

准噶尔盆地哈山地区生物降解原油地化特征

苟哲培¹, 林静仪^{1*}, 唐银海², 焦吉兰¹, 孙研科¹

¹重庆科技大学石油与天然气工程学院, 重庆

²重庆市地质矿产勘查开发集团检验检测有限公司, 重庆

收稿日期: 2025年9月21日; 录用日期: 2025年10月11日; 发布日期: 2025年12月11日

摘要

哈拉阿拉特山地区位于准噶尔盆地西北缘, 蕴藏着丰富的浅层油气资源。通过色谱-质谱分析发现这里的原油普遍遭受过不同程度的生物降解作用, 其物性及化学成分会发生改变, 增加分析难度。本次研究以生物降解原油为研究对象, 基于正构烷烃、甾烷、萜烷类生物标志化合物特征, 分析生物降解作用对不同化合物的影响。结果表明, 随生物降解程度增强, 原油中胶质与沥青质含量持续增加, 正构烷烃逐渐消失, 色谱图中“鼓包”(UCM)显著增大且位置前移, 而饱和烃含量未呈现明显规律性变化, 重度降解原油仅残留异构烷烃与不可分辨化合物。25-降藿烷的出现可作为生物降解等级超过5级的重要标志。

关键词

生物降解, 生物标志化合物, 地化特征, 哈山地区

Geochemical Characteristics of Biodegraded Crude Oil in the Hashan Area of the Junggar Basin

Zhepei Gou¹, Jingyi Lin^{1*}, Yinhai Tang², Jilan Jiao¹, Yanke Sun¹

¹School of Petroleum and Natural Gas Engineering, Chongqing University of Science and Technology, Chongqing

²Chongqing Geology and Mineral Exploration and Development Group Testing and Inspection Co., Ltd., Chongqing

Received: September 21, 2025; accepted: October 11, 2025; published: December 11, 2025

Abstract

The Halashan area, located on the northwestern margin of the Junggar Basin, is rich in shallow oil and gas resources. Chromatography-mass spectrometry analysis revealed that crude oil here has

*通讯作者。

文章引用: 苟哲培, 林静仪, 唐银海, 焦吉兰, 孙研科. 准噶尔盆地哈山地区生物降解原油地化特征[J]. 石油天然气学报, 2025, 47(4): 718-729. DOI: 10.12677/jogt.2025.474080

generally undergone varying degrees of biodegradation, altering its physical properties and chemical composition, making analysis more challenging. This study examined biodegraded crude oil and analyzed the effects of biodegradation on various compounds based on the biomarker characteristics of n-alkanes, steranes, and terpenes. The results showed that with increasing biodegradation, the content of colloids and asphaltenes in the crude oil increased, n-alkanes gradually disappeared, and the "bump" (UCM) in the chromatogram significantly increased and shifted forward. However, the content of saturated hydrocarbons showed no significant regularity, and only isoalkanes and unresolved compounds remained in severely degraded crude oil. The presence of 25-norhopane can be used as an important indicator of biodegradation exceeding level 5.

Keywords

Biodegradation, Biomarker Compounds, Geochemical Characteristics, Hasan Region

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

生物降解严重消耗了原油中能够指示有机质来源和热演化程度的化合物，给原油成因类型判识和油源对比造成困难。随着生物降解程度的增加，原油品质下降，在开采、运输和冶炼阶段都会带来严重问题。在世界范围内，原油遭受生物降解是一种重要的蚀变作用的普遍现象，生物降解原油的数量有可能超过了常规原油的数量。目前，原油生物降解等级的划分普遍依据在1993年由Peters和Moldowan所提出的方法，该方法依据为原油中的各类化合物的存在情况及其含量高低，将原油的生物降解等级划分为10级，生物降解等级由低到高正构烷烃、类异戊二烯烃、甾烷、藿烷、重排甾烷和藿烷依次减少直至消失。生物降解原油具有两大典型特征：首先在色谱图上呈现出巨大的鼓包，即不能分辨的复杂化合物(UCM)；其次当原油生物降解等级超过5级时，会产生25-降藿烷系列化合物，此类化合物被认为在正常原油中是不存在。生物降解会降低原油的经济价值，通过地化特征分析可量化降解程度，了解其分布规律可指导勘探方向；同时针对降解原油的高粘度特性，设计针对技术，降低开采成本。

准噶尔盆地是中国中西部4大含油气盆地之一，油气资源极为丰富。截至2023年底，中国石油在准噶尔盆地已发现29个油田、5个气田，累计石油探明地质储量超 33×10^8 t(常规油)、天然气探明地质储量为 1935×10^8 m³。本研究选取哈山地区生物降解原油为研究对象。通过利用气相色谱-质谱(GC-MS)对饱和烃组分中的生物标志化合物和芳烃族组分进行测试分析和稳定同位素比值来明确生物降解原油的地球化学特征[1]。利用原油有机地球化学特征，结合谱图特征及分子地球化学特征重建研究区沉积环境及有机质热演化史。基于原油生物标志化合物的组成特征及差异，对藿烷类、三环萜类、甾烷类、三芳甾类等一系列重要生物标志化合物定性分析，对生物降解原油做类型划分及生物降解等级划分。通过分析生物降解原油的地化特征，可以了解原油的成因、演化过程及保存条件，从而更准确地评估哈山地区的油气资源潜力，为进一步的勘探决策提供科学依据。

2. 区域地质概况

2.1. 研究区地理位置及概述

哈山地区位于准噶尔盆地西北缘前陆褶皱冲断带上，油气资源丰富，为本文的研究区(图1)。盆地周

围环绕着褶皱型造山带，东北部为克拉美丽山和青格里底山，西北部为扎伊尔山，南部为依林黑比尔根山和博格达山，盆地的几何形态近似为三角形拓展，呈现出北部窄，南部宽的特征。构造演化受准噶尔盆地西侧及北侧的构造隆起和达尔布特断裂的双重影响，大致划分为4个主要阶段：晚石炭世-早二叠世碰撞挤压阶段、晚二叠世-三叠纪弧后挤压阶段、侏罗纪早期伸展断陷阶段和侏罗纪中后期再生前陆阶段。自下而上发育地层为石炭系、二叠系、三叠系、侏罗系、白垩系、古近系、新近系和第四系等多套地层。其中，玛湖凹陷二叠系风城组具有深水沉积特点，其烃源岩相对比于哈山地区具有高盐度、高成熟度的特征[2]。

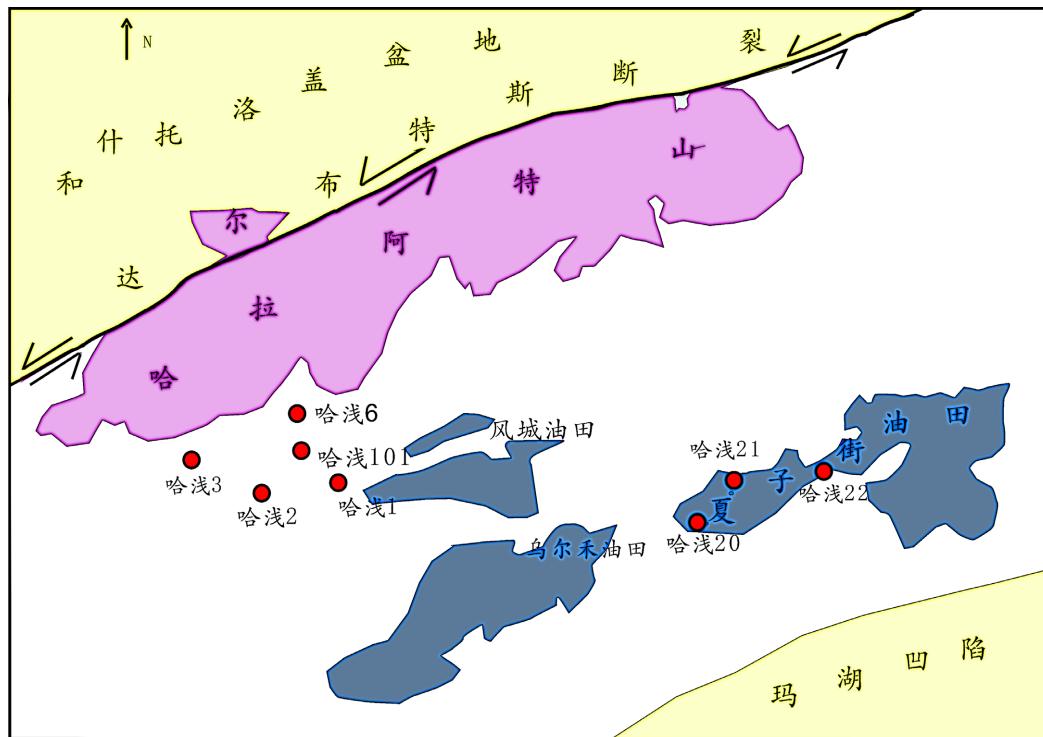


Figure 1. Structural and geological diagram of Hasan and its adjacent areas
图 1. 哈山及邻区构造地质简图

2.2. 地层特征及沉积特征

根据研究区及邻区钻探及地震资料解释可知，研究区内自下而上发育石炭系、二叠系、三叠系、侏罗系、白垩系、第三系和第四系地层(图 2)。

石炭系在全区都有分布，主要为火山岩和火山碎屑岩；二叠系在区内局部发育，以棕褐色泥岩、含砾砂岩为主；三叠系是一套河湖相沉积地层，主要发育白碱滩组地层，部分地区缺失百口泉组、上克拉玛依组和下克拉玛依组。岩性以灰色砂泥岩互层为主，局部发育煤层，与下伏地层构成不整合接触关系；侏罗系主要发育一套河流、沼泽相沉积，岩性以灰绿色、灰色、深灰色泥岩、煤层、粉砂质泥岩与灰色砂砾岩、粉砂岩、泥质粉砂岩互层为主，与下伏地层呈不整合接触关系；白垩系为冲积扇、河流相和三角洲沉积，沉积厚度较大，且全区分布，其上部岩性以褐灰色泥岩、粉砂质泥岩为主，局部夹不等厚黄色、灰黄色砂砾岩、粗砂岩、含砾泥质粗砂岩及褐灰色粉砂岩、泥质粉砂岩；中部为褐灰色、灰褐色中-细砂岩、粉砂岩、泥质粉砂岩及粗砂岩与下伏地层呈角度不整合接触；古近系为河流相沉积，岩性以灰白色、绿色石英质砾状砂岩、粗砂岩为主。总体分析，中生界各套地层均以明显的角度不整合接触，上超下剥特征清楚，并且在各地层的底部较广泛发育底砾岩。

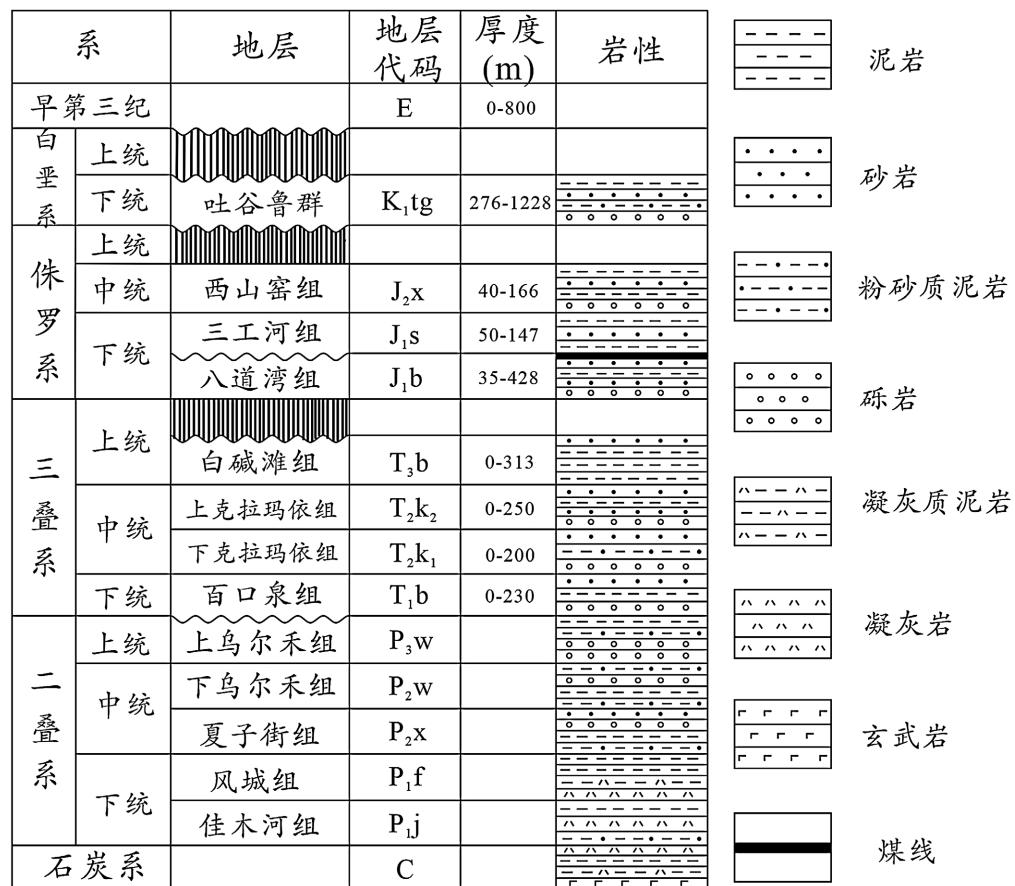


Figure 2. Comprehensive stratigraphic histogram

图 2. 地层综合柱状图

2.3. 构造发育与演化特征

哈拉阿拉特山地区与准噶尔盆地相毗邻，其构造演化不仅受西准噶尔造山带影响，也可能受阿尔泰造山带和达尔布特断裂的影响。通过总结前人的研究[3]和现今研究，可以将该地区构造发育与演化分为四个阶段[4]。

(1) 碰撞挤压期(C-P₁)

晚石炭世末是准噶尔盆地发展演化的重要转折时期。晚石炭末至早二叠世早期，在哈萨克斯坦板块向东挤压的背景下，西准噶尔洋壳向哈萨克斯坦板块之下俯冲消减，洋盆完全关闭后发生陆-陆碰撞，形成与断层相关的褶皱。在较大的南北向挤压作用力和沿断层面向上的分应力作用下，哈拉阿特山地区的剖面上较容易形成前展式逆冲叠瓦状构造。

(2) 弧后挤压期(P₂-T)

中二叠世是哈山地区构造运动较弱的时期，该时期准噶尔盆地西北缘沉积了厚层泥岩，且沉积拗陷仍受控于深大断裂。随着挤压作用的增强，在泥岩沉积较厚的乌夏地区，在二叠系时期形成了一些低倾角的断层滑脱面，且断层上盘的地层在挤压作用力的作用下继续逆冲抬升，哈山石炭系主推覆体之下隐伏背斜的雏形基本形成。

早三叠纪深大断裂继续活动，哈山地区地层继续抬升，玛湖凹陷[5]相对沉降。晚三叠世的印支运动是古特提斯洋闭合的标志，同时标志着新特提斯洋的开启，玛湖凹陷继续拗陷沉降(图 3)。

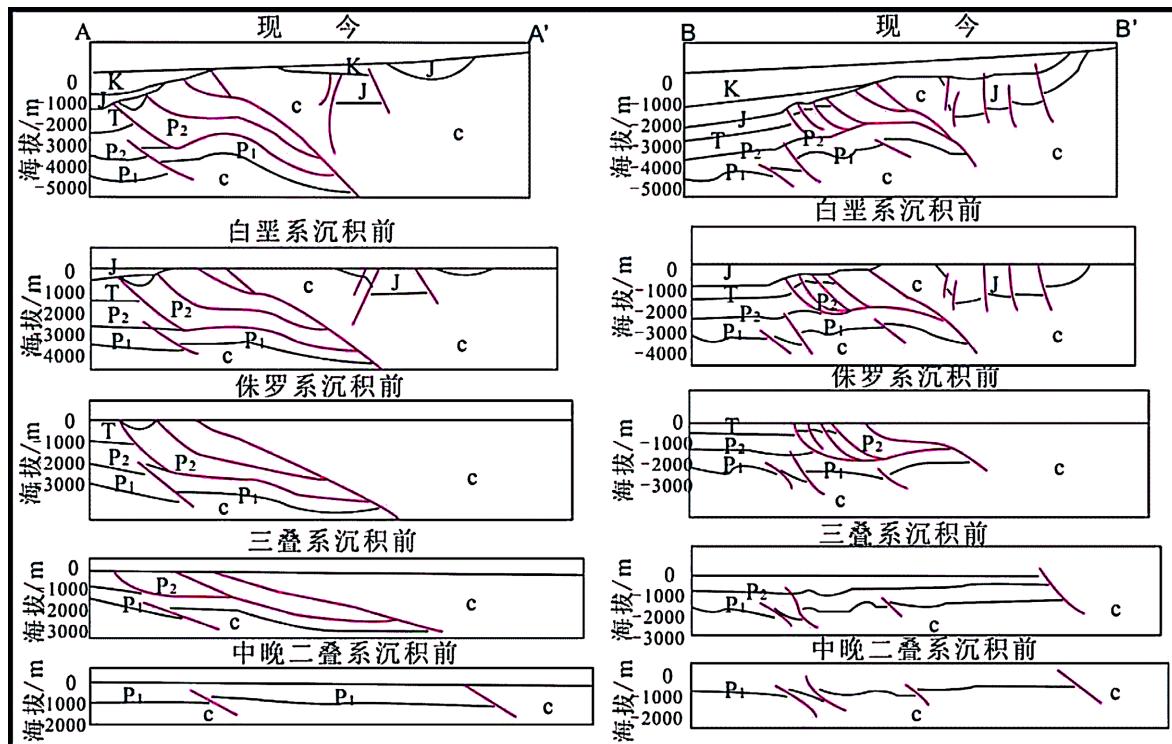


Figure 3. Tectonic evolution characteristics of the Hasan area

图 3. 哈山地区构造演化特征图

(3) 伸展断陷期(J_1-J_2)

燕山早期, 哈拉阿拉特山地区保持着一定冲断作用的同时伴随着右旋扭动。因受山系的制约, 侏罗世早期的区域性伸展作用使准噶尔西北缘前陆盆地沿山前断裂沉降, 从而使得盆地转化为断拗型沉积拗陷。

(4) 再生前陆期(J_2-Q)

燕山运动中期, 哈山构造带主要受到来自北西方向的挤压作用, 在继承了燕山早期以来的左行压扭走滑特点, 但强度有所减弱的同时, 哈拉阿拉特山西侧表现为达尔布特断裂向北西方向的高角度冲断, 并最终形成了哈山现今的构造地貌形态。

2.4. 石油地质概况

准噶尔盆地是中国中西部4大含油气盆地之一, 油气资源极为丰富。截至2023年底, 中国石油在准噶尔盆地已发现29个油田、5个气田, 累计石油探明地质储量超 33×10^8 t(常规油)、天然气探明地质储量为 1935×10^8 m³, 自2002年起原油产量持续22年超千万吨。2023年, 准噶尔北缘哈山5井实现新领域勘探的重大突破, 峰值日产油95.8立方米, 日产气6926立方米。这是中国石化在准噶尔盆地山前带领域首口百方井。

哈山地区储层参数特征:

(1) 二叠系储层特征

二叠系储层岩性分火山岩与砂砾岩两段, 下二叠统以中基性火山岩(玄武岩、安山岩等)为主, 含60%~80%火山碎屑, 发育气孔-杏仁构造; 上二叠统为扇三角洲相砂砾岩, 砂砾成分复杂, 泥质基底式胶结。物性上, 火山岩孔隙度5%~18%, 渗透率0.1~10mD, 裂缝发育带可达100mD以上; 砂砾岩孔隙度8%~12%, 渗透率0.04~5mD, 压实作用导致孔隙损失显著。储集空间以原生气孔、杏仁溶孔、粒间残

余孔及微裂缝为主, 裂缝多为高角度构造缝。流体性质表现为中质油, 密度 $0.85\sim0.95\text{ g/cm}^3$, 粘度高, 地层水矿化度 $10,000\sim30,000\text{ mg/L}$, 属氯化钙型。储层非均质性强, 垂向渗透率级差 $10\sim50$, 构造高部位物性显著优于周边。

(2) 三叠系储层特征

三叠系受辫状河-扇三角洲沉积控制, 下三叠统百口泉组为灰绿色砾岩、含砾粗砂岩, 泥质杂基含量高; 中-上三叠统克拉玛依组为中粗粒砂岩、粉砂岩, 成分成熟度中等。整体为中孔中渗储层, 砾岩段孔隙度 $8\%\sim15\%$, 渗透率 $0.5\sim5\text{ mD}$; 砂岩段孔隙度 $12\%\sim20\%$, 渗透率 $5\sim50\text{ mD}$, 河道主体物性最优。储集空间以原生粒间孔(占比 $60\%\sim70\%$)和粒内溶孔为主, 微裂缝顺层分布。原油性质较二叠系更轻质, 密度 $0.82\sim0.88\text{ g/cm}^3$, 地层水矿化度 $5000\sim10,000\text{ mg/L}$, 属碳酸氢钠型。层内呈正韵律, 河道主体砂体厚度超 15 m , 向边缘物性递减, 渗透率变异系数 $0.6\sim0.8$ 。

(3) 侏罗系储层特征

侏罗系发育辫状河三角洲-湖泊相碎屑岩, 下侏罗统八道湾组为粗砂岩、砾岩夹煤层, 上侏罗统西山窑组为分选良好的中细粒砂岩、粉砂岩。储层物性优越, 砂岩段孔隙度 $15\%\sim25\%$, 渗透率 $10\sim100\text{ mD}$; 砾岩段孔隙度 $10\%\sim18\%$, 渗透率 $1\sim10\text{ mD}$, 压实作用弱。储集空间以原生粒间孔(占比 $70\%\sim80\%$)和粒内溶孔为主, 西山窑组上段发育构造裂缝, 改善渗流能力。原油轻质, 密度 $0.80\sim0.85\text{ g/cm}^3$, 地层水矿化度 $2000\sim5000\text{ mg/L}$, 属氯化钠型。层内非均质性弱, 砂体内部渗透率变异系数 <0.5 , 三角洲前缘砂体呈朵状, 厚度 $10\sim20\text{ m}$ 。

(4) 白垩系储层特征

白垩系受河流相沉积影响, 下白垩统清水河组为高石英含量的细砂岩、粉砂岩, 泥质胶结; 上白垩统呼图壁河组以泥岩为主夹薄层粉砂岩。储层具高孔高渗特征, 孔隙度 $18\%\sim25\%$, 渗透率 $50\sim500\text{ mD}$, 原生粒间孔占比超 90% , 裂缝不发育。原油密度 $0.78\sim0.82\text{ g/cm}^3$, 粘度低, 气油比 $>500\text{ m}^3/\text{t}$, 地层水矿化度 $<2000\text{ mg/L}$, 边底水活跃。砂体呈席状连续分布, 厚度 $8\sim15\text{ m}$, 孔隙度平面标准差 $<2\%$, 渗透率级差 <1.5 , 流体分布受微构造控制。

3. 样品和实验方法

3.1. 样品信息

本次样品均为油砂样品, 研究所选取样品共计 6 块, 研究或选取同一口井不同深度的样品, 或选取不同井位深度接近的样品, 或选取不同井位不同深度的样品, 样品深度分布范围从 157.3 m 到 1741 m 不等, 样品所在层位跨越石炭纪、二叠纪、侏罗纪和白垩纪, 且主要集中在侏罗纪。样品具体信息见表 1。

Table 1. Sample information

表 1. 样品信息

井号	样品编号	深度(m)	层位	岩性
1	HQ101	157.3	J.b	黑褐色油浸细砂岩
2	HQ1	291.3	K	灰绿色油浸细砂岩
3	HQ6	301.9	C	棕褐色富含油火山角砾岩
4	HQ8	554.5	J.b	灰色中砂岩
5	HQ6	840	C	灰色油斑凝灰岩
6	HQ101	1741	C	深绿灰色油斑火山角砾岩

3.2. 样品前处理

(1) 氯仿抽提

本次研究所取样品全部为岩石样品, 为进行烃源岩和储集岩有机地化分析, 需将岩石中的有机质提取出来, 此时, 抽提的实验手段就显得尤为重要。抽提时, 先将泥岩样品粗碎成小块, 挑选表面干净的小块样品进入碎样机研碎, 过筛(100~200 目), 混合均匀。称取约 200 g 岩石粉末, 置于索氏抽提仪中抽提 48 小时, 抽提试剂为三氯甲烷: 甲醇 = 98:2 的两元抽提试剂。抽提后所得氯仿沥青 “A” 在旋转蒸发仪上浓缩至 3~5 ml, 然后在不超过 40℃ 的温度下自然挥发干, 放入干燥器中保存待用。

(2) 族组分分离

称取 30~100 mg 氯仿沥青 “A”, 加入 0.5 ml 三氯甲烷和 10 ml 正己烷, 超声然后静置过夜, 使可溶有机质完全溶解于正己烷中和沥青质自然沉淀。利用脱脂棉和漏斗过滤掉沥青质, 收集滤液, 旋转蒸发收集到的滤液至 3~5 ml。利用活化的中性氧化铝: 硅胶 = 3:2 填充自制层析柱, 湿法填充, 并加入正己烷保持柱子润湿, 待正己烷液面与填充氧化铝齐平时加入一定量去除沥青质的滤液, 待滤液完全进入层析柱时, 用 40 ml 正己烷淋洗饱和烃, 接着使用 40 ml 甲苯淋洗芳烃。待饱和烃和芳烃组分收集好后, 使用氯仿: 甲醇 = 98:2 的混合溶液 70 ml 淋洗非烃, 将收集到的各组分旋转蒸发浓缩后用正己烷溶解, 配成一定浓度的溶液后转移至细胞瓶中, 定容至 1.0 ml, 低温保存待测。

4. 生物降解原油地球化学特征

4.1. 生物降解等级划分

生物降解等级的划分是对生物降解原油降解程度的定量表达, 原油中的不同组分, 其具备的抗降解能力不同。Chosson 等(1992)和 Moldowan 等(1992)提出原油中各组分抗降解能力由弱到强的顺序为: 正构烷烃、无环类异戊二烯烃、甾烷、藿烷、重排甾烷、芳构化甾类、卟啉[6][7]。后期很多学者对于生物降解原油的定量分析都是依据此研究成果。但生物降解作用是一个十分复杂的、“准多级”的过程, 在生物降解过程中, 各种化合物的确切的变化顺序常常是很难描述的, 许多化合物的变化还不明显的时候, 另一类化合物已经开始变化, 而且由于所处的条件不同, 化合物的变化顺序也有发生倒置的时候。例如, 某些因暴露在空气中而受到强烈生物降解作用的石油, 在所有甾烷化合物被破坏之前藿烷类化合物就发生了较为明显的变化, 尽管藿烷类化合物通常被认为比甾烷具备更强的抗生物降解能力。因此, 在给降解原油划分降解等级时, 不同的研究人员可能会有不同的划分结果。

本文研究原油生物降解等级主要依据 Chosson 等和 Moldowan 等在 1992 年提出的生物降解等级评判标准。该项标准共使用了 18 种饱和烃和芳香烃生物标志化合物[8], 这些化合物都是原油中常见且能够准确定性的生标化合物, 具有普遍的代表意义。该项标准根据生标化合物开始受影响、部分受影响、完全消失等几个不同阶段来表示生物降解对该类化合物的影响, 有的还使用了某类化合物的产生来表征生物降解等级。如上图, 将原油的降级等级共划分为 10 个级别和 4 个等级, 其中 1 级为轻度降解、2 级为中度降解、3 级为高度降解、5~10 级为严重降解。该项评判标准既结合了饱和烃和芳香烃生标化合物对生物降解的反应, 同时也定量评价了原油的生物降解程度, 是较为适用的生物降解原油评价标准。

根据生物降解等级划分标准, 笔者对此次研究所采样品进行了降解级别划分, 具体见上表。本次选取的样品降解等级从 2~7 级不等, 根据表 2 可知, 随着生物降解作用的加强, 原油中芳烃的含量不断降低, 饱和烃随着生物降解等级作用并未显现出明显的变化趋势, 而胶质和沥青质的含量不断增高。前人研究表明原油一旦形成, 在排驱、运移及聚集过程中必然会经历很多物理和化学过程, 这些过程将不同程度地改变原油的原始性质, 甚至完全掩盖其原生因素的影响。

Table 2. Classification of degradation levels of crude oil samples in the Hasan area
表 2. 哈山地区原油样品降解等级划分

井号	样品编号	深度(m)	层位	饱和烃(%)	芳烃(%)	非烃(%)	沥青(%)	饱芳比	降解等级
1	HQ101	157.3	J.b	17.07	11.17	45.05	26.72	1.53	5
2	HQ1	291.3	K	39.47	9.38	42.33	8.82	4.21	7
3	HQ6	301.9	C	18.26	13.16	47.29	21.3	1.39	3
4	HQ8	554.5	J.b	30.7	13.5	42.3	13.5	2.27	6
5	HQ6	840	C	20.51	12.85	48.44	18.2	1.6	3
6	HQ101	1741	C	33.25	11.1	38.93	16.72	2.99	2

4.2. 正构烷烃及类异戊二烯

正常原油中, 饱和烃组分的含量占原油质量的一般以上, 是原油中最主要的一类生标化合物。生物标志化合物在油气源、成熟度、运移等研究领域中起着非常重要的作用。一般认为原油性质及组分变化主要受母质来源及有机质演化程度的控制, 但其在运移和次生变化过程中也会发生较大变化。各类生标化合物在运移、成藏过程中因对生物降解等次生作用的敏感程度不同而所受影响程度亦有显著差异, 且有规律可循。前人[5]对原油中饱和烃的研究已经展开了深入的研究, 对其化合物类型、结构、母质来源等都进行了较为深刻的剖析。

饱和烃气相色谱特征可以在一定程度上反映原油的母质类型、热演化程度、沉积环境以及原油的次生变化等。从饱和烃气相色谱图中, 我们可以得到正构烷烃分布曲线(碳数分布范围和峰型特征)、主峰碳数、奇偶优势(OEP 或 CPI)和以姥鲛烷、植烷为主的类异戊二烯烃的组成等信息。由于此次研究所采集的样品都或轻或重的遭受了生物降解作用, 很多样品的饱和烃色谱显示为“UCM”, 虽然仍有少数样品降解程度较低, 但饱和烃气相色谱分析的结果仍不甚理想。常规饱和烃气相色谱参数已不能用于此次研究, 饱和烃气相色谱典型图谱见图 4。图中自(a)到(f), 样品的降解程度愈加严重, 因而表现出由上而下“鼓包”的增大。如图中所示, (a)图饱和烃保存的很完整, 化合物种类几乎未变化, 但出现了双峰的情况; (b)图中正构烷烃保存的较为完整, 但一开始出现“鼓包”, 且谱图后端的异构烷烃的峰高明显比第一幅图增加;

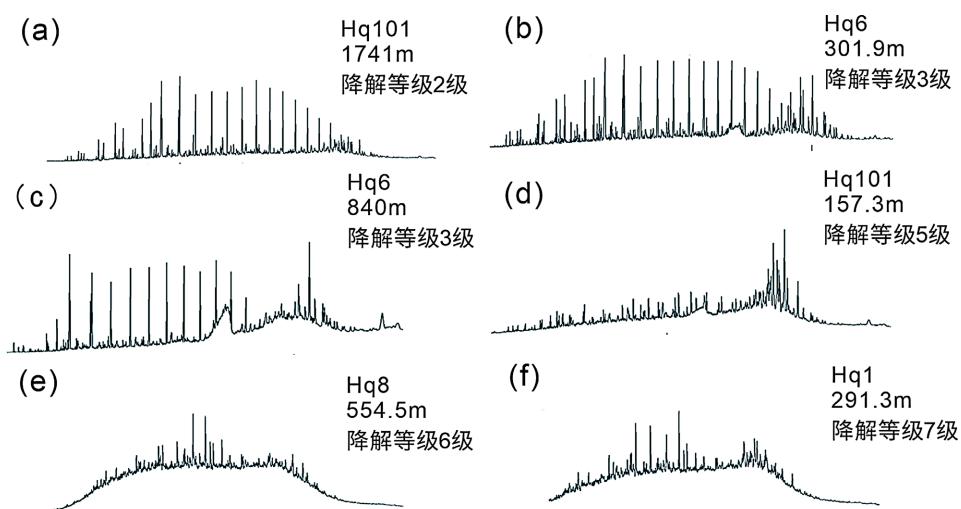


Figure 4. Typical crude oil saturated hydrocarbon chromatogram
图 4. 典型原油饱和烃色谱图

©图中,正构烷烃已受到较大的影响,种类减少,且末端的“鼓包”增大;(d)到(f)图中,正构烷烃基本消失,异构烷烃的峰型较为明显,且“鼓包”变大,发生位置上的移动。由此可见,生物降解作用使得原油中正构烷烃逐渐消失,且出现的“鼓包”越来越大,生物降解作用的增加也会使得“鼓包”的位置发生移动,移动方向为由后向前移动。

4.3. 留、萜类化合物

甾烷和萜类化合物是石油生物标志化合物研究中最为重要的化合物之一,也是最先获得成功应用的化合物。因为甾萜类化合物源自生物体,经后期地质改造而形成,它们包含了原始有机质和沉积环境等信息,并且由于其特殊的分子结构,相比于正构烷烃具有更好的稳定性,不易受后期各种因素的改变,因此甾萜类化合物一直被石油地质学家作为最为可靠的生标化合物之一广泛于石油研究的各个环节。

(1) 留烷化合物组成特征

甾烷是原油中最为常见,也是最重要的一类生标化合物,它们的母质主要来源于藻类和高等植物。原油中甾烷主要分为五类,即低碳数甾烷、C₂₇~C₂₉规则甾烷和重排甾烷、C₂₈~C₃₀ 4-甲基甾烷以及C₃₀甲藻甾烷。一般情况下,甾烷总含量占总生标含量的30%左右,甾烷中以规则甾烷为主,约占甾烷总含量的一半以上,其次是重排甾烷,低分子量甾烷和4-甲基甾烷含量相当,一般小于10%。不同样品的甾烷组成有一定的差异性,但呈规律性变化,成熟度较低的样品,其低碳数甾烷和重排甾烷含量低,规则甾烷含量相对高。对于成熟度高的样品,其低碳数甾烷和重排甾烷的含量将逐渐增加,而规则甾烷含量则以相反的趋势发生变化。甾烷中各个化合物含量的变化特征,可以从总体上反应成熟度对原油中甾烷化合物组成的影响。

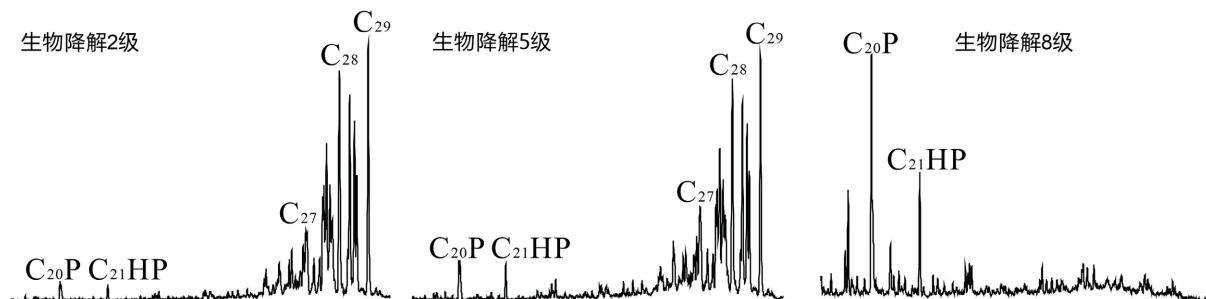


Figure 5. Typical GC-MS spectra of sterane compounds in crude oil from the Hashan area

图5. 哈山地区原油甾烷类化合物典型GC-MS 谱图

由图5可得,在生物降解作用影响下,甾烷参数的有效性随降解等级(Peters & Moldowan 分级,PM1~8)呈现显著差异。随着降解等级的增加,C₂₀P、C₂₁HP的含量不断增加,在生物降解等级为5级时C₂₀P含量开始大量增加,超过C₂₁HP。C₂₇、C₂₈、C₂₉规则甾烷被逐步消耗,当生物降解等级达到8级时,规则甾烷耗尽消失。

C₂₇、C₂₈、C₂₉规则甾烷常用于有机质来源分析,研究表明C₂₇甾烷来源于藻类生物,C₂₈甾烷来源主要与硅藻有关,C₂₉甾烷的生源既可以是藻类又可以是高等植物。陆相盆地绝大多数原油中C₂₇~C₂₉甾烷呈“V”字型分布,即C₂₇ > C₂₈ < C₂₉,表明藻类和高等植物双重母质来源特征。研究区原油甾烷特征如图6所示,主要呈现出C₂₇~C₂₉规则甾烷含量上升型分布,C₂₈和C₂₉甾烷含量相当,且远远高于C₂₇甾烷。推测研究区生油先质以陆源生物来源为主,藻类生源较少,不具备代表性。

对研究区原油甾烷中高碳数、低碳数及重排甾烷进行定性、定量分析,结果列于表3中。从分析结果可以看出,研究区由于受到生物降解作用的影响,很多样品中的甾烷都已经受到了影响,不能用于常

规研究。从哈山地区甾烷化合物组成分析结果来看, 规则甾烷是甾烷的主要成分, 占甾烷总量在 89.66% 以上, 最大可达 95.30%; 低碳数甾烷均在 4.45% 以下; 重排甾烷在 4.70~10.34% 之间, 平均为 8.37%; 部分样品检测出 4-甲基甾烷, 其平均含量约占甾烷总量 1.3% 左右。定量结果显示, 研究区高碳数甾烷远高于低碳数甾烷, 也远高于重排甾烷, 前已述及, 高碳数甾烷高于低碳数甾烷和规则甾烷高于重排甾烷的情况说明了样品有机质演化程度不高, 因此, 根据此定量结果可初步推测哈山地区原油及烃源岩成熟度都较低。

Table 3. Composition characteristics of saturated hydrocarbon steranes in oil sands of Hasan area
表 3. 哈山地区油砂饱和烃甾烷类组成特征表

井号	深度(m)	地层	低碳数甾烷(%)	重排甾烷(%)	规则甾烷(%)
HQ1	291.3	K	*	*	*
HQ8	554.5	J.b	2.24	8.02	91.98
HQ6	301.9	C	3.57	10.34	89.66
HQ6	840	C	2.62	8.63	91.37
HQ101	157.3	J.b	4.45	10.31	89.69
HQ101	1741	C	2.24	8.02	91.98

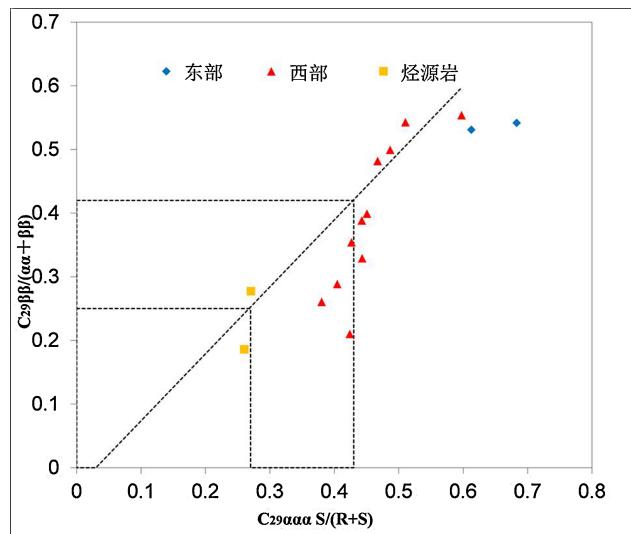


Figure 6. Correlation diagram of $\alpha\alpha\alpha C_{29}S/(S + R)$ and $C_{29}\beta\beta/(\alpha\alpha + \beta\beta)$ in oil sands of Hasan area
图 6. 哈山地区油砂 $\alpha\alpha\alpha C_{29}S/(S + R)$ 和 $C_{29}\beta\beta/(\alpha\alpha + \beta\beta)$ 相关图

重排甾烷/规则甾烷、 $\alpha\alpha\alpha C_{29}S/(S + R)$ 和 $C_{29}\beta\beta/(\alpha\alpha + \beta\beta)$ 常常被用作成熟度指标。从表 3 可以看出, 各参数均具有随深度增加的趋势, 说明不同层位原油随深度的增加成熟度逐渐降低, 且各层位差异明显。利用 $\alpha\alpha\alpha C_{29}S/(S + R)$ 和 $C_{29}\beta\beta/(\alpha\alpha + \beta\beta)$ 作交汇图, 如图 6 所示。该图版被划分为 3 个部分, 分别表示未熟油、低熟油[9]和成熟油, 每个区间的 $\alpha\alpha\alpha C_{29}S/(S + R)$ 和 $C_{29}\beta\beta/(\alpha\alpha + \beta\beta)$ 值都有一定的范围。从样品投点分布可知, 此次研究的样品其有机质演化程度普遍较低, 主要分布在低熟和成熟区域。图中将东部原油、西部原油和烃源岩分别用不同颜色的图形表示, 图中可以看出, 烃源岩主要分布在未熟区域, 西部原油主要分布在低熟区域, 而东部原油主要分布在成熟区域。据此可以推断, 三者中东部原油的有机质热演化程度最高, 烃源岩的有机质演化程度最低。

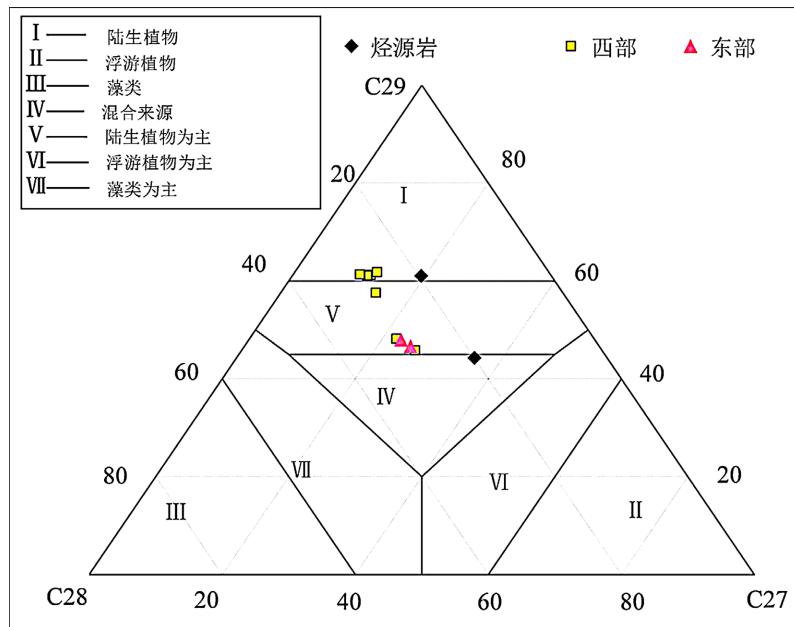


Figure 7. Triangular distribution diagram of bio-architectonic steranes in the oil sands of Hasan area
 图 7. 哈山地区油砂生物构型甾烷分布三角图

C_{27} 、 C_{28} 、 C_{29} 规则甾烷常用于有机质来源研究, 前人研究表明 C_{27} 甾烷主要来源于藻类生物, C_{28} 甾烷来源主要与硅藻的输入有关, C_{29} 甾烷的生源既可以是藻类又可以是高等植物。研究者利用 C_{27} 、 C_{28} 和 C_{29} 三者的相对含量作三角模式图, 如图 7 所示。该图版将三角区域分为 7 个部分, 不同区域代表不同的母质输入。本次研究所取样品大部分集中在 V 区内, 表示原油以陆源输入为主, 少量样品也处于 I 区内, 表示陆生植物输入, 还有一个样品处于 V 区和 IV 区临界状态, 同样表示以陆源为主, 可能存在混源输入的现象。东部原油、西部原油及烃源岩的分布区域大抵相同, 据此可以推测这三者主要以高等植物输入为主, 可能还有少量藻类的贡献。

(2) 萜烷化合物组成特征

哈山地区原油中萜烷的典型分布特征如图 8 所示: 由谱图可知, 该地区原油中三环萜异常发育, 含量非常高, 较常规原油而言, 蒽烷类化合物显得比较低, 这可能是该样品遭受了一定程度生物降解作用的原因, 也有可能是该地区三环萜的输入较多。由三环萜分布可以看出, 三环萜以 C_{23} 为主峰的呈正态分布, 指示该地区原油沉积时水体较深, 在较强的还原环境下进行的有机质热演化过程。哈山地区三环萜组分较全, 从 C_{19} 到 C_{37} 都有分布, 且含量都不低。从二维谱图还能看出样品中伽玛蜡烷的含量较低, 而降蒈烷含量较高。

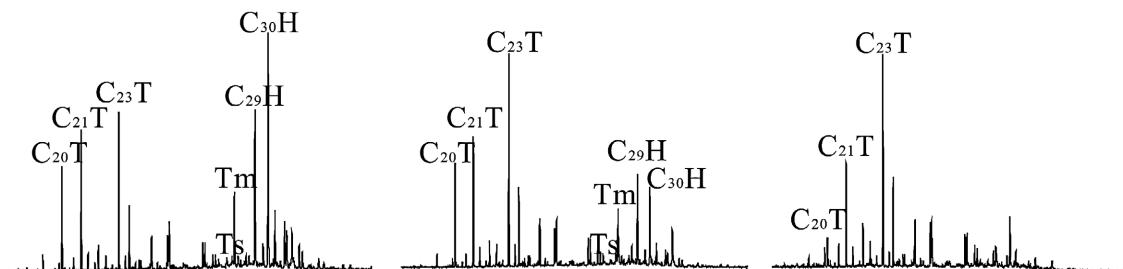


Figure 8. Typical GC-MS spectra of terpanes in crude oil from the Hasan region
 图 8. 哈山地区原油萜烷类化合物典型 GC-MS 谱图

在生物降解作用影响下, 蒽烷参数的有效性随降解等级(Peters & Moldowan 分级, PM 1~8)呈现显著差异。低度降解(PM2 级)阶段, 正构烷烃优先消耗, 留甾烷类化合物未受显著影响, 其成熟度参数(如 C₂₉ 留烷 20S/(20S + 20R))、母源参数(C₂₇~C₂₉ 留烷分布)及沉积环境指标(伽马蜡烷指数)仍具可靠性。进入中度降解(PM5 级)后, 环状甾烷结构开始被微生物选择性降解, 导致甾烷分布特征及甾烷/藿烷比值发生偏差, 此时藿烷系列及部分甾烷成熟度参数仍可有限使用。当降解程度加剧至 PM 8 级时, 留烷类几乎完全降解, 常规藿烷分布亦受干扰, 此时需依赖抗降解性较强的三环萜烷(C₁₉~C₂₆ 系列)、重排藿烷及 25-降藿烷等次生标志物进行油源对比[10]及环境解析, 同时建议辅以芳烃化合物(如甲基菲指数)及稳定碳同位素等多参数交叉验证, 以规避生物降解对分子标志物地球化学信息的系统性影响。

5. 结论

随着生物降解程度增强, 胶质与沥青质含量持续增加, 而饱和烃含量未呈现明显规律性变化。其中, HQ1 井(降解等级 7 级)与 HQ101 井(降解等级 2 级)分别代表严重降解与轻度降解的典型样本。研究进一步证实, 25-降藿烷的出现可作为生物降解等级超过 5 级的重要标志。

正构烷烃与类异戊二烯烃的分布特征揭示了生物降解作用的阶段性影响。随降解程度加剧, 正构烷烃逐渐消失, 色谱图中“鼓包”(UCM)显著增大且位置前移。轻度降解样品(如 HQ101~1741 m)仍保留部分正构烷烃峰型, 而重度降解样品(如 HQ1~291.3 m)仅残留异构烷烃与不可分辨化合物。类异戊二烯烃在降解初期优先消耗, 其比值因降解选择性而失真。研究证实, 正构烷烃的消失顺序与“鼓包”演化规律可作为生物降解程度的直观判识标志。

规则甾烷(占比 89.66%~95.30%)主导研究区原油甾烷组成, 低碳数甾烷(<4.45%)与重排甾烷(4.70%~10.34%)含量较低, 指示有机质热演化程度总体偏低。C₂₇~C₂₉ 留烷分布显示陆源高等植物输入为主, 藻类贡献有限。萜类化合物中, 三环萜异常发育(C₁₉~C₃₇ 系列完整分布), 蕤烷类因降解作用丰度降低, 25-降藿烷的出现进一步佐证了中-重度降解特征。 $\alpha\alpha\alpha C_{29}S/(S+R)$ 与 $C_{29}\beta\beta/(\alpha\alpha+\beta\beta)$ 参数表明原油成熟度主。

基金项目

本论文受重庆科技大学大学生创新训练计划项目(YKJCX2420108、2024201002)资助。

参考文献

- [1] 窦启龙, 陈践发, 薛燕芬, 等. 实验室条件下微生物降解原油的地球化学特征研究[J]. 沉积学报, 2005(3): 542-547.
- [2] 马遵敬, 陈中红, 吴洛菲, 等. 哈拉阿拉特山西部地区生物降解原油地球化学特征及来源分析[J]. 地球化学, 2020, 49(5): 549-562.
- [3] 梁云海, 李文铅, 李卫东. 新疆准噶尔造山带多旋回开合构造特征[J]. 地质通报, 2004(3): 279-285.
- [4] 胡杨, 夏斌. 新疆北部哈山地区构造演化特征及油气成藏条件初步分析[J]. 沉积与特提斯地质, 2012(2): 52-58.
- [5] 高添. 准噶尔盆地玛湖凹陷原油地球化学特征差异性及成因分析[D]: [硕士学位论文]. 北京: 中国石油大学(北京), 2023.
- [6] Peters, K.E., Scheuerman, G.L., Lee, C.Y., Moldowan, J.M., Reynolds, R.N. and Pena, M.M. (1992) Effects of Refinery Processes on Biological Markers. *Energy & Fuels*, 6, 560-577. <https://doi.org/10.1021/ef00035a005>
- [7] Chosson, P., Connan, J., Dessert, D., et al. (1992) *In Vitro* Biodegradation of Steranes and Terpanes—A Clue to Understanding Geological Situations. In: Moldowan, J.M., Albrecht, P. and Philp, R.P., Eds., *Biological Markers in Sediments and Petroleum*, Prentice Hall, 320-349.
- [8] 包建平, 朱翠山. 生物降解作用对辽河原油芳烃组成与芳烃成熟度参数的影响[J]. 中国科学, 2008(S2): 55-63.
- [9] 陈致林, 李素娟, 王忠. 低-中成熟演化阶段芳烃成熟度指标的研究[J]. 沉积学报, 1997, 15(2): 192-197.
- [10] 徐国盛, 丁圣斌, 刘文俊, 等. 哈山地区烃源岩地球化学特征及油源对比[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2014(6): 752-759.