

现代地质

Geoscience

ISSN 1000-8527, CN 11-2035/P

《现代地质》网络首发论文

题目：准噶尔盆地莫西庄地区侏罗系三工河组原油芳烃地球化学特征及油源对比
作者：曲彦胜，潘志强，何大祥，钟宁宁，牛花朋，杨梅华，韩立国
DOI：10.19657/j.geoscience.1000-8527.2025.002
网络首发日期：2025-01-08
引用格式：曲彦胜，潘志强，何大祥，钟宁宁，牛花朋，杨梅华，韩立国. 准噶尔盆地
莫西庄地区侏罗系三工河组原油芳烃地球化学特征及油源对比[J/OL]. 现代地
质. <https://doi.org/10.19657/j.geoscience.1000-8527.2025.002>



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。

DOI:10.19657/j.geoscience.1000-8527.2025.002

准噶尔盆地莫西庄地区侏罗系三工河组

原油芳烃地球化学特征及油源对比

曲彦胜^{1,2}, 潘志强³, 何大祥^{3*}, 钟宁宁¹, 牛花朋¹, 杨梅华², 韩立国²

(1.中国石油大学(北京)地球科学学院,北京102249,2.中国石化胜利油田分公司勘探开发研究院,山东东营257000,3.油气资源与勘探技术教育部重点实验室(长江大学),湖北武汉430100)

摘要: 本次研究主要选取准噶尔盆地莫西庄地区侏罗系三工河组原油样品,对其进行地球化学实验分析,使用气相色谱-质谱技术,分析莫西庄地区三工河组原油样品芳烃化合物地球化学特征,结合正构烷烃碳、氢同位素,判断其有机质来源、成熟度及沉积环境。结果表明:莫西庄地区侏罗系三工河组原油以菲系列化合物占主要优势,䓛、芘、苯并芘化合物含量相对较为丰富,高等植物来源的化合物1,2,5-三甲基萘、联苯、蒽、芘等含量较少,结合单体烃氢同位素组成特征,指示其有机质是以低等水生生物为主要生源,有少许高等植物贡献;三芴系列化合物中占一定优势的芴反映三工河组原油沉积环境以淡水沉积为主,还原性较弱;MPI-1、F₁和F₂等成熟度参数均显示三工河组原油热演化程度较高,处于高成熟阶段;利用聚类分析方法,结合单体烃碳同位素及部分芳烃参数对比结果,指示三工河组原油与二叠系下乌尔禾组烃源岩亲缘关系较好。该结果可为莫西庄地区的油气资源勘探开发提供参考。

关键词: 准噶尔盆地; 莫西庄地区; 三工河组; 原油; 芳烃; 同位素; 油源对比

中图分类号: P618.1 文献标志码: A

Geochemical Characteristics of Aromatics in Crude Oil and Oil-Source

Correlation of the Jurassic Sangonghe Formation in Moxizhuang,

Junggar Basin

QU Yansheng^{1,2}, PAN Zhiqiang³, HE Daxiang³, ZHONG Ningning¹, NIU Huapeng¹, YANG Meihua²
HAN Liguo²

(1. College of Geosciences, China University of Petroleum, Beijing 102249, China;
2. Exploration and Development Research Institute of Shengli Oilfield, SINOPEC, Dongying, 257000;
3. China Key Laboratory of Exploration Technologies for Oil and Gas Resources (Yangtze University),
Ministry of Education, Wuhan 430100, Hubei, China)

Abstract: In this study, the crude oil samples of Jurassic Sangonghe Formation in Moxizhuang area were selected and analyzed by geochemical experiments. The geochemical characteristics of aromatic compounds in crude oil samples of Sangonghe Formation in Moxizhuang area were analyzed by gas chromatography-mass spectrometry. Combined with carbon and hydrogen isotopes of n-alkanes, the source, maturity and sedimentary environment of organic matter were determined. The results show that the crude oil of Jurassic Sangonghe Formation in Moxizhuang area is dominated by phenanthrene series compounds, and the contents of pyrene, benzopyrene compounds are relatively abundant. The contents of compounds 1,2,5-trimethylnaphthalene, biphenyl, anthracene and perylene derived from higher plants are less. Combined with the characteristics of hydrogen isotope composition of monomer hydrocarbons, it indicates that the organic matter is mainly derived from lower aquatic organisms, with a little contribution from higher plants. The dominant fluorene in the three fluorene series compounds reflects that the sedimentary environment of the crude oil in the Sangonghe Formation is dominated by freshwater deposition, and the reducibility is weak. The maturity parameters such as MPI-1, F₁ and F₂ all show that the thermal evolution degree of crude oil in Sangonghe Formation is high and it

基金项目:非常规油气省部共建协同创新中心(长江大学)开放基金(UOG2020-12);中石化重点攻关课题,洼陷带J-K油气富集规律及规模增储目标P21077-2。

作者简介:曲彦胜,男,博士研究生,1986年出生,主要从事石油地质学研究。Email: quyansheng@163.com。

通信作者:何大祥,男,副教授,1986年出生,主要从事油气地球化学研究。Email: hedaxiang127@163.com。

is in the high maturity stage. By using cluster analysis method, combined with the comparison results of monomer hydrocarbon carbon isotope and some aromatic hydrocarbon parameters, it is indicated that the crude oil of Sangonghe Formation has a good genetic relationship with the source rock of Permian Lower Wuerhe Formation. The results can provide reference for the exploration and development of oil and gas resources in Moxizhuang area.

Key words: Junggar Basin ; Moxizhuang area ; sangonghe group ; crude oil ; aromatics ; isotopes ; oil-source correlation

0 引 言

准噶尔盆地位于中国新疆维吾尔自治区西部，为典型的含油气盆地^[1]。资源评价结果显示，准噶尔盆地资源丰度均在 $4.5 \times 10^4 \text{ t/km}^2$ 以上，资源量为 $10.6 \times 10^8 \text{ t}$ ，常规及非常规石油天然气资源量为 $1.0 \times 10^{10} \text{ t}$ ，已探明油气资源约占总量的 1/4，剩余还未完全探明油气资源量丰富，约为 $5.5 \times 10^9 \text{ t}$ ，勘探潜力巨大。莫西庄地区位于准噶尔盆地盆 1 井西凹陷东南端（图 1），该地区的油气勘探自上世纪 70 年代开始，截至目前，莫西庄油田三级石油地质储量达 5335.43 万吨，展现了较大的勘探潜力。

前人研究认为莫西庄地区三工河组的原油主要来自于二叠系下乌尔禾组烃源岩，但针对原油地球化学特征的详细研究较少，同时，下乌尔禾组烃源岩整体处于高成熟阶段^[1-4]，饱和烃参数相对失真，而芳烃所指示成熟度范围比饱和烃更宽^[5-8]，对成熟度较高的烃源岩及原油样品指示效果更好。据前人研究，1,2,5—三甲基萘、联苯、蒽、菲等芳烃化合物可指示高等植物生源^[9, 10]，三芴系列的相对含量可指示烃源岩及原油样品的沉积环境^[11]，甲基菲指数也常用于成熟度研究^[12]。通过对研究区原油芳烃地球化学特征进行分析，可判断三工河组原油的原始母质来源，揭示其沉积环境及成熟度等相关信息。

在此次研究中，选取莫西庄地区三工河组原油样品，利用气相色谱-质谱对样品进行分析，研究莫西庄地区侏罗系三工河组原油芳烃地球化学特征，结合单体烃氢同位素特征，分析其有机质来源、沉积环境及热演化程度，利用芳烃化合物及单体烃碳同位素特征，判断其油气来源，可以为准中地区油源对比及油气勘探开发提供参考。

1 区域地质概况

准噶尔盆地地处中亚腹地，隶属于新疆维吾尔自治区，在构造位置上被西伯利亚板块、哈萨克斯坦板块、塔里木板块所夹持，总体形状为三角形，东西长、南北窄，在经历裂陷、坳陷和收缩三个阶段后形成大型叠合盆地^[13, 14]。准噶尔盆地腹部地区是“一凹两隆”的地质构造格局^[15-17]（图 1（a））。该区块是一个多级构造、多套油气藏的复杂构造单元，含有较为丰富的石油和天然气资源。构造上属于盆 1 井西凹陷东南端与莫索湾凸起结合部，位于车莫古隆起北翼^[18, 19]（图 1（b））。总体来说，准噶尔盆地腹部地区呈北高南低的地质构造格局^[16]。在二叠系

隆起与凹陷的交界处,如莫西庄,征沙村,沙窝地等,发育较小规模的背斜圈闭群,圈闭幅度较小^[20]。在地质历史时期中,盆1井西凹陷与昌吉凹陷曾发生过油气运移现象,而腹部地区恰好位于其有利的油气运移指向上,因此有良好的油气源条件,经研究发现,莫西庄、沙窝地和征沙村三地区均发现过良好的油气源^[16]。

莫西庄地区地层发育齐全,二叠系和侏罗系是莫西庄地区主要的含油气层系,其中侏罗系是本文研究的目的层,自下而上包括八道湾组、三工河组、西山窑组、头屯河组,齐古组,其中三工河组主要以灰色、深灰色泥岩、泥质粉砂岩及泥灰岩为主,与砂岩互层^[21](图1(c))。

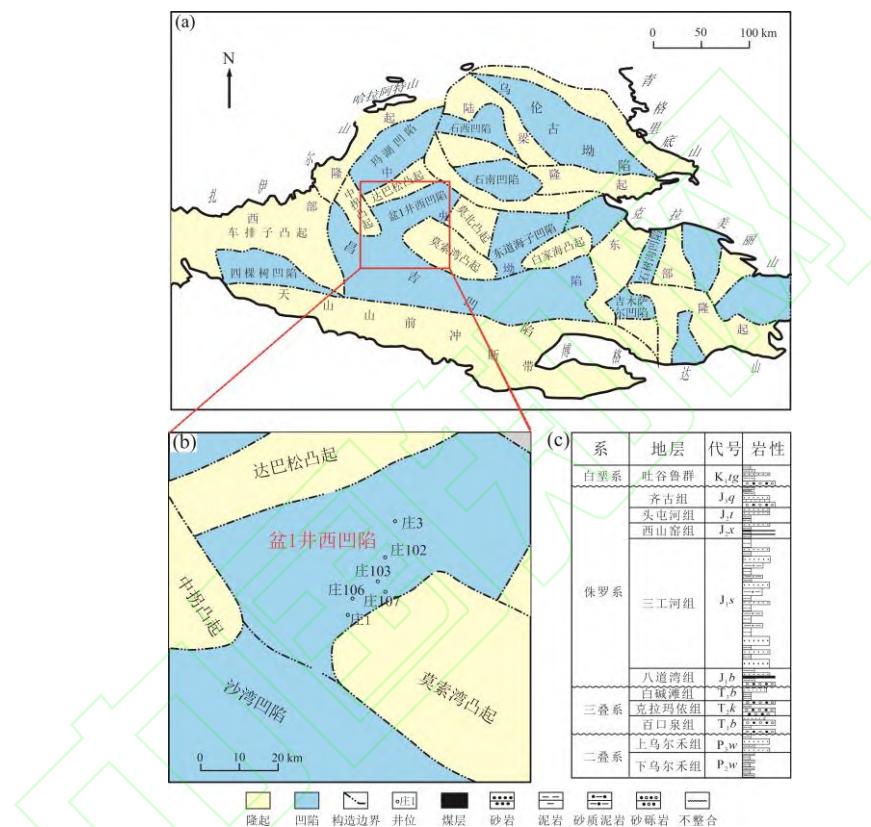


图1 莫西庄地区区域地质及地层岩性图

(a) 准噶尔盆地构造单元; (b) 莫西庄地区构造单元; (c) 莫西庄地区侏罗系地层岩性

Fig.1 Regional geology and stratigraphic lithology map of Moxizhuang area

(a) Junggar basin tectonic unit; (b) structural unit of Moxizhuang area; (c) Jurassic strata lithology in Moxizhuang area

前人研究认为,莫西庄地区油气资源的主要贡献层位为二叠系下乌尔禾组(P_2w),同时也有侏罗系烃源岩的贡献(J_1b)^[1],因此本文以研究区下乌尔禾组和八道湾组烃源岩作为主要研究对象,判断莫西庄三工河组原油来源。下乌尔禾组和八道湾组烃源岩在盆1井西凹陷沉积厚度均达400 m以上,其中下乌尔禾组烃源岩总有机碳含量在0.09%~4.55%,平均为1.49%,为一套具有陆源输入、沉积水体较浅中等-好的高-过成熟烃源岩,侏罗系烃源岩总有机碳含量为0.07%~3.81%,为一套陆源输入少、沉积水体较浅的中等的高成熟烃源岩^[18]。

2 样品与实验

本文所研究原油样品采自莫西庄地区庄 1 井、庄 3 井、庄 102 井、庄 103 井、庄 106 井、庄 107 井，深度为 4072.0 m~4400.2 m。对样品使用正己烷过滤其中的沥青质，然后使用硅胶与氧化铝（体积比为 2:3）充填固相层析柱对其进行族组分分离，用正己烷与二氯甲烷（体积比为 7:3）混合溶液对层析柱中的样品进行冲洗，得到芳烃。之后，对所得芳烃样品进行 GC-MS 分析。

色谱-质谱分析：采用安捷伦 7890A-5973 气相色谱-质谱联用仪，样品入口温度为 300 °C，载气为氦气，流速为 1.0 ml/min，扫描范围为 50~550 AMU，检测方式为全扫描检测，电离能为 70 eV，选用美国 J & W. HP-5 (30 m×0.25 mm×0.25 μm) 石英弹性毛细柱。初始气相色谱柱箱温度为 50 °C，保持 1 min；然后，以 20 °C/min 的间隔将温度从 50 °C 升高到 100 °C。然后，以 3 °C/min 的间隔将温度从 100 °C 升高到 315 °C，保持 16 min。

单体烃碳同位素组成分析：采用 Elementar 7980GC-GC5-Precision 气相色谱-氧化系统-稳定同位素质谱仪。色谱柱 HP-5MS (30 m, 0.25 mm ID, film thick 0.25 μm)；进样温度为 300 °C，载气为 He，流速为 1.0 mL/min，不分流进样；程序升温：100 °C，保持 1 min，以 5 °C/min 升至 300 °C，保持 20 min。

单体烃氢同位素组成分析：采用 MAT253 稳定同位素气质质谱仪，以及外围设备 Flash HT 元素分析仪、GasBench-II 和 GC IsoLink。使用 HP-PLOT Q 毛细管色谱柱 (30 m×0.32 mm×20 μm)，柱温为 25 °C。载气为 He，柱头压力为 0.096 MPa。进样速率为每分钟 0.5 mL/min。

3 结果与讨论

3.1 原油芳烃分布特征

受沉积环境，原始母质来源及成熟度的影响，不同烃源岩及原油芳烃色谱图分布特征不同。一般来讲，芳烃色谱图主要含有 3 个峰群：萘系列、菲系列及芳甾类、萜类和其它稠环芳烃系列^[8]。

对研究区三工河组原油芳烃进行 GC-MS 分析，鉴定出多种芳烃化合物，主要包括菲系列 (m/z 178~m/z 234)、萘系列 (m/z 128~m/z 198)、芴系列 (m/z 166~m/z 194)、噻吩系列 (m/z 184~m/z 212)、呋喃系列 (m/z 168~m/z 196)、联苯系列 (m/z 154~m/z 196)、䓛系列 (m/z 202~m/z 252)、三芳甾烷系列 (m/z 231~m/z 245) (表 1, 图 2)。随着热演化程度的增加，低分子量的萘系列、菲系列化合物含量会逐渐增加^[22]，研究区三工河组原油萘系列、菲系列化合物总体占芳烃化合物含量的 65% 以上，指示其热演化程度较高。一般来说，在以高等植物为主要来源的有机质中，二苯并噻吩及联苯等系列化合物的含量相对较高^[23]，研究区原油样品中二苯并噻吩及联苯等系列化合物含量都相对较低，说明其有机质以高等植物为主要生源的

可能性不大。

表 1 研究区原油芳烃化合物相对含量 (%)

Tab. 1 The relative content of aromatic compounds in crude oil in the study area

井号	层位	a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	k	l	m	n	o	p
庄 1	J ₁ S	56.56	8.79	0.09	10.06	3.11	5.46	4.12	0.34	0.50	4.53	3.00	0.04	2.21	0.34	0.30	0.55
庄 3	J ₁ S	63.05	5.49	0.06	6.31	3.04	3.44	2.40	0.55	0.69	5.48	6.01	0.08	2.02	0.30	0.37	0.70
庄 102	J ₁ S	53.20	12.18	0.08	11.14	2.87	7.16	5.62	0.33	0.45	2.98	1.42	0.02	1.79	0.24	0.2	0.33
庄 103	J ₁ S	54.01	11.36	0.09	9.67	2.29	5.89	5.79	0.45	0.68	3.23	4.25	0.04	1.35	0.20	0.24	0.44
庄 106	J ₁ S	57.44	9.26	0.14	10.40	2.95	6.30	4.33	0.44	0.54	3.19	1.95	0.03	2.15	0.26	0.25	0.39
庄 107	J ₁ S	75.48	1.96	0.07	9.63	3.17	1.74	0.74	0.49	0.65	1.62	2.16	0.01	1.95	0.12	0.10	0.12

注: a.菲; b.萘; c.蒽; d.芴; e.二苯并噻吩; f.二苯并呋喃; g.联苯; h.䓛; i.苊; j.苊; k.三芳甾烷; l.苊; m.苯并芴; n.苯并蒽; o.苯并䓛; p.苊并苊。

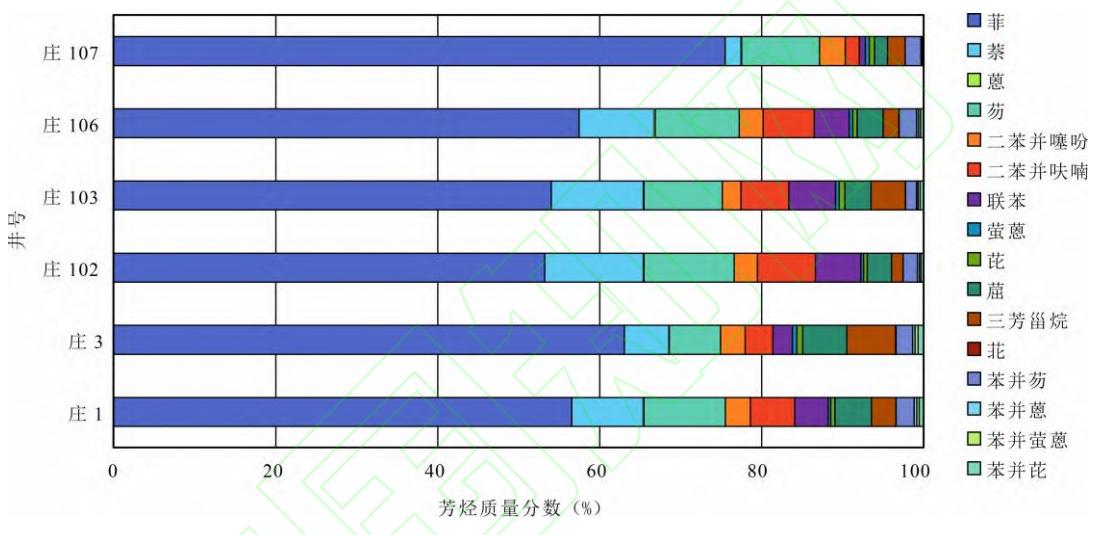


图 2 研究区原油芳烃宏观组成特征图

Fig.2 Macroscopic composition diagram of aromatic hydrocarbons in crude oil in the study area

3.2 萘系列

烷基萘的含量与沉积环境及有机质类型有关，一般可指示陆源有机质的输入^[24]。萘系列主要包括萘、甲基萘、二甲基萘、三甲基萘、四甲基萘和五甲基萘。研究区三工河组原油中萘系列化合物含量相对较低，介于 1.96%~12.18%，平均为 7.51%，其中四甲基萘及三甲基萘含量较高，萘及甲基萘含量较低，呈四甲基萘>三甲基萘>五甲基萘>二甲基萘的分布特征（表 2），总体上以四甲基萘和三甲基萘为主，1,2,5-三甲基萘和 1,2,5,6-四甲基萘化合物可以由五环三萜类经降解和重排转变而来，其前驱物一般来源于高等植物^[23]。由于研究区三工河组原油中萘系列化合物含量较低，说明其原始母质存在部分高等植物生源贡献。

3.3 菲系列

菲系列化合物是芳烃系列在有机质中分布最广泛的化合物之一^[25]，有机质成熟度、沉积环境以及有机质类型均可影响其分布^[8, 26]。本文所研究莫西庄地区三工河组原油样品菲系列化合物含量在芳烃组分中所占比例在 53.20%~75.48%，平均为 61.50%，主要包括菲、甲基菲、二

甲基菲、三甲基菲和蒽烯，其中主要以甲基菲和三甲基菲为主（表 3）。

表 2 研究区原油萘系列化合物相对含量（%）

Tab.2 The relative content of naphthalene series compounds in crude oil in the study area

井号	层位	萘	甲基萘	二甲基萘	三甲基萘	四甲基萘	五甲基萘
庄 1	J _{1s}	0.16	0.36	0.58	30.66	60.45	7.79
庄 3	J _{1s}	0.72	1.86	2.59	23.86	59.51	11.46
庄 102	J _{1s}	0.04	0.11	0.50	45.96	48.88	4.50
庄 103	J _{1s}	0.14	0.29	0.83	37.46	54.44	6.84
庄 106	J _{1s}	0.12	0.23	0.39	31.66	60.18	7.41
庄 107	J _{1s}	1.56	1.65	5.65	9.68	39.95	41.51

菲系列化合物与低等水生生物关系更为密切，而蒽烯一般作为高等植物输入的标志^[27]。研究区侏罗系三工河组原油菲系列化合物含量较为丰富，而蒽烯含量较少，只占菲系列化合物的 0.67%~1.29%，指示研究区侏罗系三工河组原油有机质来源主要为低等水生生物，存在部分高等植物生源贡献。

表 3 研究区原油菲系列化合物相对含量（%）

Tab. 3 Relative content of phenanthrene series compounds in crude oil in the study area

井号	层位	菲	甲基菲	二甲基菲	三甲基菲	蒽烯
庄 1	J _{1s}	8.52	30.08	37.15	23.25	1.00
庄 3	J _{1s}	6.21	27.50	39.33	25.67	1.29
庄 102	J _{1s}	13.83	34.42	34.15	16.93	0.67
庄 103	J _{1s}	12.33	31.19	33.65	21.92	0.91
庄 106	J _{1s}	12.48	33.26	35.20	18.21	0.84
庄 107	J _{1s}	3.83	30.70	41.13	23.33	1.00

一般常用甲基菲指数作为成熟度评价参数^[12]。莫西庄地区三工河组原油甲基菲指数相对偏高，MPI-1 介于 0.76~1.34，平均 0.95，MPI-2 介于 0.82~1.48，平均 1.04，结合 F₁ 与 F₂ 判别图示（图 4），说明研究区侏罗系三工河组原油有机质处于高成熟阶段，且庄 107 井 2-MP 含量相对较大，指示庄 107 井原油样品成熟度大于莫西庄其它地区。

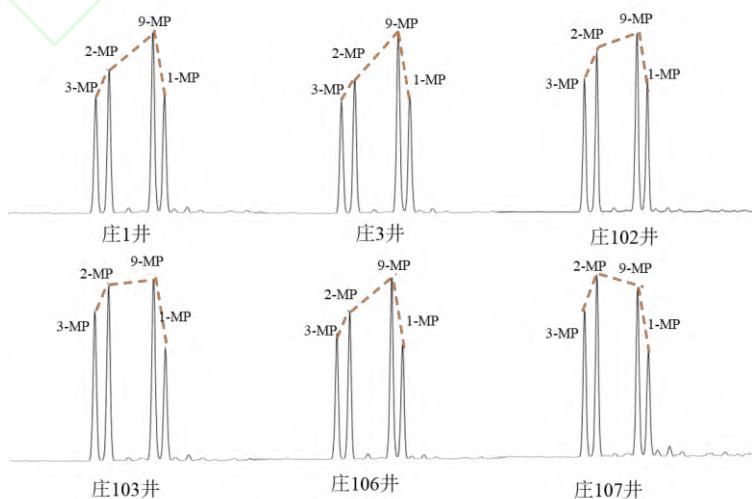


图 3 研究区原油甲基菲系列化合物质量色谱特征 (m/z=192)

Fig. 3 The mass chromatographic characteristics of methylphenanthrene series compounds in crude oil in the study area (m/z = 192)

表 4 研究区原油菲系列化合物相关参数

Tab. 4 Related parameters of phenanthrene series compounds in crude oil in the study area

井号	MPI-1	MPI-2	F ₁	F ₂	R _c (MPI)
庄 1	0.84	0.92	0.46	0.25	0.90
庄 3	0.87	0.96	0.45	0.25	0.92
庄 102	0.76	0.82	0.47	0.26	0.86
庄 103	0.88	0.95	0.52	0.28	0.93
庄 106	0.78	0.84	0.47	0.26	0.87
庄 107	1.34	1.48	0.53	0.29	1.21

注 : MPI-1=1.5×(3-MP+2-MP)/(P+9-MP+1-MP); MPI-2=3×(2-MP)/(P+1-MP+9MP); F₁=(3-MP+2-MP)/(1-MP+9-MP+3-MP+2-MP); F₂=(2-MP)/(1-MP+9MP+3MP+2MP); R_c (MPI) = MPI-1 × 0.6+0.4^[27]

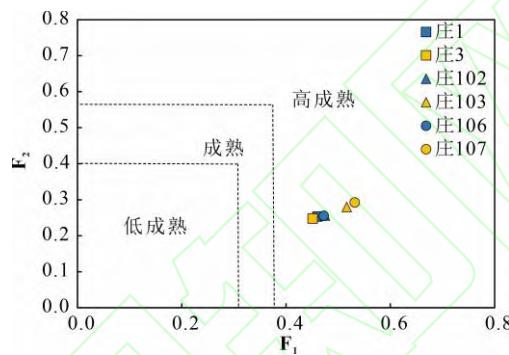


图 4 研究区原油甲基菲指数 F₁-F₂ 判别图 (图版据文献^[28])

Fig.4 The crude oil methylphenanthrene index F1-F2 discriminant diagram in the study area

3.4 三芳甾烷系列

三芳甾烷类化合物具有和甾烷类相似的碳架结构, 可由单芳甾烷深度受热后形成, 常被用来指示成熟度, 同时也可反映有机质母质来源^[8, 29, 30]。由于芳香烃具有一定生物毒性, 因此可抵抗生物降解, 其中三芳甾烷类化合物抗降解能力最强^[31]。一般来讲, 淡水沉积环境中 C₂₈TAS (C₂₈ 三芳甾烷) 含量相对较多, 而在咸水、微咸水环境中 C₂₆TAS (C₂₆ 三芳甾烷) 占有一定优势^[32]。研究区三工河组原油中三芳甾烷含量呈 C₂₈TAS >C₂₇TAS >C₂₆TAS 分布特征 (图 5), C₂₈TAS 含量占一定优势, 指示其主要以淡水沉积为主。

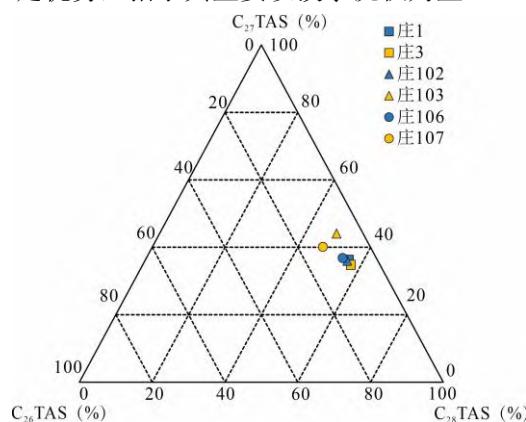


图 5 研究区组原油三芳甾烷 $C_{26}-C_{27}-C_{28}$ 含量三角图 (图版据文献^[33])

Fig.5 The content triangle diagram of triaryl sterane $C_{26}-C_{27}-C_{28}$ in crude oil of the study area

研究结果表明, 饱和烃中的甾烷有低等水生生物和高等植物两个母质来源, 而芳烃中的三芳甾烷只有低等水生生物一个母质来源^[25], 因此可根据三芳甾烷含量来判断化合物原始母质来源。研究区三工河组原油中三芳甾烷含量介于 1.42%~6.01%, 平均 2.96%, 指示其存在低等水生生物生源贡献。

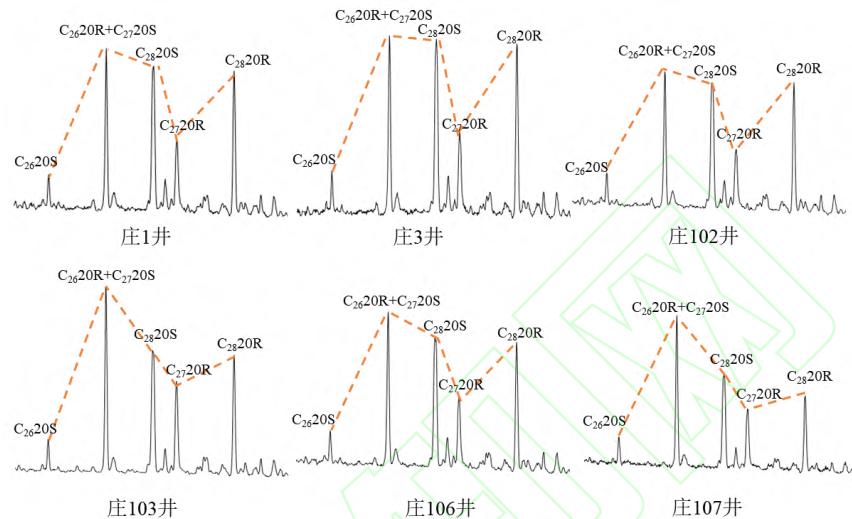


图 6 研究区原油三芳甾烷系列化合物质量色谱特征 ($m/z=231$)

Fig.6 Quality chromatographic characteristics of triaryl steroid series compounds in crude oil of the study area ($m/z = 231$)

3.5 三芴系列

三芴系列化合物包括芴 (FLs)、硫芴 (DBTs)、氧芴 (DBFs), 其可能具有相同的母质来源^[34], 三芴系列基本骨架五元环的 C-9 碳原子属于 α 碳原子, 其化学性质活泼, 在强还原环境中可能被硫取代形成硫芴, 正常还原环境中被氢饱和形成芴, 氧化环境中则会被氧取代形成氧芴^[34, 35]。三芴系列化合物的相对含量可作为指示沉积环境的重要指标, 海相原油中硫芴含量较高, 煤系原油中氧芴含量占有一定优势, 而芴则在陆相淡水-微咸水湖泊中含量相对较高^[36]。研究区三芴系列化合物中芴含量占据一定优势, 总体呈芴>氧芴>硫芴, 结合三芴系列相关图示 (图 7), 指示研究区沉积环境为弱还原环境, 属于淡水湖相沉积。

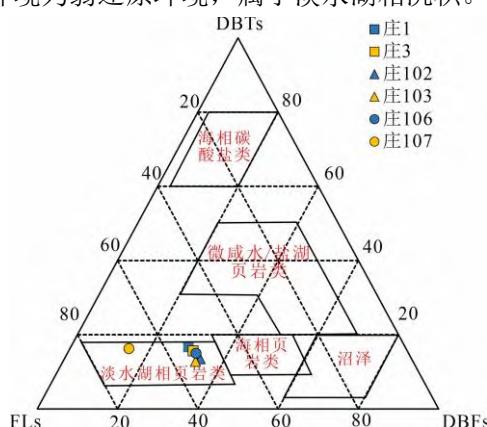


图 7 研究区原油三芴系列判别图 (图版据文献^[34])

Fig.7 Correlation diagram of crude oil trifluorene series in the study area

3.6 联苯系列

一般认为, 联苯系列化合物来源于高等植物中的木质素, 在以高等植物为主要生源的陆相原油中含量较高, 约占芳烃含量的 20%, 甚至在一些煤成油中可达 40%^[37, 38]。莫西庄地区侏罗系三工河组原油芳烃化合物中联苯含量介于 0.74%~5.79%, 平均 3.57%, 含量相对较低, 说明研究区存在高等植物生源贡献, 但以其为主要生源贡献的可能性不大。

3.7 其它多环芳烃

研究区三工河组原油样品中还检测到含量较少的其他多环芳烃, 如䓛、䓛、䓛、䓛并䓛、䓛蒽、䓛并䓛蒽等, 总体含量相对较少, 呈䓛>䓛>䓛并>蒽>并蒽>的分布特征, 一般认为䓛和并可能来源于藻类等低等水生生物^[18], 研究区三工河组原油中䓛系列化合物占芳烃的 1.35%~4.53%, 平均为 3.2%, 馏并占芳烃的 0.12%~0.70%, 平均为 0.38%, 与研究区代表高等植物生源的萘系列化合物含量成反比, 指示研究区有机质来源以低等水生生物为主。

一般来说, 蒽在煤系地层中含量相对较高, 而在湖相泥岩中含量较低, 因此, 我们可以将蒽/菲值作为有机质沉积环境的判识指标之一, 在沼泽相环境中蒽/菲值介于 0~0.38, 湖相环境中蒽/菲值介于 0~0.1^[39]。研究区三工河组原油蒽占芳烃的 0.06%~0.14%, 平均为 0.09%, 蒽/菲值介于 0.01~0.03, 平均为 0.02, 指示其沉积于湖相环境。

表 5 研究区原油其它多环芳烃相关参数

Tab. 5 Other polycyclic aromatic hydrocarbons related parameters of crude oil in the study area

井号	层位	3-甲基/1-甲基	并蒽/并	蒽/(蒽+)
庄 1	J _{1S}	5.18	0.54	0.41
庄 3	J _{1S}	4.96	0.53	0.44
庄 102	J _{1S}	5.45	0.61	0.42
庄 103	J _{1S}	6.51	0.56	0.40
庄 106	J _{1S}	4.30	0.64	0.45
庄 107	J _{1S}	7.76	0.86	0.43

苊由生物前驱物演化而成, 在成熟度较低的样品中含量较高, 其含量随着成熟度的升高而降低, 而

母质来源及合成途径之外, 氢同位素组成还与环境水有关^[41]。一般情况下, 非海相原油的 δD 为-250‰~ -140‰, 而海相原油的 δD 值分布较广, 为-160‰~ -50‰。除此之外, 氢同位素组成还与成熟度有关, 成熟度的变化可导致氢同位素组成发生 40%左右的增加, 且成熟度的增高会导致氢同位素曲线斜率的增加^[41, 42]。

莫西庄地区三工河组原油的单体烃氢同位素组成较轻, 分布在-185‰~ -145‰之间, 氢同位素随碳数增加均出现 D 富集的现象, 指示研究区原油为淡水湖相有机质输入。同位素曲线表现为“头轻脚重”的变化规律, 平均斜率为 1.58, 正偏规律明显 (图 8), 这种现象说明三工河组原油原始母质来源存在混合输入的特征。一般情况下, 低等水生生物会提供更多的低碳数正构烷烃, 而高等植物则会优先提供高碳数正构烷烃。研究区原油中不同碳数正构烷烃氢同位素组成的变化特征指示其原始母质主要来源于低等水生生物。

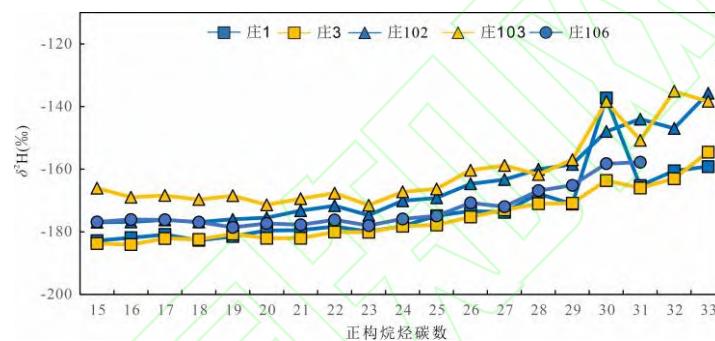


图 8 研究区原油正构烷烃单体氢同位素分布特征

Fig. 8 The distribution characteristics of hydrogen isotopes in n-alkanes of crude oil in the study area

3.9 单体烃碳同位素

单体烃碳同位素可以从分子水平反映原油母质的性质及其沉积环境, 从而为油源对比提供更直观的信息。原油单体烃碳同位素的分布形式主要取决于有机质的沉积环境和母质的来源^[43, 44, 45]。由于母质来源不同, 碳同位素值也不同。陆生高等植物比低等水生生物更富重碳同位素^[46, 47]。研究区单体烃碳同位素分布范围为-31.9‰~ -28.3‰ (图 9), 同位素组成较轻, 指示研究区有机质来源以低等水生生物为主, 且在 nC_{21} 前随碳数的增加负偏趋势明显, 与下乌尔禾组烃源岩具有较大相似性。

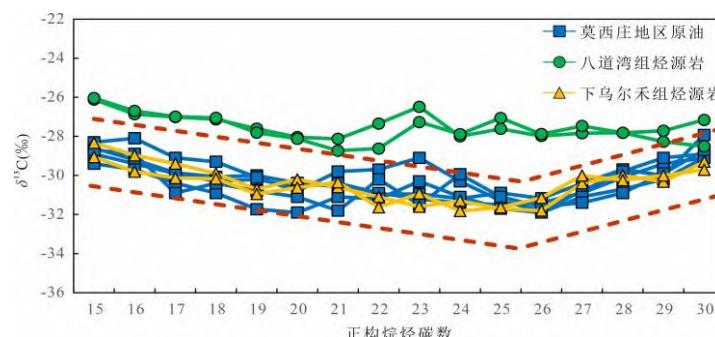


图 9 研究区烃源岩及原油正构烷烃单体碳同位素分布特征

Fig.9 The carbon isotope distribution characteristics of source rocks and crude oil n-alkanes in the study area

4 油源对比

油源对比的基本依据是根据特征相似即同源的原理, 即通过油气与源岩之间的亲缘关系(化学成分相似性、生物标志化合物的指纹特征以及比值等)来进行判断识别^[48, 43]。在油气运移成藏的过程中, 其族组分会因地质作用而发生改变, 但生物标志物结构稳定, 变化幅度较小, 因此可用生物标志物特征进行油源对比^[49-51]。

综合莫西庄地区原油芳烃地球化学特征及单体碳、氢同位素特征发现, 侏罗系三工河组原油具有: ①低分子量的菲系列为主导、甲基菲指数高; ②代表高等植物生源的蒈烯、二苯并噻吩、联苯等系列化合物的含量较少; ③三甲基萘、四甲基萘在芳烃化合物中占比低; ④C₂₈三芳甾烷占优势; ⑤单体碳同位素偏轻、单体氢同位素呈正偏规律明显等特征, 综合揭示莫西庄地区侏罗系三工河组原油具有高演化程度、低等水生生物来源为主特征, 供烃母质沉积于淡水弱还原环境。结合二叠系下乌尔禾组和侏罗系八道湾组烃源岩特征, 明确莫西庄地区原油与下乌尔禾组烃源岩更具相似性。

另外, 从甲基菲指数 F₁-F₂相关关系来看(图 10 (a)), 八道湾组烃源岩样品主要处于成熟阶段, 下乌尔禾组烃源岩样品主要处于高成熟阶段, 而莫西庄地区三工河组原油样品处于高成熟阶段, 结合蒈/ (蒈+芘) 与甲基蒈/ (甲基蒈+甲基芘) 相关关系(图 10 (b)), 指示研究区三工河组原油与下乌尔禾组烃源岩样品具有较好的亲缘性。

表 6 研究区烃源岩芳烃系列相关参数

Tab.6 Aromatic hydrocarbon series related parameters of source rocks in the study area

井号	层位	F ₁	F ₂	甲基蒈/ (甲基蒈+甲基芘)	蒈/ (蒈+芘)
沙 15-1	P ₂ w	0.48	0.27	0.32	0.38
沙 15-2	P ₂ w	0.55	0.30	0.34	0.37
沙 15-3	P ₂ w	0.55	0.29	0.36	0.41
沙 12-1	P ₂ w	0.59	0.30	0.33	0.43
沙 12-2	P ₂ w	0.53	0.33	0.17	0.43
沙 12-3	P ₂ w	0.58	0.33	0.21	0.40
庄 2-1	J ₁ b	0.37	0.25	0.43	0.26
庄 2-2	J ₁ b	0.36	0.20	0.53	0.25
庄 2-3	J ₁ b	0.38	0.23	0.52	0.28
庄 2-4	J ₁ b	0.35	0.26	0.49	0.25

聚类分析是划分多源原油成因类型的有效方法, 其关键在于选取有效的油源对比参数, 本次研究分别选取菲系列化合物、萘系列化合物、三芳系列化合物及其相关参数等上述多个指标对准噶尔盆地莫西庄地区下乌尔禾组、八道湾组烃源岩样品及三工河组原油样品开展聚类分析, 本次研究采用 SPSS 软件利用 Ward 法和 Euclidean 距离能有效地判断研究区原油与烃源岩之间

的亲缘性(图11),结果表明,研究区原油样品与下乌尔禾组烃源岩之间相关性较好,指示莫西庄地区三工河组原油主要来源于下乌尔禾组烃源岩。

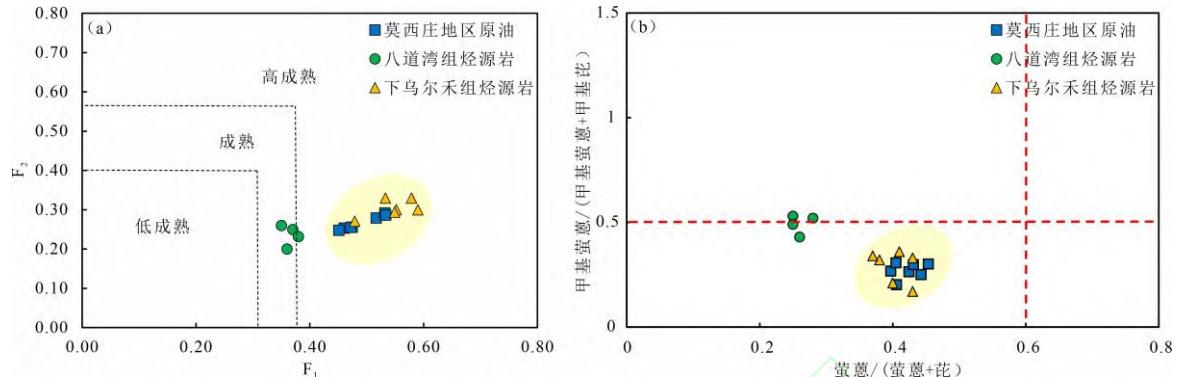


图10 研究区烃源岩及原油芳烃参数对比

(a) 甲基菲指数判别图; (b) 萤蒽系列判别图

Fig.10 Comparison of aromatic hydrocarbon parameters of source rock and crude oil in the study area

a . Methyl phenanthrene index discriminant diagram; b . Fluoranthene series discriminant diagram

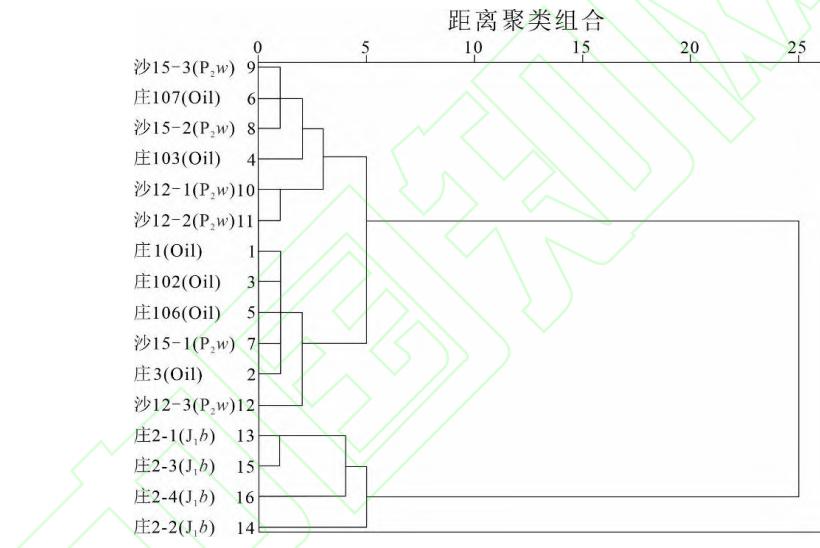


图11 研究区原油及烃源岩样品聚类分析

Fig. 11 Cluster analysis of crude oil and source rock samples in the study area

5 结 论

(1) 研究区侏罗系三工河组原油中低分子量的菲系列、萘系列化合物含量相对较高,说明其热演化程度较高,常用于表征成熟度的参数甲基菲指数偏高,指示莫西庄地区侏罗系三工河组原油处于高成熟阶段。

(2) 研究区侏罗系三工河组原油中碳同位素偏轻,代表高等植物生源的蒈烯、二苯并噻吩及联苯等系列化合物的含量相对较少,且以高等植物为前驱物的三甲基萘及四甲基萘含量在芳烃化合物中所占比例较少,以菲系列化合物为主导,结合单体烃氢同位素特征,说明莫西庄侏罗系三工河组原油有机质主要来源于低等水生生物,部分有机质可能来源于高等植物。

(3) 研究区侏罗系三工河组原油中三芳甾烷系列化合物中 C_{28} 三芳甾烷占一定优势,指示

研究区以淡水沉积为主,三芴系列化合物中芴含量占一定优势,说明莫西庄地区侏罗系三工河组原油主要处于弱还原环境,属于淡水湖相沉积。

(4) 基于芳烃参数及碳同位素对比,结合聚类分析,指示莫西庄地区三工河组原油与二叠系下乌尔禾组烃源岩具有较好的亲缘关系。

参考文献 (References):

- [1] LI B C, HE D X, LI M J, et al. Biomarkers and carbon isotope of monomer hydrocarbon in application for oil-source correlation and migration in the moxizhuang-yongjin block, Junggar Basin, NW China[J]. ACS Omega, 2022, 7(50): 47317-47329.
- [2] 王宏博, 马存飞, 曹铮, 等. 基于岩相的致密砂岩差异成岩作用及其储层物性响应: 以准噶尔盆地莫西庄地区下侏罗统三工河组为例[J]. 石油与天然气地质, 2023, 44(4): 976-992.
- [3] 郑丹. 准噶尔盆地莫西庄-永进地区油气成藏差异分析[J]. 石油地质与工程, 2022, 36(3): 33-39.
- [4] 孟蕾. 莫西庄油田三工河组二段砂岩储集层物性下限[J]. 新疆石油地质, 2020, 41(5): 557-564.
- [5] 刘传鹏. 准噶尔盆地莫西庄地区三工河组二段储层微观特征及有效储层控制因素[J]. 中国地质, 2013, 40(5): 1515-1522.
- [6] 李志明, 秦建中, 廖宗廷, 等. 准噶尔盆地莫西庄地区侏罗系三工河组二段储层特征[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2006, 36(5): 799-804.
- [7] 何生, 杨智, 何治亮, 等. 准噶尔盆地腹部超压顶面附近深层砂岩碳酸盐胶结作用和次生溶蚀孔隙形成机理[J]. 地球科学(中国地质大学报), 2009, 34(5): 759-768+798.
- [8] 唐友军, 郑磊, 李永飞, 等. 凌源-宁城盆地牛营子坳陷侏罗系海房沟组烃源岩芳烃地球化学特征及其地质意义[J]. 天然气地球科学, 2019, 30(3): 433-446.
- [9] SIMONEIT B R T. Diterpenoid compounds and other lipids in deep-sea sediments and their geochemical significance[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1977, 41(4): 463-476.
- [10] SIMONEIT B. Cyclic terpenoids of the geosphere[J]. Methods in Geochemistry and Geophysics, 1986, 24: 43-99.
- [11] 潘志清, 黄第藩, 林壬子. 盐湖相原油和生油岩中芳烃及硫化芳烃的分布特征[J]. 石油与天然气地质, 1988, 9(4): 370-378.
- [12] RADKE M, WELTE D H. The methylphenanthrene index (MPI): A maturity parameter based on aromatic hydrocarbons [M]//BJROYM. Advances in organic geochemistry 1981. Chichester: John Wiley and Sons Incorporation, 1983: 504-512
- [13] ZHAO J M, CHEN S Z, DENG G, et al. Basement structure and properties of the western Junggar Basin, China[J]. Journal of Earth Science, 2019, 30(2): 223-235.
- [14] 张立强, 李秀国. 准噶尔盆地南缘安集海河组砂岩碳酸盐胶结物特征[J]. 油气地质与采收率, 2011, 18(5): 6-8, 30.
- [15] 石好果. 准噶尔盆地腹部阜康深凹带侏罗系成藏规律[J]. 石油实验地质, 2017, 39(2): 238-246.
- [16] 赵洪, 罗晓容, 张立宽, 等. 准噶尔盆地中部1区块三工河组流体包裹体特征及对油气多期充注-调整过程的指示[J]. 天然气地球科学, 2015, 26(3): 466-476.
- [17] 丁文, 刘小明, 周胜, 等. 准噶尔盆地中部I区块沙窝地高精度三维地震资料采集技术应用[J]. 江汉石油学院学报, 2003(S2): 60-66.
- [18] 胡才志, 张立宽, 罗晓容, 等. 准噶尔盆地腹部莫西庄地区三工河组低孔渗砂岩储层成岩与孔隙演化研究[J]. 天然气地球科学, 2015, 26(12): 2254-2266.
- [19] 毕研斌, 高山林, 朱允辉, 等. 准噶尔盆地莫西庄油田成藏模式[J]. 石油与天然气地质, 2011, 32(3): 318-326.
- [20] 朱珍君, 李琦, 李剑, 等. 准噶尔盆地莫西庄-永进地区白垩系清水河组地貌演化及沉积响应[J]. 现代地质, 2022, 36(1): 105-117.
- [21] 马万云, 迪丽达尔·肉孜, 李际, 等. 准噶尔盆地南缘侏罗系烃源岩生烃特征[J]. 新疆石油地质, 2020, 41(1): 31-37.
- [22] 闫红星, 杨俊印, 姜文瑞, 等. 芳烃化合物在稠油火驱室内实验中的指示作用[J]. 石油实验地质, 2022, 44(5): 914-921.
- [23] 丁安娜, 惠荣耀, 张中宁. 准噶尔盆地白家海凸起湖相原油与烃源岩芳烃地球化学特征[J]. 石油勘探与开发, 1997, 24(3): 15-20+97.
- [24] 孟仟祥, 张松林, 崔明中, 等. 不同沉积环境湖相低熟原油的芳烃分布特征[J]. 沉积学报, 1999, 17(1): 112-120.
- [25] 黄海平, 周树青, 初振森, 等. 生物降解作用对原油中烷基菲分布的影响[J]. 现代地质, 2005, (3): 416-424.
- [26] 唐琪, 李美俊. 海相页岩有机质甲基菲指数与成熟度关系[J]. 油气地质与采收率, 2015, 22(3): 62-66.
- [27] 马军, 李水福, 胡守志, 等. 芳烃化合物组成及其在油气地球化学中的应用[J]. 地质科技情报, 2010, 29(6): 73-79.

- [28] 李博偲, 李美俊, 唐友军, 等. 烃源岩生物标志化合物分布特征及其地质意义: 以准噶尔盆地腹部地区中二叠统下乌尔禾组为例[J]. 东北石油大学学报, 2022, 46(5): 68-82, 105.
- [29] 王霆, 宋浩, 王瑞林, 等. 原油中芳烃化合物的柱层析与银离子薄层色谱分离方法对比研究[J]. 石油实验地质, 2023, 45(3): 549-559.
- [30] 包建平, 倪春华, 朱翠山, 等. 高演化地质样品中三芳甾类标志物及其地球化学意义[J]. 沉积学报, 2020, 38(4): 898-911.
- [31] 段传丽, 陈践发. 生物降解原油的地球化学特征及其意义[J]. 天然气地球科学, 2007, 18(2): 278-283.
- [32] 梅玲, 张枝焕. 南堡凹陷原油芳烃地球化学特征[J]. 石油天然气学报, 2009, 31(2): 11-15+44+13.
- [33] 杨福林, 云露, 王铁冠, 等. 塔里木盆地寒武系源岩地化特征及与典型海相原油对比[J]. 石油与天然气地质, 2017, 38(5): 851-861.
- [34] 李水福, 何生. 原油芳烃中三萜系列化合物的环境指示作用[J]. 地球化学, 2008, 37(1): 45-50.
- [35] 孟江辉, 刘洛夫, 张敏, 等. 原油芳烃的沉积环境指示作用[J]. 中国矿业大学学报, 2011, 40(6): 901-907.
- [36] 罗斌杰, 李新宇. 原油中芳烃化合物特征[J]. 地球化学, 1993(2): 127-135.
- [37] 妥进才. 柴达木盆地第三系芳烃的地球化学: 二环芳烃与多环芳烃的关系[J]. 石油实验地质, 1996, 18(4): 406-412.
- [38] 朱扬明. 塔里木原油芳烃的地球化学特征[J]. 地球化学, 1996, 25(1): 10-18.
- [39] 姜乃煌, 黄第藩, 宋孚庆, 等. 不同沉积环境地层中的芳烃分布特征[J]. 石油学报, 1994, 15(3): 42-50.
- [40] 朱扬明. 生油岩五环芳烃的热演化及成熟度参数[J]. 地球与环境, 1998(1): 75-80.
- [41] 张明峰, 妥进才, 吴陈君, 等. 柴达木盆地北缘原油中单体正构烷烃的碳、氢同位素组成研究[J]. 沉积学报, 2012, 30(5): 983-990.
- [42] 卢鸿, 李超, 肖中尧, 等. 轮南油田代表性原油正构烷烃单体氢同位素组成、分布与母源信息[J]. 中国科学(D辑:地球科学), 2004, 34(12): 1145-1150.
- [43] SAFAEI-FAROUJI M, KAMALI M R, RAHIMPOUR-BONAB H, et al. Organic geochemistry, oil-source rock, and oil-oil correlation study in a major oilfield in the Middle East[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2021, 207: 109074.
- [44] YU S, PAN C C, WANG J J, et al. Correlation of crude oils and oil components from reservoirs and source rocks using carbon isotopic compositions of individual n-alkanes in the Tazhong and Tabei Uplift of the Tarim Basin, China[J]. Organic Geochemistry, 2012, 52: 67-80.
- [45] 王圣柱, 王千军, 张关龙, 等. 准噶尔盆地石炭系烃源岩发育模式及地球化学特征[J]. 油气地质与采收率, 2020, 27(4): 13-25.
- [46] LIAO Y H, FANG Y X, WU L L, et al. The characteristics of the biomarkers and $\delta^{13}\text{C}$ of n-alkanes released from thermally altered solid bitumens at various maturities by catalytic hydrolysis[J]. Organic Geochemistry, 2012, 46: 56-65.
- [47] KÖRMÖS S, SACHSENHOFER R F, BECHTEL A, et al. Source rock potential, crude oil characteristics and oil-to-source rock correlation in a Central Paratethys sub-basin, the Hungarian Palaeogene Basin (Pannonian basin)[J]. Marine and Petroleum Geology, 2021, 127: 104955.
- [48] 惠瑞瑞, 刘妍, 张志升, 等. 鄂尔多斯盆地安塞地区延长组长9段原油地球化学特征与潜在源岩对比[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2024, 54(5): 1468-1481.
- [49] 张海, 雷华伟, 张涛, 等. 鄂尔多斯盆地靖边油田西部延9原油地球化学特征与油源[J]. 石油实验地质, 2018, 40(6): 836-842.
- [50] 李伟, 王瑶, 张枝焕, 等. 准噶尔盆地腹部侏罗系油气成藏地球化学分析[J]. 地质科学, 2006, 41(4): 663-675.
- [51] 张年富. 准噶尔盆地腹部莫索湾地区油气成藏条件与成藏模式[J]. 石油勘探与开发, 2000, 27(3): 17-20.