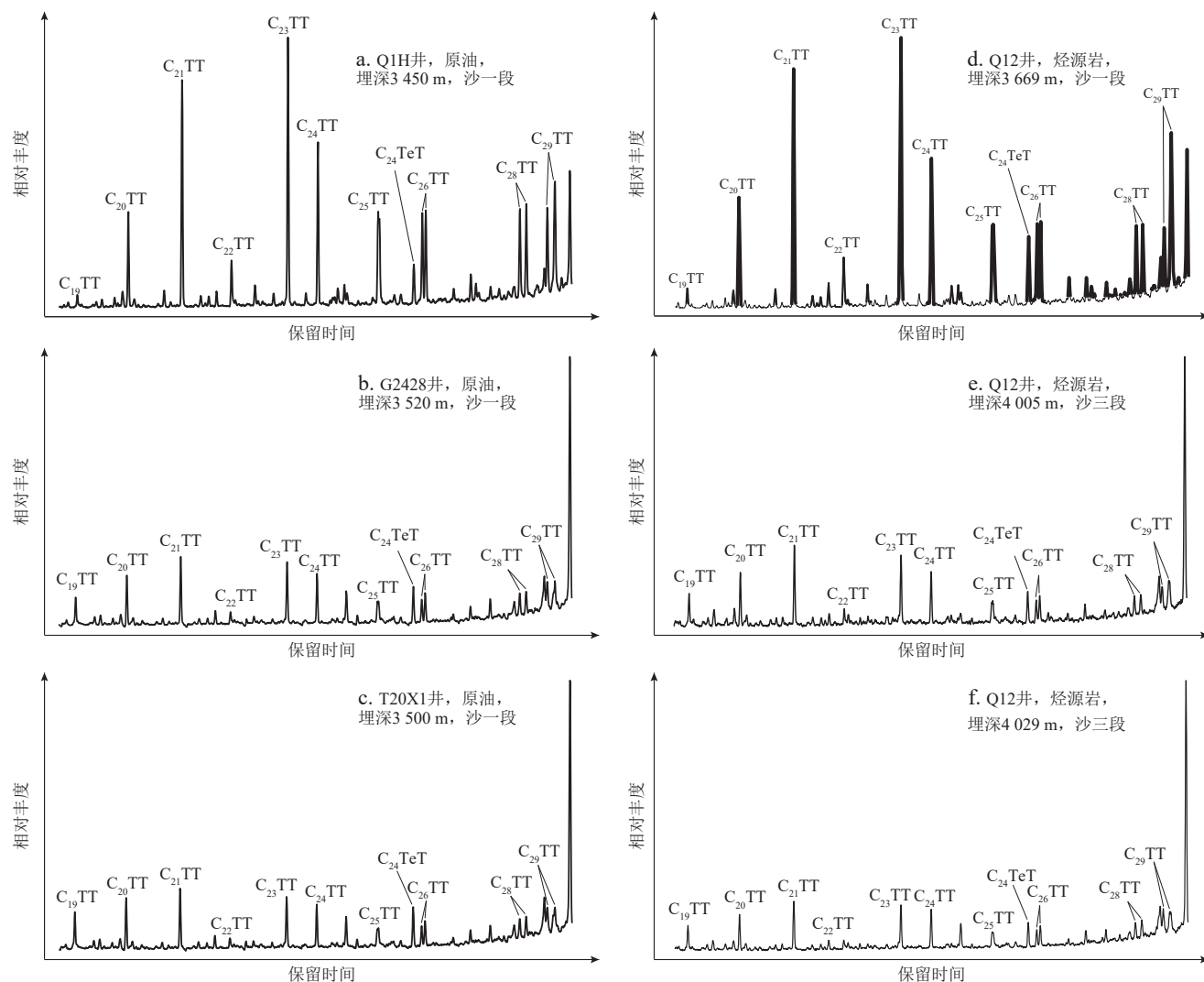


图6 黄骅坳陷原油和烃源岩三环萜烷分布气相色谱-质谱(m/z 191)

Fig. 6 Distribution of tricyclic terpane series compounds in crude oil and source rocks from the Huanghua Depression (m/z 为质荷比。TT为三环萜烷;TeT为四环萜烷。)

数来进行原油类型划分和油-源对比。因此,为了提高聚类分析的适用性,本研究对生物标志物参数进行分级筛选,备选参数的筛选标准为数值相差较大并且能够体现原油和烃源岩差异。为了减小不同地球化学参数值的区间差异造成的误差,建立了参数范围优选区间。根据反映原油和烃源岩差异的参数所形成的区间,最终确定3个参数范围优选区间,分别是0~0.5, 0~1.0和0~3.0,根据筛选标准,共选取Pr/Ph, Ts/(Ts+Tm)和O/C₃₀H等13个参数(表2)进行聚类分析,结果如图9所示。

A类原油主峰碳数为 nC_{15} , Pr/Ph小于1.00, $(C_{19}TT+C_{20}TT)/C_{23}TT$ 小于1.00, ETR大于0.6,表明A类原油在高盐、还原环境中形成;Ts/(Ts+Tm)值小于或近似等于0.50,成熟度相对较低;O/C₃₀H平均值为0.04, $C_{27}-C_{28}-C_{29}\alpha\alpha\alpha 20R$ 甾烷表现为 C_{29} 甾烷< C_{27} 甾烷

的“L”型分布,表明低等水生生物对有机质的贡献大于陆生植物;结合聚类分析结果与谱图特征,认为A类原油为沙一段烃源岩的端元油。B类原油主峰碳数为 nC_{21} , Pr/Ph大于1.00, $(C_{19}TT+C_{20}TT)/C_{23}TT$ 大于1.00, ETR小于0.6,表明B类原油形成于中盐、弱氧化-弱还原环境;Ts/(Ts+Tm)大于0.50,成熟度相对偏高;O/C₃₀H平均值为0.13, $C_{27}-C_{28}-C_{29}\alpha\alpha\alpha 20R$ 甾烷显示出 C_{29} 甾烷> C_{27} 甾烷的“V”型分布,表明陆生植物对有机质的贡献大于低等水生生物。上述特征表明B类原油为沙三段烃源岩的端元油。C类原油主峰碳数为 $nC_{17}-nC_{21}$, Pr/Ph分布在0.96~1.56, $(C_{19}TT+C_{20}TT)/C_{23}TT$ 分布在0.74~1.28, ETR小于0.6, Ts/(Ts+Tm)处在0.46~0.73, O/C₃₀H值分布在0.04~0.13, $C_{27}-C_{28}-C_{29}\alpha\alpha\alpha 20R$ 甾烷显示出不对称的“V”型分布;表明C类原油地球化学特征受沙三段和沙一段烃源岩相对供烃

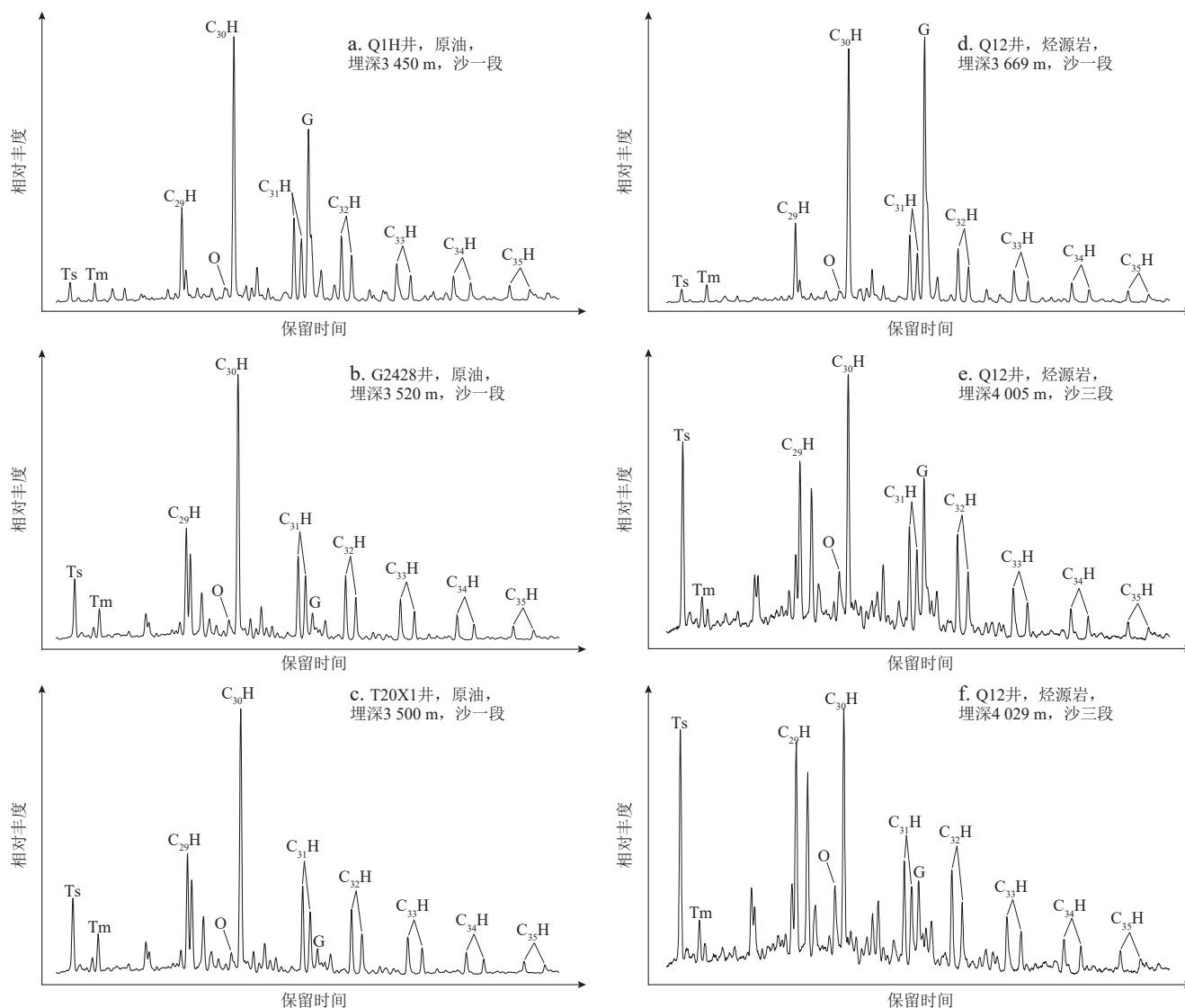
图7 黄骅坳陷原油和烃源岩五环三萜烷分布气相色谱-质谱(m/z 191)

Fig. 7 Distribution of pentacyclic triterpenoids in crude oil and source rocks from the Huanghua Depression

[m/z 为质荷比。Ts为 $18\alpha(\text{H})$ - C_{27} 三降藿烷;Tm为 $17\alpha(\text{H})$ - C_{27} 三降藿烷; C_{29}H 为 $17\alpha(\text{H})$, $21\beta(\text{H})$ - C_{29} 降藿烷;O为 $18\alpha(\text{H})$ -奥利烷;G为伽马蜡烷; C_{30}H - C_{35}H 为 $17\alpha(\text{H})$, $21\beta(\text{H})$ - C_{30} - C_{35} 藿烷。]

量影响。因此,C类原油为沙一段和沙三段烃源岩的混源油。

5 有效烃源岩成藏贡献

5.1 混源油藏充注比例定量模型

本文建立一种基于数理统计的多参数混源油藏充注比例定量模型,其原理是在端元油确定的基础上,综合有机质来源、沉积环境和成熟度三方面多元参数,采用主成分分析将多元参数转化为综合参数,最终基于物质守恒原理定量计算原油混源比例。采用4.5节优选的参数进行主成分分析(表2),原始数据的KMO检

验值和 Bartlett's 球状检验值分别为 0.65 和 0,表明选取的数据在一定程度上相互独立,用来做主成分分析准确性较高。结果表明(表3),13个参数计算出9个特征值,其中前3个主要的特征值大于1(分别为9.28, 1.50和1.10),累计贡献率达91.36%,可以代表原始数据的信息。

基于特征值和特征向量(表3,表4),建立相应的特征方程[公式(1)—公式(3)]。 Y_1 , Y_2 和 Y_3 代表了13个参数共同特征。其中,主成分 Y_1 中13个参数的荷载绝对值处在0.22~0.30(表4),数值差别不大,因此 Y_1 为原油沉积环境、有机质来源和成熟度的综合方程;主成分 Y_2 的 $\text{Pr}/n\text{C}_{17}$, $\text{Ts}/(\text{Ts}+\text{Tm})$ 和 $\text{C}_{29}\text{Ts}/(\text{C}_{29}\text{Ts}+\text{C}_{29}\text{H})$ 具有较大的荷载绝对值(表4),因此, Y_2 表示原油的成熟

表 2 黄骅坳陷原油和烃源岩生物标志化合物特征参数

Table 2 Characteristic parameters of biomarkers of crude oil and source rocks from the Huanghua Depression

样品编号	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
G2428	0.75	1.37	0.30	0.22	0.09	1.15	0.68	0.42	0.39	0.34	0.11	0.02	0.76
B10826	0.59	1.21	0.35	0.28	0.09	0.85	0.58	0.33	0.26	0.40	0.12	0.40	0.73
N24H	0.76	1.32	0.29	0.23	0.09	1.20	0.67	0.43	0.45	0.37	0.09	0.28	0.75
G422	0.63	1.28	0.59	0.51	0.08	0.90	0.51	0.24	0.27	0.38	0.14	0.85	0.74
B10836	0.78	1.28	0.29	0.23	0.11	1.28	0.68	0.42	0.49	0.38	0.12	0.29	0.75
G108	0.64	1.33	0.35	0.26	0.09	0.93	0.65	0.38	0.29	0.31	0.11	0.36	0.74
T20X2	0.65	1.56	0.33	0.21	0.16	1.06	0.71	0.52	0.41	0.27	0.14	0.23	0.74
T20X1	1.00	1.33	0.27	0.20	0.13	1.74	0.68	0.44	0.74	0.38	0.11	0.27	0.76
T9X6	0.54	1.14	0.39	0.34	0.06	0.74	0.46	0.26	0.21	0.41	0.14	0.58	0.72
Q1H	0.33	0.58	0.44	0.79	0.04	0.37	0.54	0.25	0.05	0.76	0.67	0.95	0.62
G2322	0.54	0.96	0.29	0.30	0.09	0.74	0.73	0.42	0.20	0.47	0.13	0.57	0.77
Q12-1	0.43	0.57	0.38	0.71	0.04	0.51	0.43	0.21	0.08	0.74	1.42	1.25	0.62
Q12-2	0.44	0.61	0.44	0.87	0.08	0.49	0.42	0.22	0.04	0.75	0.44	0.88	0.61
Q12-3	0.79	1.48	0.30	0.23	0.34	1.39	0.89	0.71	0.60	0.42	0.91	0.21	0.77
Q12-4	0.80	1.27	0.29	0.24	0.43	1.42	0.92	0.74	0.61	0.38	0.45	0.18	0.77

注: A 为 $C_{20}/C_{23}TT$; B 为 Pr/Ph ; C 为 Pr/nC_{17} ; D 为 Ph/nC_{18} ; E 为 $O/C_{30}H$; F 为 $(C_{19}TT+C_{20}TT)/C_{23}TT$; G 为 $Ts/(Ts+Tm)$; H 为 $C_{29}Ts/C_{29}Ts+C_{29}H$; I 为 $C_{19}/C_{23}TT$; J 为 ETR ; K 为 $G/C_{30}H$; L 为 β -胡萝卜烷/ nC_{25} ; M 为孕甾烷/(孕甾烷+升孕甾烷); $C_{29}TS$ 为 $18\alpha(H)$, $21\beta(H)-C_{29}$ 降新藿烷; 其余符号说明见正文。

表 3 黄骅坳陷原油和烃源岩生物标志物特征参数主成分特征值及贡献率

Table 3 Eigenvalues and contribution rates of principal components for the biomarker characteristic parameters of crude oil and source rocks from the Huanghua Depression

主成分	特征值	贡献率/%	累积贡献率/%
Y_1	9.28	71.38	71.38
Y_2	1.50	11.50	82.89
Y_3	1.10	8.47	91.36
Y_4	0.58	4.47	95.83
Y_5	0.34	2.59	98.42
Y_6	0.16	1.20	99.62
Y_7	0.03	0.26	99.88
Y_8	0.01	0.09	99.97
Y_9	0	0.03	100.00

注: $Y_1—Y_9$ 为生物标志物特征参数各主成分。

ETR ; X_{11} 为 $G/C_{30}H$; X_{12} 为 β -胡萝卜烷/ nC_{25} ; X_{13} 为孕甾烷/(孕甾烷+升孕甾烷)。

研究表明,对于两套烃源岩供烃的混源油,地球化

学参数与混合端元油的比例呈线性关系^[2],并满足公式(5)和公式(6)的关系。将混源油和端元油的综合地球化学参数 Y 代入公式(5)和公式(6),即可计算烃源岩对混源油的贡献比例。如表 5 所示,沙一段烃源岩对混源油藏的贡献率为 22.73%~59.11%,沙三段烃源岩贡献率为 40.89%~77.27%。

$$C = aM + bN \quad (5)$$

$$a + b = 1 \quad (6)$$

式中: C 为混源油的地球化学参数,无量纲; a 为端元油 1 在混源油中的比例,小数; M 为端元油 1 的地球化学参数,无量纲; b 为端元油 2 在混源油中的比例,小数; N 为端元油 2 的地球化学参数,无量纲。

5.2 混源油配比实验

为了证明混源油藏充注比例定量模型的准确性,开展了人工实验室混油实验进行验证。如图 4 和图 5d 所示,所有的原油样品均达到成熟阶段,并且未受到生

表 4 黄骅坳陷原油和烃源岩生物标志物特征向量

Table 4 Eigenvectors of biomarkers for crude oil and source rocks from the Huanghua Depression

主成分	变量系数												
	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	X_8	X_9	X_{10}	X_{11}	X_{12}	X_{13}
Y_1	0.29	0.28	-0.22	-0.30	0.28	0.30	0.24	0.28	0.29	-0.26	0.29	-0.29	0.27
Y_2	0.22	0.28	0.51	0.04	-0.08	0.19	-0.48	-0.39	0.15	-0.27	0.21	0.16	0.14
Y_3	0.32	-0.33	-0.13	0.26	-0.09	0.36	0.01	-0.06	0.39	0.46	0.34	0.12	-0.27

注: X_1 为 $C_{20}/C_{23}TT$; X_2 为 Pr/Ph ; X_3 为 Pr/nC_{17} ; X_4 为 Ph/nC_{18} ; X_5 为 $O/C_{30}H$; X_6 为 $(C_{19}TT+C_{20}TT)/C_{23}TT$; X_7 为 $Ts/(Ts+Tm)$; X_8 为 $C_{29}Ts/(C_{29}Ts+C_{29}H)$; X_9 为 $C_{19}/C_{23}TT$; X_{10} 为 ETR ; X_{11} 为 $G/C_{30}H$; X_{12} 为 β -胡萝卜烷/ nC_{25} ; X_{13} 为孕甾烷/(孕甾烷+升孕甾烷); $C_{29}TS$ 为 $18\alpha(H)$, $21\beta(H)-C_{29}$ 降新藿烷; 其余符号说明见正文。

表 5 黄骅坳陷有效烃源岩贡献率综合评价

Table 5 Comprehensive evaluation of the contributions of effective source rocks in the Huanghua Depression

序号	原油样品编号	Y_1	Y_2	Y_3	Y	有效烃源岩贡献率/%	
						沙一段	沙三段
1	G2428	1.54	0.65	0.51	1.21	23.57	76.43
2	B10826	1.04	0.60	0.39	0.85	48.44	51.56
3	N24H	1.47	0.69	0.63	1.18	25.73	74.27
4	G422	0.82	0.93	0.50	0.74	56.04	43.96
5	B10836	1.52	0.71	0.73	1.23	22.73	77.27
6	G108	1.21	0.64	0.37	0.97	40.10	59.90
7	T20X2	1.52	0.65	0.36	1.19	25.07	74.93
8	T20X1	1.90	0.92	0.63	1.56	0	100.00
9	T9X6	0.82	0.67	0.37	0.69	59.11	40.89
10	Q1H	0.01	0.28	0.34	0.09	100.00	0
11	G2322	0.90	0.36	0.43	0.72	57.14	42.86

注: Y_1 , Y_2 和 Y_3 为特征值大于 1, 累计贡献率大于 90 % 的主成分; Y 为综合参数。

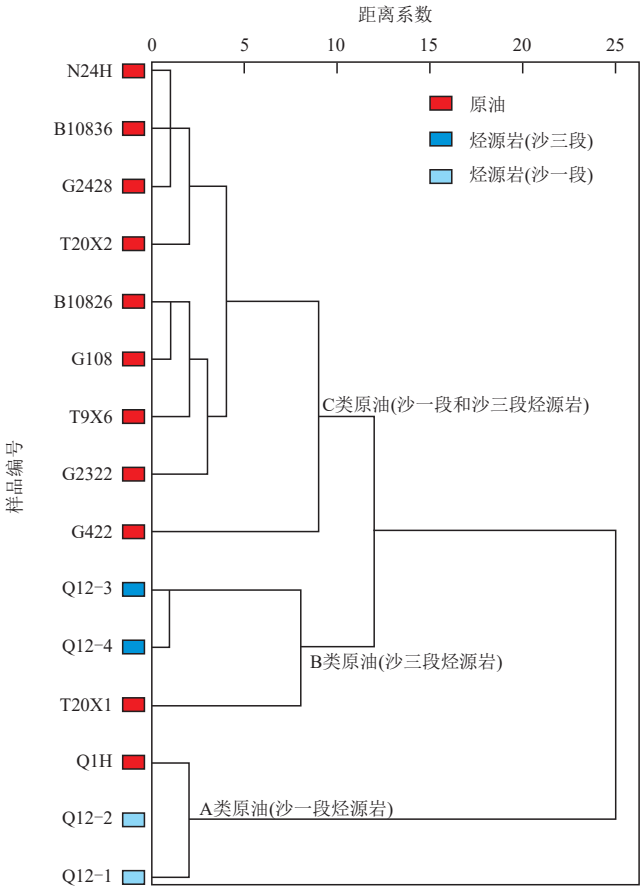


图 9 黄骅坳陷原油和烃源岩聚类分析结果

Fig. 9 Cluster analysis results of crude oil and source rocks from the Huanghua Depression

物降解作用影响,表明原油还保存烃源岩的信息,混合实验结果准确性高。根据 4.5 节的研究结果,A 类原油和 B 类原油分别由沙一段和沙三段烃源岩单独供烃,为两套烃源岩的端元油。因此,对 A 类和 B 类原油

开展人工实验室混油实验,观察不同混合比例原油的地球化学特征。

如图 10 所示,在 TIC 谱图中,Pr/Ph 随着 A 类原油混合比例的降低呈现减小的趋势,而 Pr/nC₁₇和 Ph/nC₁₈呈现增大的趋势。当原油混合比例 A/B = 4/6 时,Pr/Ph 近似等于 1。在 m/z 217 谱图中,C₂₇-C₂₈-C₂₉ααα20R 甾烷不随混合比例的变化而改变,所有混合比例的原油均呈现出 C₂₉甾烷 > C₂₇甾烷的“V”型分布,与 A 类原油的形态保持一致。在 C₁₉—C₂₄TT 三环萜烷系列中,随着 A 类原油比例的减小,C₂₁TT 的相对含量逐渐减少,C₂₃TT 的相对含量逐渐增加;并且当 A/B > 6/4 时,C₂₁TT 为主要同系物,谱图呈现先升后降的趋势;当 A/B < 6/4 时,C₂₃TT 的相对含量最多,谱图呈现上升的趋势。此外,随着 A/B 值的降低,Ts 和 Tm 的相对含量呈现出此消彼长的变化趋势,伽马蜡烷(G)的相对含量则不断增加。

基于上述分析,绘制了生物标志物比率的散点图,以观察它们在不同混合比例下的变化(图 11)。可以发现,Pr/Ph 和 G/C₃₀H 参数表现为非线性变化特征,而 (C₁₉TT+C₂₀TT)/C₂₃TT 三环萜烷和 Ts/(Ts+Tm)随混合比例的变化呈线性变化特征。研究表明,随不同混合比例呈线性变化的生物标志物参数在计算混源比例时准确性更高^[7]。此外,G2322 等井的 Ts/(Ts+Tm) 值大于 0.68(表 2),超出了不同混合比例对应的区间,表明这些油藏的形成时间早于端元油藏的形成时间。因此,选用 (C₁₉TT+C₂₀TT)/C₂₃TT 三环萜烷参数作为计算混源比例的指标。此外,还存在其他参数随混合比例呈一定的比例关系,但它们的线性关系不强,故不再赘述。

如表 6 所示,混源油藏充注比例计算结果与人工

表 6 黄骅坳陷沙河街组原油混源比例计算

Table 6 Calculated mixing ratios of crude oil from different sources in the Huanghua Depression

井号	Y	计算混源比例%		$(C_{19}TT+C_{20}TT)/C_{23}TT$	实验室混源比例%		误差%
		沙一段	沙三段		沙一段	沙三段	
G2428	1. 61	23. 57	76. 43	1. 15	23. 23	76. 77	0. 44
B10826	1. 15	48. 44	51. 56	0. 85	49. 17	50. 83	1. 44
N24H	1. 67	25. 73	74. 27	1. 20	18. 33	81. 67	9. 07
G422	1. 31	56. 04	43. 96	0. 90	52. 14	47. 86	8. 15
B10836	1. 78	22. 73	77. 27	1. 28	14. 20	85. 80	9. 94
G108	1. 25	40. 10	59. 90	0. 93	42. 49	57. 51	4. 15
T20X2	1. 46	25. 07	74. 93	1. 06	30. 77	69. 23	8. 23
T9X6	0. 98	59. 11	40. 89	0. 74	58. 25	41. 75	2. 07
G2322	1. 05	57. 14	42. 86	0. 74	58. 72	41. 28	3. 83

注: C₁₉TT 为 C₁₉三环萜烷; C₂₀TT 为 C₂₀三环萜烷; C₂₃TT 为 C₂₃三环萜烷。

6 结论

1) 黄骅坳陷沙三段和沙一段烃源岩质量中等-好,主要干酪根类型分别为Ⅱ₂型和Ⅱ₁型,均达到成熟阶段。其中,沙三段形成于弱氧化-弱还原环境,有机质为低等水生生物和陆生植物混合输入,但陆生植物贡献更大;平面上,多个次洼呈“坨状”分布。沙一段沉积于还原环境,有机质源于低等水生生物和陆生植物,但低等水生生物贡献更大;平面上,沙一段表现出“歧口主凹中心厚,向边缘斜坡带逐渐减薄”的趋势。

2) 沙一段原油为成熟原油,可以分为 3 种类型。A 类原油由沙一段烃源岩单独供烃,形成于高盐、还原环境,低等水生生物对有机质的贡献大于陆生植物。B 类原油来自沙三段烃源岩,形成于中盐、弱氧化-弱还原环境,陆生植物对有机质的贡献大于低等水生生物。C 类原油由沙三段和沙一段烃源岩共同供烃,其地球化学特征取决于两套烃源岩的相对贡献。

3) 混源油藏充注比例定量模型表明,沙一段烃源岩对 C 类原油的贡献率为 22. 73 % ~ 59. 11 %,沙三段为 40. 89 % ~ 77. 27 %;通过人工实验室混油实验验证,预测误差在 0. 44 % ~ 9. 94 %,平均值为 5. 26 %,说明模型具有较高的准确性和较强的适用性。

参 考 文 献

[1] 张敏,王东良,朱翠山,等. 冀中坳陷苏桥-文安油气田混源油定量识别模式研究(一): 原油成因分类及地球化学特征[J]. 天然气地球科学, 2004, 15(2): 115-119.
ZHANG Min, WANG Dongliang, ZHU Cuishan, et al. Study on quantitative identification model of mixed oils from Suqiao-Wenan area in Jizhong Depression part I: Genetic-types and geochemical characteristics of crude oils[J]. Natural Gas Geoscience, 2004,

15(2): 115-119.
[2] 陈建平,邓春萍,梁狄刚,等. 叠合盆地多烃源层混源油定量判析——以准噶尔盆地东部彩南油田为例[J]. 地质学报, 2004, 78(2): 279-288.
CHEN Jianping, DENG Chunping, LIANG Digang, et al. Quantification of mixed oil derived from multiple source rocks: A typical case study of the Cainan Oilfield in the east Junggar Basin, northwest China [J]. Acta Geologica Sinica, 2004, 78 (2) : 279-288.
[3] 李素梅,庞雄奇,万中华. 南堡凹陷混源油分布与主力烃源岩识别[J]. 地球科学, 2011, 36(6): 1064-1072.
LI Sumei, PANG Xiongqi, WAN Zhonghua. Mixed oil distribution and source rock discrimination of the Napu Depression, Bohai Bay Basin[J]. Earth Science, 2011, 36(6): 1064-1072.
[4] 常象春,韩作振,鄢程鹏. 东营凹陷南斜坡沙四段混源油地球化学与成藏特征[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2012, 42 (3): 672-680.
CHANG Xiangchun, HAN Zuozhen, YAN Chengpeng. Geochemistry and accumulation characteristics of Es₄ mixed oils in the south slope of Dongying Sag [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2012, 42(3): 672-680.
[5] PETERS K E, SCOTT RAMOS L, ZUMBERGE J E, et al. Deconvoluting mixed crude oil in Prudhoe Bay Field, North Slope, Alaska[J]. Organic Geochemistry, 2008, 39(6): 623-645.
[6] LI Sumei, AMRANI A, PANG Xiongqi, et al. Origin and quantitative source assessment of deep oils in the Tazhong Uplift, Tarim Basin[J]. Organic Geochemistry, 2015, 78: 1-22.
[7] 陈哲龙. 环玛湖凹陷三叠系百口泉组油藏混源特征及成藏机理[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2016.
CHEN Zhelong. The mixed-sources characteristics and mechanism of oil accumulation in Triassic Baikouquan Formation from Circum-Mahu Depression [D]. Beijing: China University of Petroleum (Beijing), 2016.
[8] 傅宁,朱雷. 珠一坳陷惠州西凹混源油研究[J]. 中国石油勘探, 2007, 12(2): 20-26.
FU Ning, ZHU Lei. Research on mixed oil in western Huizhou Sag of Zhu I Depression[J]. China Petroleum Exploration, 2007,

- 12(2): 20–26.
- [9] AROURI K R, MCKIRDY D M. The behaviour of aromatic hydrocarbons in artificial mixtures of Permian and Jurassic end-member oils: Application to in-reservoir mixing in the Eromanga Basin, Australia [J]. *Organic Geochemistry*, 2005, 36 (1): 105–115.
- [10] 王铁冠, 王春江, 何发岐, 等. 塔河油田奥陶系油藏两期成藏原油充注比率测算方法[J]. *石油实验地质*, 2004, 26(1): 74–79.
- WANG Tieguan, WANG Chunjiang, HE Faqi, et al. Determination of double filling ratio of mixed crude oils in the Ordovician oil reservoir, Tahe Oilfield [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2004, 26(1): 74–79.
- [11] 王文军, 宋宁, 姜乃煌, 等. 未熟油与成熟油的混源实验、混源理论图版及其应用[J]. *石油勘探与开发*, 1999, 26(4): 34–37, 6.
- WANG Wenjun, SONG Ning, JIANG Naihuang, et al. The mixture laboratory experiment of immature oils and mature oils, making and using the mixture source theory plat and its application [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 1999, 26(4): 34–37, 6.
- [12] 梁宏斌, 张敏, 王东良, 等. 冀中坳陷苏桥-文安地区混源油定量识别模式研究——典型原油混合实验及混源油识别模式[J]. *沉积学报*, 2004, 22(4): 689–693.
- LIANG Hongbin, ZHANG Min, WANG Dongliang, et al. Quantitative identification model of mixed oils from Suqiao-Wenan area in Jidong Depression: mixed experiment of typical oils and identification model of mixed oils [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2004, 22(4): 689–693.
- [13] 陶国亮, 秦建中, 腾格尔, 等. 混源油定量判析方法研究新进展[J]. *石油实验地质*, 2010, 32(4): 377–381, 386.
- TAO Guoliang, QIN Jianzhong, TENGGER, et al. Advancements in quantifying mixed oils [J]. *Petroleum Geology and Experiment*, 2010, 32(4): 377–381, 386.
- [14] 王宁, 明承栋, 杨晨艺, 等. 白云凹陷东部深水混源油定量解析[J]. *山东科技大学学报(自然科学版)*, 2022, 41(6): 24–31.
- WANG Ning, MING Chengdong, YANG Chenyi, et al. Quantitative study on mixed source oil in deep water area of eastern Baiyun Sag [J]. *Journal of Shandong University of Science and Technology (Natural Science)*, 2022, 41(6): 24–31.
- [15] 蒋文龙, 阿布力米提·依明, 李卉, 等. 准噶尔盆地玛东斜坡区百口泉组-下乌尔禾组混源油地球化学特征及定量判识[J]. *地球化学*, 2021, 50(2): 185–198.
- JIANG Wenlong, ABLIMIT Imin, LI Hui, et al. Geochemical characteristics and identification of mixed crude oil of the Baikouquan Formation Lower Wuerhe Formation on the east slope of the Mahu Sag, Junggar Basin [J]. *Geochimica*, 2021, 50(2): 185–198.
- [16] 高阳东, 龙祖烈, 陈聪, 等. 珠江口盆地开平凹陷南部区域中深层原油地球化学特征及成因[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2024, 54(6): 1883–1895.
- GAO Yangdong, LONG Zulie, CHEN Cong, et al. Geochemical characteristics and genesis of middle and deep oil in southern region of Kaiping Sag, Pearl River Mouth Basin [J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2024, 54(6): 1883–1895.
- [17] 李浩, 徐怀民, 王千军, 等. 准东地区平地泉组微量元素地球化学特征及油气地质意义[J]. *断块油气田*, 2023, 30(2): 277–285.
- LI Hao, XU Huaimin, WANG Qianjun, et al. Geochemical characteristics and petroleum geological significance of trace elements of Pingdiqian Formation in eastern Junggar Basin [J]. *Fault-Block Oil and Gas Field*, 2023, 30(2): 277–285.
- [18] 刘孝锐, 路俊刚, 谭开俊, 等. 鄂尔多斯盆地西南部HQ地区长7段烃源岩地球化学特征与长8段原油来源分析[J]. *现代地质*, 2024, 38(5): 1306–1324.
- LIU Xiaorui, LU Jungang, TAN Kaijun, et al. Geochemical characteristics and oil source analysis of the Chang 7 and Chang 8 members in the HQ area, southwestern Ordos Basin [J]. *Geoscience*, 2024, 38(5): 1306–1324.
- [19] 朱必清, 陈世加, 白艳军, 等. 鄂尔多斯盆地甘泉地区延长组长8段原油地球化学特征及来源[J]. *现代地质*, 2022, 36(2): 742–754.
- ZHU Biqing, CHEN Shijia, BAI Yanjun, et al. Geochemical characteristics and source of crude oil in Chang 8 member of Yanchang Formation, Ganquan area, Ordos Basin [J]. *Geoscience*, 2022, 36(2): 742–754.
- [20] 马冬晨, 王丹, 贾星亮, 等. 塔里木盆地塔河油田原油地球化学特征的化学计量学分析及应用[J]. *天然气地球科学*, 2022, 33(11): 1848–1861.
- MA Dongchen, WANG Dan, JIA Xingliang, et al. Chemometric analysis and application research on geochemical characteristics of crude oil in Tahe Oilfield, Tarim Basin [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2022, 33(11): 1848–1861.
- [21] 赵贤正, 周立宏, 蒲秀刚, 等. 断陷湖盆斜坡区油气富集理论与勘探实践——以黄骅坳陷古近系为例[J]. *中国石油勘探*, 2017, 22(2): 13–24.
- ZHAO Xianzheng, ZHOU Lihong, PU Xiugang, et al. Hydrocarbon enrichment theory and exploration practice in the slope of fault lake basin—A case study of Paleogene in Huanghua Depression [J]. *China Petroleum Exploration*, 2017, 22 (2): 13–24.
- [22] 蒲秀刚, 吴永平, 周建生, 等. 歧口凹陷岩性地层油气藏特征及勘探潜力[J]. *石油学报*, 2007, 28(2): 35–39.
- PU Xiugang, WU Yongping, ZHOU Jiansheng, et al. Characteristics and exploration potential of lithologic-stratigraphic hydrocarbon reservoirs in Qikou Sag of Dagang Oilfield [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2007, 28(2): 35–39.
- [23] 赵贤正, 蒲秀刚, 姜文亚, 等. 黄骅坳陷古生界含油气系统勘探突破及其意义[J]. *石油勘探与开发*, 2019, 46(4): 621–632.
- ZHAO Xianzheng, PU Xiugang, JIANG Wenya, et al. An exploration breakthrough in Paleozoic petroleum system of

- Huanghua Depression in Dagang Oilfield and its significance[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2019, 46(4): 621-632.
- [24] 周立宏, 陈长伟, 崔宇, 等. 渤海湾盆地黄骅坳陷油气勘探新领域、新类型及资源潜力[J]. *石油学报*, 2023, 44(12): 2160-2178.
- ZHOU Lihong, CHEN Changwei, CUI Yu, et al. New fields, new types and resource potentials of oil-gas exploration in Huanghua depression of Bohai Bay Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2023, 44(12): 2160-2178.
- [25] 张永胜. 歧口凹陷古近系沙一段沉积环境及白云岩成因机理分析[D]. 长春: 吉林大学, 2017.
- ZHANG Yongsheng. Sedimentary environment and dolomite formation mechanism of Palaeogene Es¹ in Qikou Depression[D]. Changchun: Jilin University, 2017.
- [26] 于学敏, 何咏梅, 姜文亚, 等. 黄骅坳陷歧口凹陷古近系烃源岩主要生烃特点[J]. *天然气地球科学*, 2011, 22(6): 1001-1008.
- YU Xuemin, HE Yongmei, JIANG Wenya, et al. Hydrocarbon generation of Paleogene source rocks in Qikou Sag [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2011, 22(6): 1001-1008.
- [27] ZHANG Liuping, BAI Guoping, ZHAO Xianzheng, et al. Oil-source correlation in the slope of the Qikou Depression in the Bohai Bay Basin with discriminant analysis [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2019, 109: 641-657.
- [28] SONG Yu, ZHU Kai, SHI Qianru, et al. Two-step classification of highly mixed oil in the Qikou Sag (Bohai Bay Basin, China): Implications for origin, maturity, and biodegradation[J]. *Geoenergy Science and Engineering*, 2023, 221: 111273.
- [29] 孙肖, 魏真真, 王丙贤, 等. 歧口凹陷古近系原油地球化学特征及油源分析[J]. *科学技术与工程*, 2020, 20(12): 4671-4679.
- SUN Xiao, WEI Zhenzhen, WANG Bingxian, et al. Geochemistry and source analysis of oil from Paleogene in Qikou Sag [J]. *Science Technology and Engineering*, 2020, 20(12): 4671-4679.
- [30] 王艺帆. 歧口凹陷油气成藏的源控作用——以沙三段烃源岩为例[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2020.
- WANG Yifan. Source control of hydrocarbon accumulation in Qikou Sag-Taking the third member of Shahejie Formation as an example[D]. Beijing: China University of Petroleum (Beijing), 2020.
- [31] 侯贵廷, 钱祥麟, 蔡东升. 渤海湾盆地中、新生代构造演化研究[J]. *北京大学学报(自然科学版)*, 2001, 37(6): 845-851.
- HOU Guiting, QIAN Xianglin, CAI Dongsheng. The tectonic evolution of Bohai Basin in Mesozoic and Cenozoic time[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2001, 37(6): 845-851.
- [32] 胡见义, 徐树宝, 童晓光. 渤海湾盆地复式油气聚集区(带)的形成和分布[J]. *石油勘探与开发*, 1986, 13(1): 1-8.
- HU Jianyi, XU Shubao, TONG Xiaoguang. Formation and distribution of complex petroleum accumulation zones in Bohaiwan Basin [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 1986, 13(1): 1-8.
- [33] 米立军, 徐建永, 李威. 渤海海域页岩油资源潜力[J]. *石油与天然气地质*, 2023, 44(6): 1366-1377.
- MI Lijun, XU Jianyong, LI Wei. Shale oil resource potential in the Bohai Sea area[J]. *Oil & Gas Geology*, 2023, 44(6): 1366-1377.
- [34] 刘惠民, 李政, 包友书, 等. 渤海湾盆地济阳坳陷高产页岩油井BYP5页岩地质特征[J]. *石油与天然气地质*, 2023, 44(6): 1405-1417.
- LIU Huimin, LI Zheng, BAO Youshu, et al. Geology of shales in prolific shale-oil well BYP5 in the Jiyang Depression, Bohai Bay Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2023, 44(6): 1405-1417.
- [35] 王永诗, 巩建强, 陈冬霞, 等. 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[J]. *石油与天然气地质*, 2023, 44(5): 1159-1172.
- WANG Yongshi, GONG Jianqiang, CHEN Dongxia, et al. Phase evolution and accumulation mode of hydrocarbons in deep coarse-grained clastic reservoirs in the Yanjia area, Dongying Sag, Bohai Bay Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2023, 44(5): 1159-1172.
- [36] 李三忠, 索艳慧, 周立宏, 等. 华北克拉通内部的拉分盆地: 渤海湾盆地黄骅坳陷结构构造与演化[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2011, 41(5): 1362-1379.
- LI Sanzhong, SUO Yanhui, ZHOU Lihong, et al. Pull-apart basins within the North China craton: Structural pattern and evolution of Huanghua Depression in Bohai Bay Basin[J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2011, 41(5): 1362-1379.
- [37] 吴永平, 付立新, 杨池银, 等. 黄骅坳陷中生代构造演化对潜山油气成藏的影响[J]. *石油学报*, 2002, 23(2): 16-21.
- WU Yongping, FU Lixin, YANG Chiyin, et al. Effect of Mesozoic tectonic evolution on hydrocarbon accumulation in buried hills in Huanghua Depression [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2002, 23(2): 16-21.
- [38] 任建业, 廖前进, 卢刚臣, 等. 黄骅坳陷构造变形格局与演化过程分析[J]. *大地构造与成矿学*, 2010, 34(4): 461-472.
- REN Jianye, LIAO Qianjin, LU Gangchen, et al. Deformation framework and evolution of the Huanghua Depression, Bohai gulf [J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 2010, 34(4): 461-472.
- [39] 陈昌, 邱楠生, 高荣锦, 等. 渤海湾盆地辽河坳陷西部冷家——雷家地区中-深层超压成因及其对油气成藏的影响[J]. *石油与天然气地质*, 2024, 45(1): 130-141.
- CHEN Chang, QIU Nansheng, GAO Rongjin, et al. Overpressure in moderately deep to deep strata in the Lengjia-Leijia area, western Liaohe Depression, Bohai Bay Basin: Origin and effects on hydrocarbon accumulation[J]. *Oil & Gas Geology*, 2024, 45(1): 130-141.
- [40] 严德天, 王华, 肖敦清, 等. 黄骅坳陷中部沙三段沉积体系分析[J]. *石油勘探与开发*, 2007, 34(3): 328-334.
- YAN Detian, WANG Hua, XIAO Dunqing, et al. Sedimentary systems of the third member of Shahejie Formation, central Huanghua Depression[J]. *Petroleum Exploration and Development*,

- 2007, 34(3): 328-334.
- [41] 韩载华, 刘华, 赵兰全, 等. 渤海湾盆地临南洼陷古近系沙河街组源-储组合类型与致密(低渗)砂岩油差异富集模式[J]. 石油与天然气地质, 2024, 45(3): 722-738.
- HAN Zaihua, LIU Hua, ZHAO Lanquan, et al. Source rock-reservoir assemblage types and differential oil enrichment model in tight (low-permeability) sandstone reservoirs in the Paleocene Shahejie Formation in the Linnan sub-sag, Bohai Bay Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2024, 45(3): 722-738.
- [42] 宋鹏, 吴胜和, 朱文春, 等. 黄骅坳陷唐家河油田古近系沙河街组沙一段下部储层质量研究[J]. 古地理学报, 2005, 7(2): 275-282.
- SONG Kun, WU Shenghe, ZHU Wenchun, et al. Reservoir quality of the lower part of Member 1 of Shahejie Formation of Paleogene in Tangjiahe Oilfield, Huanghua Depression [J]. Journal of Palaeogeography (Chinese Edition), 2005, 7(2): 275-282.
- [43] 刘惠民, 包友书, 黎茂稳, 等. 页岩油富集可动性地球化学评价参数探讨——以威利斯顿盆地 Bakken 组和渤海湾盆地济阳坳陷古近系沙河街组页岩为例[J]. 石油与天然气地质, 2024, 45(3): 622-636.
- LIU Huimin, BAO Youshu, LI Maowen, et al. Geochemical parameters for evaluating shale oil enrichment and mobility: A case study of shales in the Bakken Formation, Williston Basin and the Shahejie Formation, Jiyang Depression [J]. Oil & Gas Geology, 2024, 45(3): 622-636.
- [44] 韩国猛, 陈冬霞, 马建英, 等. 黄骅坳陷歧北斜坡油气成藏机制与成藏模式[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2021, 51(6): 1636-1653.
- HAN Guomeng, CHEN Dongxia, MA Jianying, et al. Hydrocarbon accumulation mechanism and accumulation model of Qibei slope in Huanghua Depression [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2021, 51(6): 1636-1653.
- [45] 娄瑞, 孙永河, 张中巧. 渤海湾盆地渤南低凸起西段低角度正断层分段生长特征及其油气地质意义[J]. 石油与天然气地质, 2024, 45(3): 710-721.
- LOU Rui, SUN Yonghe, ZHANG Zhongqiao. Segmented growth of low-angle normal faults in the western Bonan swell, Bohai Bay Basin and its petroleum geological significance [J]. Oil & Gas Geology, 2024, 45(3): 710-721.
- [46] 赖洪飞, 李美俊, 刘计国, 等. 强制海退体系中烃源岩的类型与测井评价——以尼日尔 Termit 盆地为例[J]. 沉积学报, 2018, 36(2): 390-400.
- LAI Hongfei, LI Meijun, LIU Jiguo, et al. Source rock types and logging evaluation in forced regressive systems tract: Taking the Termit Basin (Niger) as an example [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2018, 36(2): 390-400.
- [47] 张晓丽, 段毅, 何金先, 等. 鄂尔多斯盆地华庆地区延长组下油层组原油地球化学特征及油源对比[J]. 天然气地球科学, 2011, 22(5): 866-873.
- ZHANG Xiaoli, DUAN Yi, HE Jinxian, et al. Geochemical characteristics of crude oil in lower part of Yanchang formation and correlation of oil source in Huaqing area of Ordos Basin [J]. Natural Gas Geoscience, 2011, 22(5): 866-873.
- [48] 梅玲, 张枝焕, 王旭东, 等. 渤海湾盆地南堡凹陷原油地球化学特征及油源对比[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2008, 32(6): 40-46.
- MEI Ling, ZHANG Zhihuan, WANG Xudong, et al. Geochemical characteristics of crude oil and oil-source correlation in Nanpu Sag, Bohai Bay Basin [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2008, 32(6): 40-46.
- [49] 蒋杨, 弓虎军, 蒲仁海. 鄂尔多斯盆地甘泉—富县地区延长组长9—长7段烃源岩地球化学特征及长8致密油源对比[J]. 沉积与特提斯地质, 2024, 44(3): 656-670.
- JIANG Yang, GONG Hujun, PU Renhai. Geochemical characteristics of source rocks in the Chang 9-Chang 7 members and their correlation with the tight oil sources of Chang 8 member in the Ganquan-Fuxian area, Ordos Basin [J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 2024, 44(3): 656-670.
- [50] 杨易卓, 黄志龙, 赵珍, 等. 羌塘盆地毕洛错地区古油藏地球化学特征与油源对比[J]. 地球科学, 2022, 47(5): 1834-1848.
- YANG Yizhuo, HUANG Zhilong, ZHAO Zhen, et al. Geochemical characteristics and oil source correlation of paleo-reservoirs in Biluocuo area, Qiangtang Basin [J]. Earth Science, 2022, 47(5): 1834-1848.
- [51] TAO Shizhen, WANG Chuanyuan, DU Jianguo, et al. Geochemical application of tricyclic and tetracyclic terpanes biomarkers in crude oils of NW China [J]. Marine and Petroleum Geology, 2015, 67: 460-467.
- [52] 彭光荣, 郭婧, 姜福杰, 等. 珠江口盆地开平凹陷烃源岩地球化学特征与油源对比[J]. 石油学报, 2023, 44(10): 1624-1636.
- PENG Guangrong, GUO Jing, JIANG Fujie, et al. Geochemical characteristics of source rocks and oil-source correlation in Kaiping Sag, Pearl River Mouth Basin [J]. Acta Petrolei Sinica, 2023, 44(10): 1624-1636.
- [53] 郭浩浩, 徐国盛, 黄晓波, 等. 渤东凹陷北部烃源岩地球化学特征与油源对比[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2022, 49(1): 48-60.
- GUO Xihao, XU Guosheng, HUANG Xiaobo, et al. Geochemical characteristics and oil-source correlation of source rocks in northern Bodong Sag, Bohai Bay, China [J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 2022, 49(1): 48-60.
- [54] 师良, 范柏江, 李忠厚, 等. 鄂尔多斯盆地中部三叠系延长组长7段烃组分的运移分异作用[J]. 石油与天然气地质, 2024, 45(1): 157-168.
- SHI Liang, FAN Bojiang, LI Zhonghou, et al. Migration differentiation of hydrocarbon components in the 7th member of the Triassic Yanchang Formation, central Ordos Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2024, 45(1): 157-168.