

柴北缘冷湖构造带与马北油田原油 地球化学特征对比

王志峰^{1,2}, 包建平^{1,2}

(1. 长江大学 油气资源与勘探技术教育部重点实验室, 湖北 武汉 430100;

2. 长江大学 资源与环境学院, 湖北 武汉 430100)

摘要:通过对冷湖构造带和马北油田 26 个原油样品中生物标志物分布与组成特征的系统分析, 发现马北油田原油中姥植比(低于 2.0)相对偏低, 伽马蜡烷指数(0.10~0.20)相对偏高, 甾烷组成中明显富含指示藻类贡献的 C_{27} 甾烷, 且重排甾烷含量中等, 它们与附近凹陷发育的中侏罗统湖相泥岩中的生物标志物分布与组成特征基本一致, 显示它们之间存在成因联系; 而冷湖构造带原油中姥植比(2.0~2.5)相对偏高, 伽马蜡烷指数(低于 0.05)相对偏低, 明显富含指示陆源有机质贡献的 C_{29} 甾烷, 且重排甾烷含量相对丰富, 这一系列特征均明显有别于马北油田原油, 而与冷湖地区发育的下侏罗统湖相泥岩中的生物标志物分布与组成特征相吻合, 表明该地区发育的下侏罗统湖相泥岩是其主力烃源岩。

关键词:生物标志物; 姥植比; 萜烷; 甾烷; 伽马蜡烷; 原油对比; 侏罗系; 柴达木盆地

中图分类号: P618.13; TE122

文献标志码: A

Comparisons of Geochemical Characteristics of Crude Oils from Lenghu Structure Zone and Mabei Oilfield in the Northern Qaidam Basin

WANG Zhi-feng^{1,2}, BAO Jian-ping^{1,2}

(1. Key Laboratory of Exploration Technologies for Oil and Gas Resources of Ministry of Education,

Yangtze University, Wuhan 430100, Hubei, China; 2. College of Resources and Environment,

Yangtze University, Wuhan 430100, Hubei, China)

Abstract: The distributions and compositions of biomarkers of 26 samples of crude oils from Lenghu structure zone and Mabei oilfield in the northern Qaidam Basin were analyzed. The results show that the crude oil from Mabei oilfield is characterized by relatively lower Pr/Ph (<2.0) and higher gammacerane index (0.10-0.20), and rich in C_{27} steranes relative to C_{29} steranes together with elevated diasteranes, suggesting that the oil should be derived from Middle Jurassic lacustrine mudstones in adjacent hydrocarbon-generating sag; however, for the crude oil from Lenghu structure zone, the Pr/Ph (2.0-2.5) is relatively higher, and gammacerane index (<0.05) is lower, and C_{29} steranes surpass C_{27} homologues. These characteristics might reveal that they are generated by lower Jurassic lacustrine mudstones.

Key words: biomarker; Pr/Ph; terpane; sterane; gammacerane; crude oil correlation; Jurassic; Qaidam Basin

收稿日期: 2017-05-04

基金项目: 国家自然科学基金项目(41272169, 41772119)

作者简介: 王志峰(1992-), 男, 湖北仙桃人, 理学硕士研究生, E-mail: wongchifung@126.com。

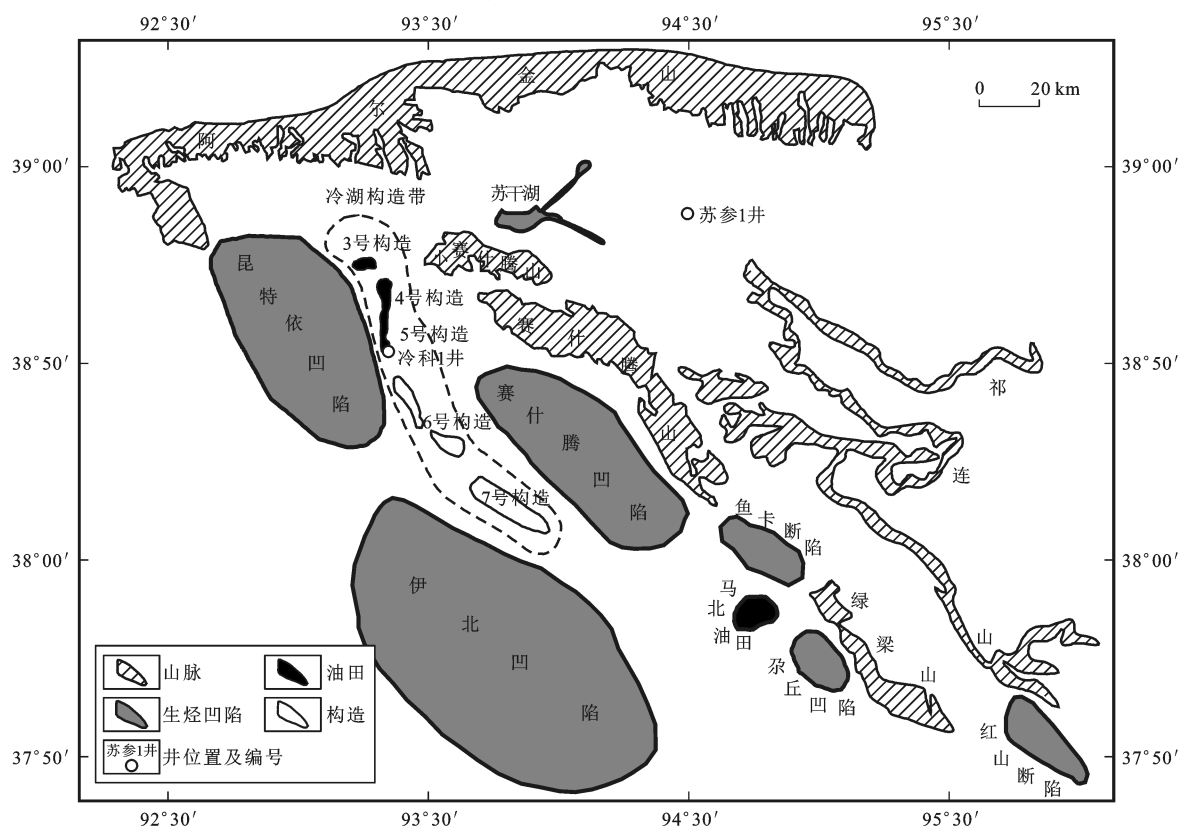
通讯作者: 包建平(1962-), 男, 江苏张家港人, 教授, 博士研究生导师, 工学博士, E-mail: bjp405@163.com。

0 引言

柴达木盆地位于青藏高原东北部,是中国西北三大含油气盆地之一,盆地北缘(简称柴北缘)是重要的油气勘探地区,目前已发现多个含油气构造和油气田^[1-10]。柴北缘原油以自生自储和下生上储形式分布于侏罗系、古近系和新近系地层中,西北地区普遍发育的侏罗系煤系地层是其主要的生油岩系。与冷湖构造带临近的昆特依凹陷中发育有下侏罗统湖沼相烃源岩,而与马北油田相邻的赛什腾凹陷则发育有中侏罗统湖沼相烃源岩^[3]。前人对柴北缘相关油田的原油开展过一些研究工作,但这些研究大多侧重在成藏方面,而对地球化学的研究相对较少,且得到的认识也相对笼统和模糊^[11-13]。徐文等强调了冷湖各构造带原油之间不同的成熟度和母质来源^[11];Wang 等运用全油和单体烃同位素手段解决冷湖的油源问题^[12];彭立才等讨论了马北地区的侏罗系原油,更多关注其石炭系的海陆交互相原油和简单油源分析^[13];聂国振等对马北地区原油展开研究,重点关注马北 2 井生物降解油的形成,仅笼统地将马北地区侏罗系原油定为淡水湖沼相

来源^[14];张辉等做过柴北缘原油的相关研究,所涉及的研究区域广、原油样品多,对冷湖和马北两地区的原油探讨有限,更多地关注整体和区域性的原油特征^[15-16]。

柴达木盆地是新中国成立之后最早进行石油勘探的地区之一,而柴北缘油气勘探始于 1954 年,距今已有 60 余年的历史,期间数次成为勘探重点,又随着重点探井的失败而转移^[17-18]。吐哈盆地等西北地区侏罗系煤成烃勘探的大获成功,暗示着研究区巨大的勘探潜力,然而时至今日,找到的油气资源与地质储量之间差距悬殊,柴北缘油气仍尚待突破。对于一个含油气盆地的勘探,烃源岩是勘探的基础,关注那些与已发现原油相关关系良好的烃源岩,希望通过这部分烃源岩找到更多的油气资源。原油地球化学特征可以全面反映相关烃源岩的信息,例如生物来源、沉积环境等。本文试图对比分析产自冷湖构造带(冷湖 3、4、5 号构造)上原油、马北油田原油中生物标志物分布与组成特征,探寻它们之间的异同,明确柴北缘中、下侏罗统湖沼相烃源岩所生原油的地球化学特征,确定相关构造上原油的来源(图 1)。



图件引自文献[19],有所修改

图 1 柴北缘主要构造单元与生烃凹陷

Fig. 1 Main Tectonic Units and Hydrocarbon-generating Sag in the Northern Qaidam Basin

1 区域地质背景

柴北缘位于柴达木盆地东北部,被鄂博梁—陵间断裂、黄泥滩断裂、埃姆克山南缘深断裂与盆地中央拗陷带分界。经历过三叠纪的剥蚀作用,柴北缘开始接受侏罗系湖相和沼泽相沉积。柴北缘西段主要沉积下侏罗统湖沼相烃源岩,其中冷湖次凹陷是主要生烃凹陷;柴北缘东段发育巨厚的中侏罗统煤系建造^[17-18,20-21]。马北油田三面被赛什腾凹陷、鱼卡断陷和尕斯库勒凹陷所围,而冷湖构造带则紧邻冷湖次凹陷(图1),两者均临近柴北缘主要烃源灶,油源条件优越。

冷湖—南八仙沉积带以南沉积下侏罗统生油岩,红山—鱼卡—绿梁山一带则是中侏罗统烃源岩分布区^[17],中、下侏罗统烃源岩层沿冷湖构造带—马北油田一带相互叠置。此外,马北油田和冷湖构造带都位于下侏罗统的地层剥蚀线上^[18],两地区原油对比显得意义重大。

2 样品采集与分析方法

原油样品分别取自冷湖构造带上冷湖3、4、5号构造和马北油田,其中冷湖3、4、5号构造上的原油样品分别为4、6、10个,马北油田为6个,共计26个;同时,烃源岩样品取自柴北缘冷科1井下侏罗统和苏参1井中侏罗统,用于与原油进行对比。

烃源岩碎至100目(筛网孔径为0.150 mm),然后用索氏抽提72 h以获取氯仿沥青“A”。用正己烷沉淀氯仿沥青“A”和原油中的沥青质,然后用柱层析法把脱沥青质原油和氯仿沥青“A”分离成饱和烃、芳烃和非烃3个组分,最后对饱和烃组分进行GC-MS分析。

GC-MS分析仪器为气相色谱-HP5890Ⅱ质谱仪,色谱柱为HP-5 ms石英弹性毛细柱(30 m×0.25 mm×0.25 μm)。升温程序为:50℃恒温2 min,从50℃到100℃的升温速率为20℃·min⁻¹,从100℃到310℃的升温速率为3℃·min⁻¹,310℃恒温15.5 min。进样口温度为300℃,载气为氦气,流速为1.04 mL·min⁻¹,扫描范围为50~550 amu,检测方式为多离子扫描。

3 原油中生物标志物分布与组成特征

3.1 链烷烃系列

冷湖构造带和马北油田原油中的链烷烃主要包括植烷系列和正构烷烃系列,正构烷烃系列较为完

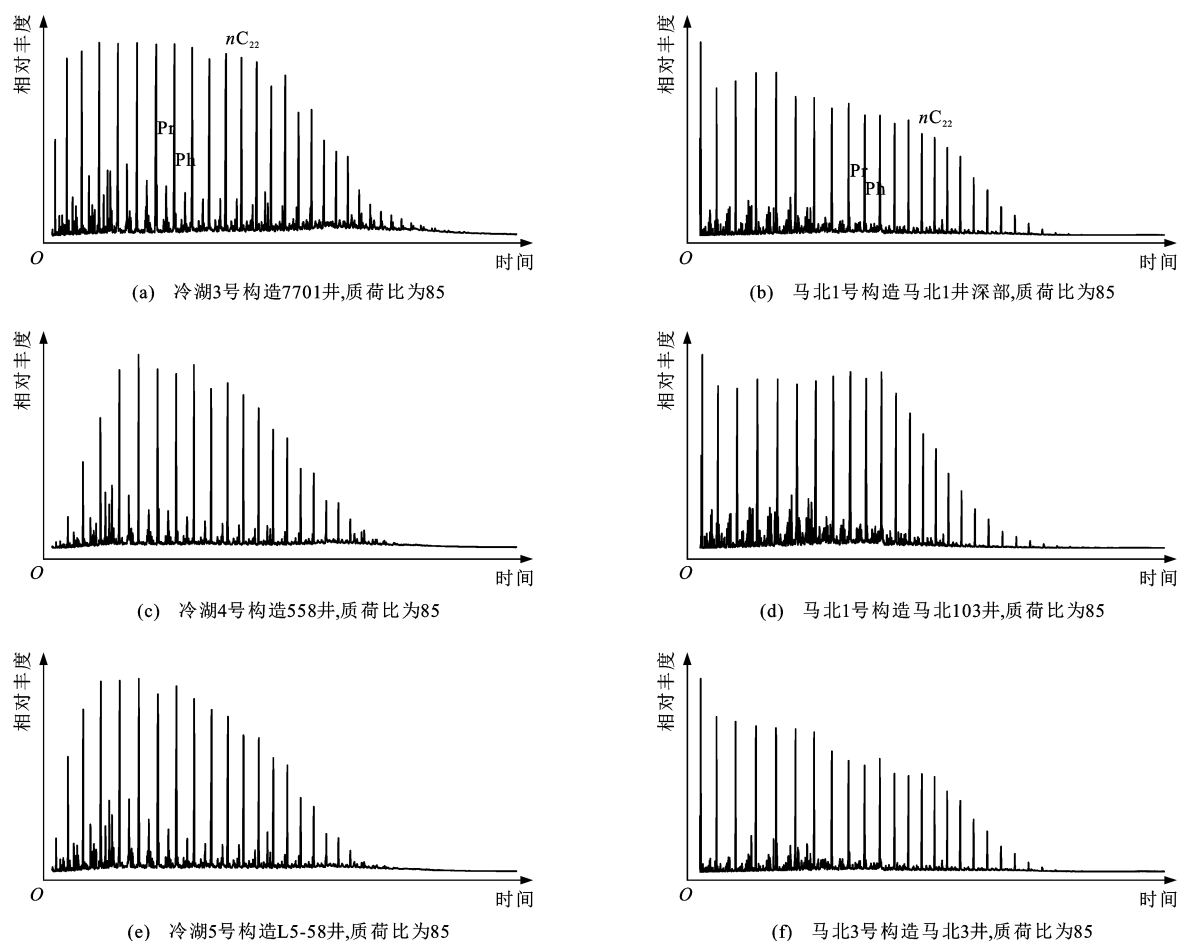
整,碳数分布介于C₁₀~C₄₁之间,且没有明显的奇偶优势(图2),其碳优势指数(CPI值)接近1.0(表1),显示成熟原油的特征。比较而言,冷湖构造带上冷湖5号构造的原油轻重比较高,其nC₂₁⁻/nC₂₂⁺值均大于3.0,而冷湖3号和4号构造的原油中值均小于3.0(表1)。马北油田原油也呈现类似现象,其中马北3号构造的原油中nC₂₁⁻/nC₂₂⁺值明显大于马北1号构造,前者高达3.8,而后者均小于3.0。一般而言,原油中正构烷烃系列的轻重比可以反映其相对演化成熟度,比值大意味着成熟度高,由此表明,无论是冷湖构造带还是马北油田,不同构造单元所产原油的成熟度是存在差异的。

植烷系列的组成特征常能反映烃源岩沉积环境性质和有机质的来源。一般而言,煤系源岩和所生原油常具有较高的姥植比(Pr/Ph值),而湖相和海相烃源岩及其所生原油中姥植比一般较低。在所分析的原油中,冷湖构造带原油的姥植比明显大于马北油田,前者大多大于2.0,而后者一般约为1.5(表1),这一现象可能说明冷湖构造带原油的烃源岩形成于还原性相对较弱的沉积环境,而马北油田原油的烃源岩可能形成于相对还原的沉积环境。

姥烷和植烷与相邻正构烷烃的比值(Pr/nC₁₇值和Ph/nC₁₈值)受控于有机质的热演化程度^[22]。在地质背景相似条件下,Pr/nC₁₇值和Ph/nC₁₈值一般与有机质成熟度负相关,即成熟度越低,比值越高,反之亦然。在所研究的原油中,马北油田原油中Pr/nC₁₇值和Ph/nC₁₈值较低,而冷湖构造带原油相对较高(表1),这可能反映出前者的成熟度高于后者。冷湖构造带冷湖3号和4号构造原油中这两个比值小于冷湖5号构造的原油,由此表明冷湖5号构造的原油成熟度可能高于冷湖3号和4号构造。此外,原油中Pr/nC₁₇值和Ph/nC₁₈值间的相互关系可以用来反映其烃源岩形成环境的氧化还原性和原始生烃母质的类型。就冷湖构造带和马北油田的原油而言,前者的数据点主要分布在偏氧化的沉积环境和偏腐殖型生烃母质区域,而后者则分布在相对还原的沉积环境,且其生烃母质为混合型偏腐泥有机质的分布区域(图3)。由此表明,冷湖构造带和马北油田原油的烃源岩在有机质来源和沉积环境性质上是存在一定差异的,这可能暗示着柴北缘中、下侏罗统烃源岩的形成环境不尽相同。

3.2 三环萜烷和四环萜烷系列

不同沉积环境形成的烃源岩及其所生原油常具有不同的三环萜烷系列分布面貌。一般而言,海相



nC_{22} 代表碳数为22的正构烷烃

图2 链烷烃系列分布特征

Fig. 2 Distribution Characteristics of Chain Alkane Series

或咸水湖相环境中烃源岩及其原油的 $C_{19} \sim C_{26}$ 三环萜烷系列呈现以 C_{23} 为主峰的近正态分布, 而淡水湖相环境中烃源岩及其原油则呈现以 C_{21} 为主峰的近正态分布, 但在淡水沼泽环境形成的烃源岩及其原油的三环萜烷系列各化合物的相对丰度从大到小依次为 C_{19} 、 C_{21} 、 C_{23} 、 C_{24} 、 C_{25} 、 C_{26} , 呈阶梯状分布, 且常见于煤系地层中^[23]。高丰度的 C_{24} 四环萜烷(C_{24} Te)是稳定的陆源有机质输入标志^[24-26], 其含量与成熟度、运移的关系不大。

冷湖构造带和马北油田原油中 $C_{19} \sim C_{26}$ 三环萜烷系列的分布特征较为相似, 均呈现出随碳数增加相对丰度降低的阶梯状分布特征(图4), 且 C_{24} 四环萜烷的相对丰度远高于相邻的 C_{26} 三环萜烷(C_{26} TT), 这可能与这些原油的烃源岩在形成环境和有机质来源上较为相似有关。冷湖构造带原油中 C_{23} 三环萜烷丰度相对较低, C_{19} 三环萜烷/ C_{23} 三环萜烷值(C_{19} TT/ C_{23} TT 值)介于 2.0~4.0; 而马北油田原油中 C_{23} 三环萜烷丰度较高, C_{19} TT/ C_{23} TT 值基本都

小于 2.0, 且其 C_{24} 四环萜烷/ C_{26} 三环萜烷值基本都小于 3.0。鉴于在以藻类为原始生烃母质的烃源岩和相关原油中 $C_{16} \sim C_{26}$ 三环萜烷系列大多以 C_{23} 为主峰, 马北油田原油较冷湖构造带原油在 C_{23} 三环萜烷相对丰度上的差异暗示前者低等生物藻类的贡献应该高于后者。两地区原油中 C_{24} 四环萜烷的丰度均明显高于相邻的 C_{26} 三环萜烷, 其 C_{24} Te/ C_{26} TT 值为 3.0 或更高, 这与柴北缘中、下侏罗统沉积地层均形成于淡水湖沼环境的背景是一致的。由此可见, 马北油田和冷湖构造带原油中 $C_{19} \sim C_{26}$ 三环萜烷和 C_{24} 四环萜烷分布与组成特征上的共性和差异性, 是沉积背景的一致性、各自源岩沉积-有机相带及原始生烃母质存在差异的客观反映。

3.3 五环三萜烷系列

原油中较为常见的五环三萜烷包括 $C_{27} \sim C_{35}$ 藿烷系列和伽马蜡烷等。藿烷系列可以指示细菌的生源输入, 而高丰度的 C_{35} 升藿烷系列与蒸发岩、碳酸盐岩等还原条件下的沉积环境有关^[27]。高丰度的

表 1 链烷烃参数
Tab.1 Parameters of Chain Alkane

构造单元	井号	深度/m	Pr/Ph 值	Pr/ <i>n</i> C ₁₇ 值	Ph/ <i>n</i> C ₁₈ 值	<i>n</i> C ₂₁ / <i>n</i> C ₂₂ 值	碳优势指数
冷湖 3 号构造	检 302		2.16	0.18	0.09	1.79	1.21
	7501		2.44	0.20	0.09	1.95	1.17
	7701		2.18	0.18	0.09	2.04	1.13
	检 303		2.20	0.15	0.08	2.91	1.17
冷湖 4 号构造	535		2.28	0.21	0.09	2.21	1.14
	558		2.32	0.25	0.11	2.13	1.14
	582		2.35	0.19	0.08	2.49	1.13
	586		2.35	0.20	0.09	2.52	1.14
	587		2.15	0.20	0.09	2.76	1.16
	601		2.15	0.16	0.08	2.67	1.16
冷湖 5 号构造	3-5		1.76	0.12	0.08	3.50	1.11
	3-32		2.09	0.12	0.07	3.49	1.11
	9701		2.04	0.12	0.07	3.31	1.13
	L5-1		1.89	0.13	0.07	2.74	1.12
	L5-3		2.14	0.13	0.06	3.09	1.11
	L5-6		1.86	0.12	0.07	3.92	1.10
	L5-36		1.93	0.13	0.08	3.04	1.11
	L5-58		2.10	0.11	0.05	3.72	1.14
	6-1		2.13	0.11	0.06	3.79	1.11
	6-24		1.93	0.12	0.07	3.38	1.13
马北 1 号构造	马北 1	520.9~527.5	1.63	0.10	0.07	2.69	1.18
	马北 1	887.0~890.0	1.56	0.10	0.07	2.94	1.13
	马北 103		1.58	0.10	0.07	2.77	1.08
	马北 105	902.8~906.0	1.47	0.10	0.07	2.31	1.11
	马北 106	884.4~890.0	1.43	0.09	0.07	2.47	1.09
马北 3 号构造	马北 3	1 685.0~1 709.0	1.85	0.14	0.08	3.81	1.18

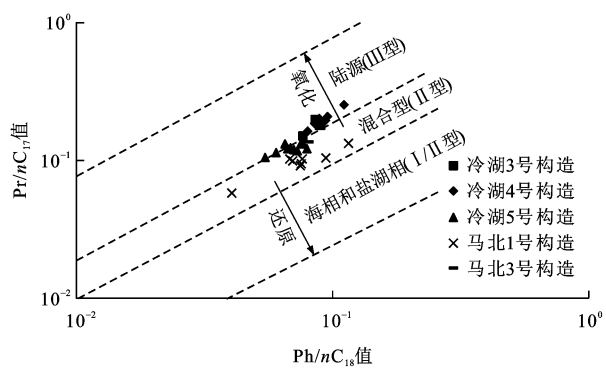


图 3 Ph/*n*C₁₈值与 Pr/*n*C₁₇值的关系

Fig.3 Relationship Between Ph/*n*C₁₈ and Pr/*n*C₁₇

重排藿烷则与酸性的介质条件和黏土矿物的催化作用关系密切,当然高成熟度也会使重排藿烷含量增高^[27]。地质样品中伽马蜡烷含量受控于沉积环境

的古盐度,一般高盐度的分层水体环境形成的烃源岩和原油中通常富含这类标志物^[28]。

冷湖构造带和马北油田原油中的五环三萜烷主要由各种构型的藿烷类化合物组成,包括 17 α (H)、21 β (H)-藿烷系列,18 α (H)-新藿烷系列和重排藿烷系列,而非藿烷类标志物仅检测到丰度很低的伽马蜡烷(图 5)。这显示出淡水湖沼环境和细菌是重要的原始生烃母质特征。重排藿烷在所研究原油中含量中等,且在冷湖构造带和马北油田原油中丰度相当,C₃₀重排藿烷/C₃₀藿烷值(diaC₃₀H/C₃₀H 值)介于 0.2~0.3 之间,表明其源岩的形成环境和岩石学特征较有利于此类标志物的形成。目前对地质样品中重排藿烷的来源和成因还不清楚,一般认为烃源岩性质、成岩条件、生物来源和成熟度是主要影响因

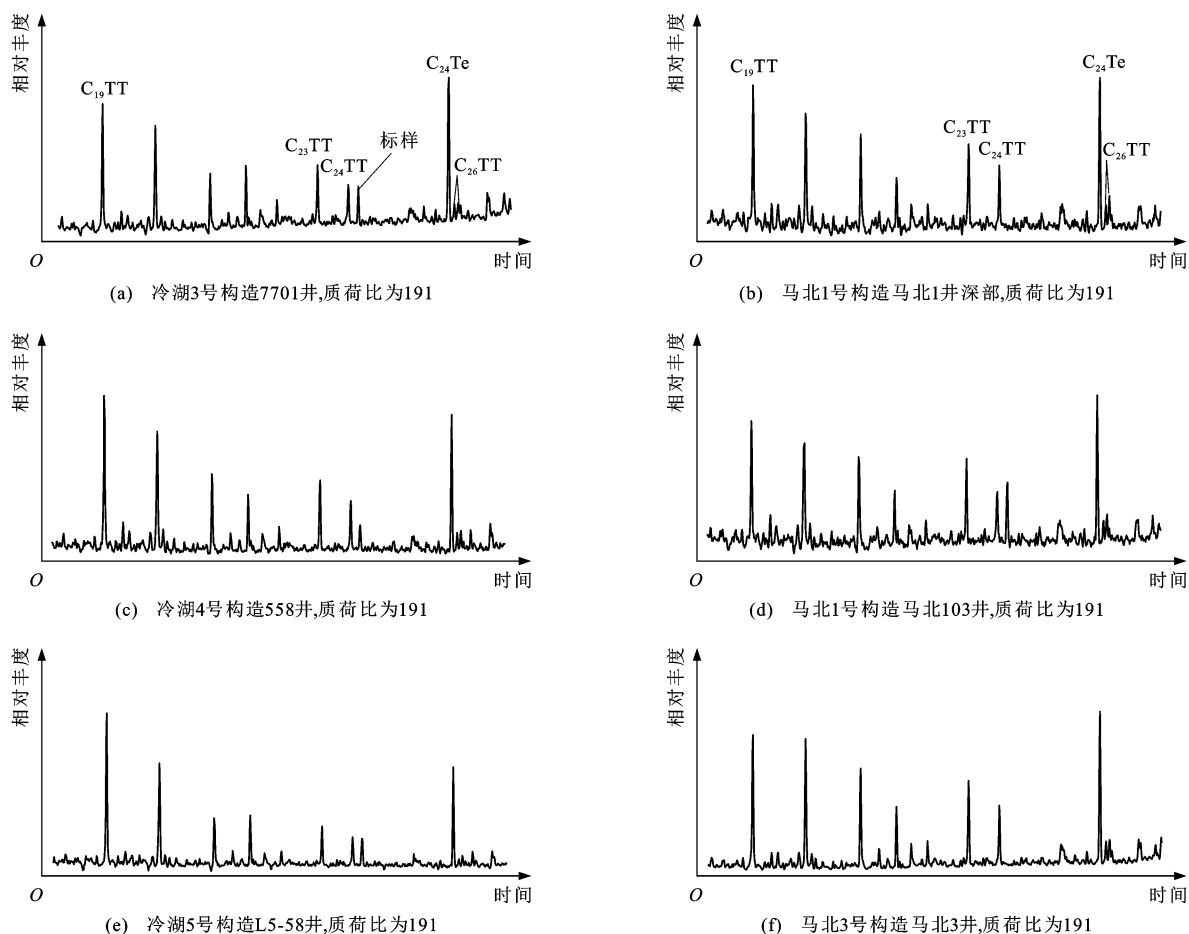


图4 三环萜烷和四环萜烷分布特征

Fig. 4 Distribution of Tricyclic and Tetracyclic Terpanes

素^[29-30]。张水昌等推测,这类化合物是底栖宏观红藻类的特征生物标志物^[31-32]。依据现有资料,咸水-盐湖环境一般贫重排藿烷^[33-35],而淡水湖沼环境则明显富含此类标志物^[34,36]。由此可见,柴北缘中、下侏罗统沉积地层形成于淡水湖沼相沉积环境,可能是该地区所产原油相对富含重排藿烷的原因所在。

尽管所分析原油中指示水体古盐度的生物标志物伽马蜡烷的含量均较低,但不同构造所产原油间的差异也是客观存在的。马北油田原油中伽马蜡烷含量高于冷湖构造带原油,前者的伽马蜡烷指数,即伽马蜡烷/ C_{30} 藿烷值($Gam/C_{30}H$ 值)介于0.1~0.2之间,而后者原油中该比值均小于0.05,而且伽马蜡烷指数与姥植比之间存在一定的负相关性(图6)。由此说明马北油田原油的烃源岩沉积时水体的古盐度稍高于冷湖构造带原油。尽管柴北缘侏罗纪沉积时期总体属于淡水湖沼环境,但上述现象可能暗示着中侏罗统地层沉积时水体的古盐度较下侏罗统地层沉积时相对偏高,这是马北油田和冷湖

构造带原油中伽马蜡烷含量存在差异的原因所在。

3.4 甾烷系列

$C_{27} \sim C_{29}$ 规则甾烷和重排甾烷是原油中主要的甾烷类化合物,可以提供有机质来源和成熟度方面的信息。 C_{27} 甾烷主要反映浮游生物藻类的贡献,而 C_{29} 甾烷则主要反映高等植物的输入^[37]。所研究原油的 $C_{27} \sim C_{29}$ 甾烷共同特点是均明显富含重排甾烷,而规则甾烷含量相对较低(图7),表明这些原油的烃源岩无论是在岩石学特征还是沉积-成岩环境上均有利于重排甾烷的形成。但马北油田原油中重排甾烷相对丰度明显低于冷湖构造带原油,前者 C_{27} 重排甾烷/ C_{27} 规则甾烷值($diaC_{27}/regC_{27}$ 值)和 C_{29} 重排甾烷/ C_{29} 规则甾烷值($diaC_{29}/regC_{29}$ 值)分别小于0.4和0.6,但数值变化较小,而后者分别大于0.4和0.6,且数值变化幅度较大(图8)。这一现象与马北油田原油较冷湖构造带原油姥植比相对偏低和伽马蜡烷指数相对偏高的特征相吻合,这是因为较高的古盐度和相对还原的沉积环境相对而言均会抑制重排甾烷的形成。现在普遍认为重排类化合物

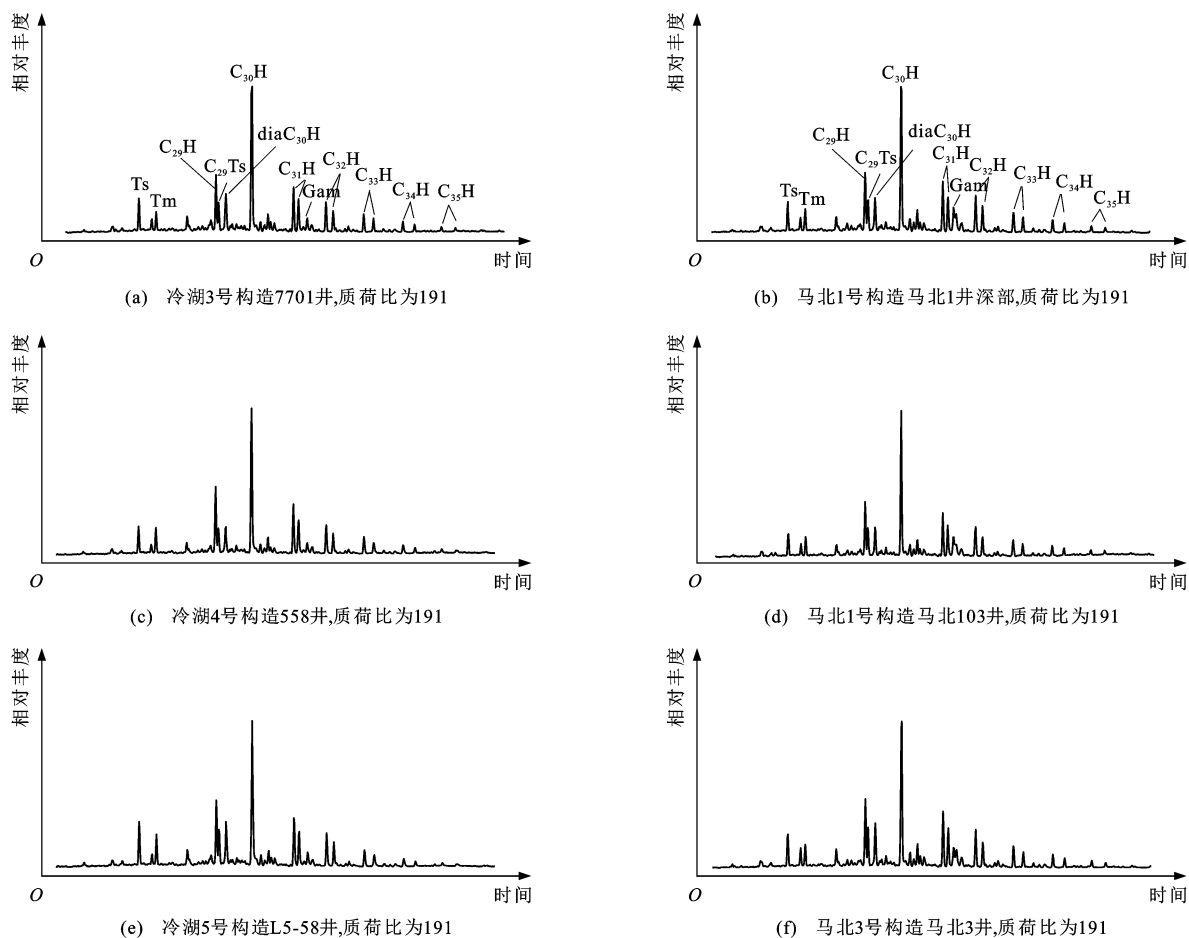


图5 五环三萜系列分布特征

Fig. 5 Distribution Characteristics of Pentacyclic Triterpane Series

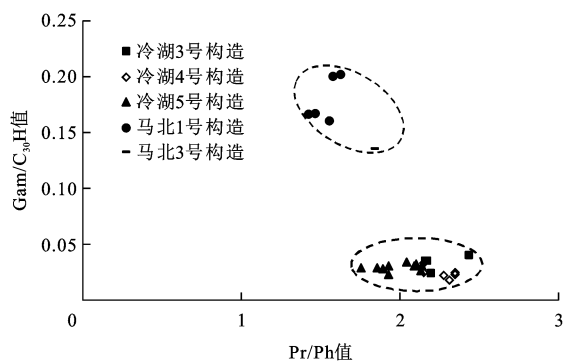


图6 伽马蜡烷指数和姥植比的关系

Fig. 6 Relationship Between Gammacerane Index and Pr/Ph

(包括重排补身烷、重排甾烷和重排藿烷等)有着相似的地球化学意义^[30,38]。偏氧化的沉积环境和存在黏土矿物催化作用的条件一般是有利于此类标志物的形成,此时其相对丰度还会随成熟度升高而增大,冷湖构造带原油中重排甾烷相对丰度变化大可能与其成熟度存在差异有关。

值得注意的是,所研究原油中的 $C_{27} \sim C_{29}$ 甾烷

碳数组成存在明显差异。马北油田原油中指示藻类贡献的 C_{27} 规则甾烷和重排甾烷较为丰富,其 $C_{27}R$ 、 $C_{28}R$ 和 $C_{29}R$ 构成近对称的“V”型(图7、8),且 $C_{27}R/C_{29}R$ 值和 C_{27} 重排甾烷/ C_{29} 重排甾烷值($diaC_{27}/diaC_{29}$ 值)分别大于 1.0 和 0.7,显示出湖相原油的甾烷碳数组成,表明低等生物藻类对这类原油作出了重要贡献。而在冷湖构造带原油中,指示陆源有机质贡献的 C_{29} 甾烷优势明显,其 $C_{27}R$ 、 $C_{28}R$ 和 $C_{29}R$ 构成反“L”型,且 $C_{27}R/C_{29}R$ 值和 $diaC_{27}/diaC_{29}$ 值基本都小于 0.7(图7、8),明显低于马北油田原油,由此表明陆源有机质对这一构造带上原油的贡献较大。还需要注意的现象是,冷湖构造带原油中甾烷碳数组成的变化较大,而且自冷湖3号构造经冷湖4号构造,到冷湖5号构造,其原油中 $C_{27}R/C_{29}R$ 值和 $diaC_{27}/diaC_{29}$ 值呈现出逐渐增加的趋势,反映出冷湖构造带上不同构造单元聚集的原油生烃母质原始生源构成较为复杂。冷湖3号构造原油中陆源有机质可能占据主导地位,而冷湖5号构造原油中低等生物藻类也作出了一定贡献,冷湖4号构造原油

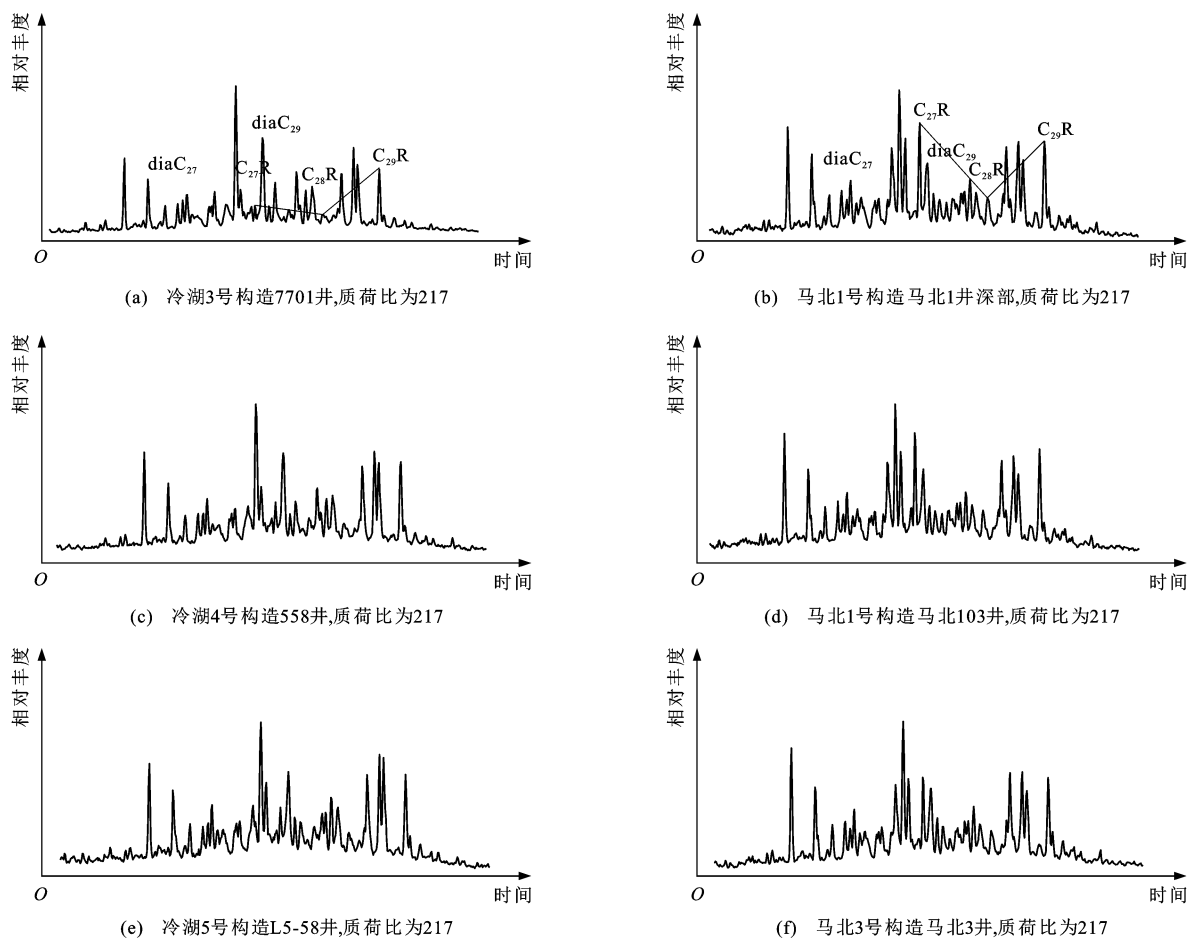
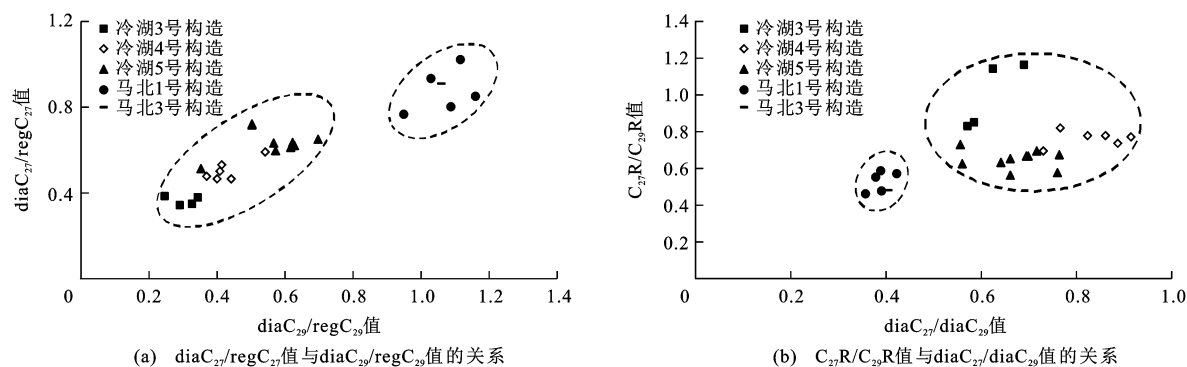


图7 甾烷系列分布特征

Fig. 7 Distribution Characteristics of Sterane Series

图8 $\text{diaC}_{27}/\text{regC}_{27}$ 值与 $\text{diaC}_{29}/\text{regC}_{29}$ 值、 $\text{C}_{27}\text{R}/\text{C}_{29}\text{R}$ 值与 $\text{diaC}_{27}/\text{diaC}_{29}$ 值的关系Fig. 8 Relationships Between $\text{diaC}_{27}/\text{regC}_{27}$ and $\text{diaC}_{29}/\text{regC}_{29}$, $\text{C}_{27}\text{R}/\text{C}_{29}\text{R}$ and $\text{diaC}_{27}/\text{diaC}_{29}$

在生烃母质上则介于两者之间。这一现象不但表明附近生烃凹陷中发育的下侏罗统烃源岩原始有机质的生源构成复杂多变,同时也说明冷湖构造带原油的油源存在多样性。

4 原油碳同位素组成和分布特征

原油的稳定碳同位素组成主要受控于原始生烃母质的来源和性质,而受成熟度的影响相对较

小^[39]。就本文所研究原油全油碳同位素组成特征而言,冷湖构造带原油碳同位素组成的变化较大,其 $\delta^{13}\text{C}$ 值介于 $-30.5\text{‰} \sim -25.4\text{‰}$ 之间,平均值约为 -27.14‰ ,显示相对偏重的特点,暗示着该构造带上原油的原始生烃母质生源构成复杂多变;而马北油田原油碳同位素组成变化明显偏小,且相对偏轻,其 $\delta^{13}\text{C}$ 值介于 $-29.4\text{‰} \sim -27.4\text{‰}$ 之间,平均值约为 -28.18‰ ,表明构造上原油的原始生烃母质生源

构成的复杂程度相对较低。鉴于轻碳同位素组成往往与低等生物藻类输入有关,冷湖构造带原油相对偏重的碳同位素组成表明陆源有机质的贡献较大,而马北油田原油相对偏轻的碳同位素组成表明藻类对此类原油的贡献不可低估,这与它们的甾烷碳数组成所反映出的生源特征是一致的,显然其内在控制因素是烃源岩的性质及其生源构成。

5 烃源岩中生物标志物分布与组成特征

柴北缘苏参1井和冷科1井揭示了中、下侏罗统烃源岩(图1),并取有岩芯。这些烃源岩的有机质丰度高(总有机碳(TOC)介于 $2.0\% \sim 4.0\%$ 之间),有机质类型属于II型(氢指数(HI)介于 $(250 \sim 350) \times 10^{-3}$ 之间),生烃潜力较高(生烃潜量PG)介于 $(7.0 \sim 15.0) \times 10^{-3}$ 之间),有机质演化程度适中(最高热解峰温 T_{max})介于 $440\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 450\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之间),表明它们属于生烃潜力较高的有效烃源岩。

在甾烷、萜烷分布特征上, $C_{16} \sim C_{26}$ 三环萜烷系列总体呈现随碳数增加而递减的阶梯状分布,且 C_{24} 四环萜烷远较 C_{26} 三环萜烷丰富,藿烷系列的分布模式基本一致,伽马蜡烷含量明显偏低(图9),这与柴北缘原油中的特征相似,与中、下侏罗统沉积地层形成于淡水湖沼相的地质背景一致。相比较而言,冷科1井下侏罗统湖相泥岩中 $C_{19}\text{TT}/C_{23}\text{TT}$ 值约为4.0,与冷湖构造带原油十分相似;而苏参1井

中侏罗统湖相泥岩中 $C_{19}\text{TT}/C_{23}\text{TT}$ 值介于2.5~3.0之间,这与马北油田原油基本一致。在甾烷碳数组成上,冷科1井下侏罗统湖相泥岩中 $C_{27}\text{R}/C_{29}\text{R}$ 值介于0.40~0.50之间,而苏参1井中侏罗统湖相泥岩中 $C_{27}\text{R}/C_{29}\text{R}$ 值介于0.55~0.80之间。由此表明柴北缘下侏罗统湖相泥岩中藻类对生烃的贡献小于中侏罗统湖相泥岩,这也是马北油田原油较冷湖构造带原油明显富含指示藻类贡献的 C_{27} 甾烷的原因,即两套湖相泥岩在原始生烃母质上的差异给相应原油打上了各自源岩的印记。

由此可见,柴北缘不同构造单元所产原油地球化学特征存在明显差异,这一差异应该源于各自的烃源岩,与柴北缘西部主要发育或残留有下侏罗统沉积地层而中部主要残留有中侏罗统沉积地层是分不开的。依据原油和烃源岩中生物标志物分布与组成特征,推测马北油田原油主要来源于中侏罗统湖相泥岩,而冷湖构造带原油则来源于下侏罗统湖相泥岩。

6 结 语

马北油田原油中姥植比(低于2.0)相对偏低,伽马蜡烷指数(0.10~0.20)相对偏高,甾烷组成中明显富含指示藻类贡献的 C_{27} 甾烷,且重排甾烷含量中等,显示出典型湖相原油的特征,这与相邻地区发育的中侏罗统湖相烃源岩中生物标志物的分布与

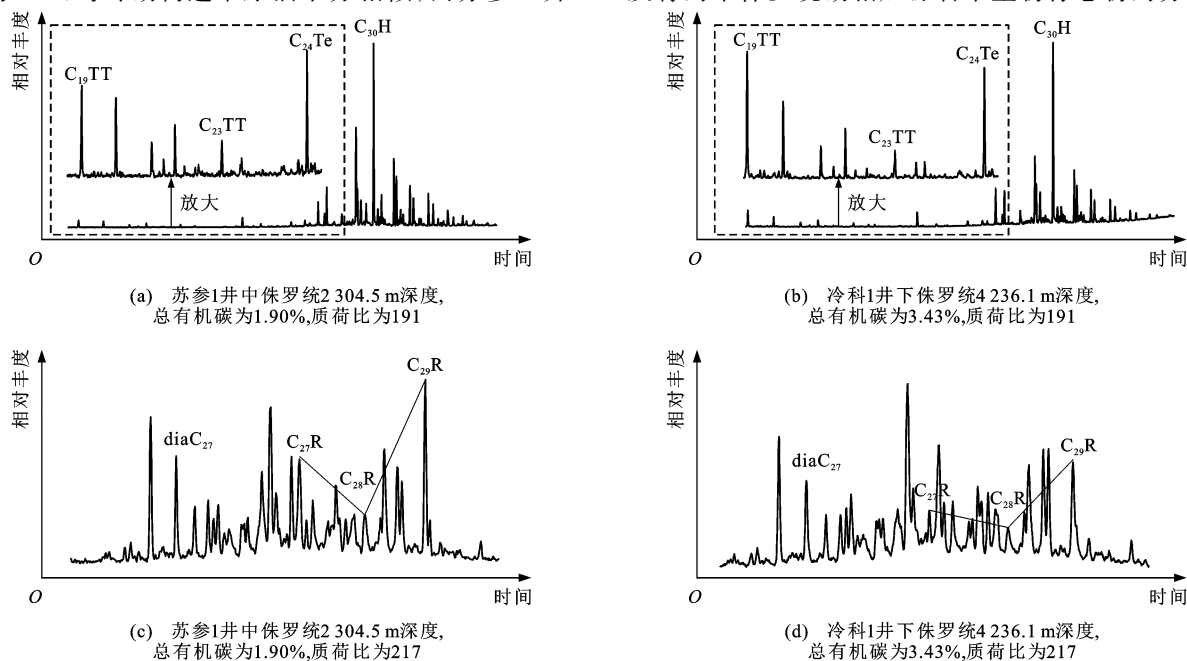


图9 柴北缘中、下侏罗统典型泥岩中甾烷、萜烷分布特征

Fig. 9 Distribution Characteristics of Steranes and Terpanes of Typical Middle-Lower Jurassic Mudstones in the Northern Qaidam Basin

组成特征较为相似,表明这些原油应该主要来源于相邻凹陷发育的中侏罗统湖相烃源岩。而冷湖构造带原油中姥植比(2.0~2.5)相对偏高,伽马蜡烷指数(低于0.05)相对偏低,指示陆源有机质贡献的 C_{29} 甾烷明显高于指示藻类贡献的 C_{27} 甾烷,且重排甾烷含量相对丰富,这一系列特征均明显有别于马北油田原油,而与相邻凹陷发育的下侏罗统湖相泥岩的生物标志物分布与组成特征基本一致,表明它们之间应该存在成因联系。由此可见,尽管柴北缘发育的中、下侏罗统烃源岩均形成于淡水湖沼环境,但原油地球化学特征的差异表明与两地区原油相对应烃源岩形成的沉积有机相带和原始生烃母质不尽相同。

参考文献:

References:

- [1] 张一伟,党玉琪,刘震,等.柴达木盆地油气分布基本规律[C]//张一伟,党玉琪,熊继辉,等.柴达木盆地油气勘探论文集.北京:石油工业出版社,2004:8-16.
ZHANG Yi-wei,DANG Yu-qi,LIU Zhen,et al. Basic Patterns of Oil and Gas Distribution in Qaidam Basin [C]//ZHANG Yi-wei,DANG Yu-qi,XIONG Ji-hui, et al. Proceedings of Oil and Gas Exploration in Qaidam Basin. Beijing:Petroleum Industry Press,2004:8-16.
- [2] 穆剑,汪立群.论柴达木盆地冷湖—南八仙构造带的含油气远景[J].石油学报,1999,20(2):18-22.
MU Jian,WANG Li-qun. Petroliferous Prospect of Lenghu-Nanbaxian Structure Belt in Qaidam Basin [J]. Acta Petrolei Sinica,1999,20(2):18-22.
- [3] 汪立群,罗晓容.柴达木盆地北缘油气成藏与勘探实践[M].北京:石油工业出版社,2012.
WANG Li-qun,LUO Xiao-rong. Hydrocarbon Accumulation and Exploration Practice in Northern Qaidam Basin [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2012.
- [4] 周建勋,徐凤银,胡勇.柴达木盆地北缘中、新生代构造变形及其对油气成藏的控制[J].石油学报,2003,24(1):19-24.
ZHOU Jian-xun,XU Feng-yin,HU Yong. Mesozoic and Cenozoic Tectonism and Its Control on Hydrocarbon Accumulation in the Northern Qaidam Basin of China[J]. Acta Petrolei Sinica,2003,24(1):19-24.
- [5] 田继先,孙平,张林,等.柴达木盆地北缘山前带平台地区天然气成藏条件及勘探方向[J].天然气地球科学,2014,25(4):526-531.
TIAN Ji-xian,SUN Ping,ZHANG Lin,et al. Accumulation Conditions of Natural Gas and Exploration Domains in Pingtai Area,Piedmont Zone of the North Qaidam[J]. Natural Gas Geoscience,2014,25(4):526-531.
- [6] 付锁堂,张道伟,薛建勤,等.柴达木盆地致密油形成的地质条件及勘探潜力分析[J].沉积学报,2013,31(4):672-682.
FU Suo-tang,ZHANG Dao-wei,XUE Jian-qin,et al. Exploration Potential and Geological Conditions of Tight Oil in the Qaidam Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica,2013,31(4):672-682.
- [7] 付锁堂.柴达木盆地油气勘探潜在领域[J].中国石油勘探,2016,21(5):1-10.
FU Suo-tang. Potential Oil and Gas Exploration Areas in Qaidam Basin [J]. China Petroleum Exploration, 2016,21(5):1-10.
- [8] 付锁堂.柴达木盆地天然气勘探领域[J].中国石油勘探,2014,19(4):1-10.
FU Suo-tang. Natural Gas Exploration in Qaidam Basin [J]. China Petroleum Exploration,2014,19(4):1-10.
- [9] 马峰,乐幸福,王朴,等.柴达木盆地煤型气成藏条件及勘探领域[J].中国石油勘探,2014,19(3):87-94.
MA Feng,LE Xing-fu,WANG Pu,et al. Accumulation Conditions and Exploration Domain of Coal-type Gas in Qaidam Basin [J]. China Petroleum Exploration,2014,19(3):87-94.
- [10] 赵凡,孙德强,闫存凤,等.柴达木盆地中新生代构造演化及其与油气成藏关系[J].天然气地球科学,2013,24(5):940-947.
ZHAO Fan,SUN De-qiang,YAN Cun-feng,et al. Mesozoic Tectonic Evolution of Qaidam Basin and Its Relationship with Oil and Gas Accumulation [J]. Natural Gas Geoscience,2013,24(5):940-947.
- [11] 徐文,包建平,朱建峰,等.柴达木盆地北缘冷湖地区原油对比[J].世界地质,2012,31(2):357-364.
XU Wen,BAO Jian-ping,ZHU Jian-feng,et al. Correlation of Crude Oil from Lenghu Area in Northern Qaidam Basin [J]. Global Geology,2012,31(2):357-364.
- [12] WANG C Y,ZHANG M,YIN C M,et al. Relationship of Hydrocarbon and Source-rock in Nos. 3-5 Tectonic Belts of the Lenghu Area,Northern Qaidam Basin [J]. Mining Science and Technology,2009,19(6):796-799.
- [13] 彭立才,彭小群,汪立群.柴达木盆地北缘马北地区油源对比[J].新疆石油地质,2006,27(5):526-529.

- PENG Li-cai, PENG Xiao-qun, WANG Li-qun. Oil and Source Rock Correlation in Mabei Area in Northern Margin of Qaidam Basin[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2006, 27(5): 526-529.
- [14] 聂国振, 段传丽, 詹兆文. 柴达木盆地北缘马北油田原油地球化学特征[J]. 内蒙古石油化工, 2007(12): 285-289.
- NIE Guo-zhen, DUAN Chuan-li, ZHAN Zhao-wen. Geochemical Characteristics of Crude Oils from Mabei Oilfield of Northern Qaidam Basin[J]. Inner Mongolia Petrochemical Industry, 2007(12): 285-289.
- [15] 张 辉. 柴达木盆地原油地球化学特征与油源对比[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2004.
- ZHANG Hui. The Studies of Geochemical Characteristics of Crude Oils from Qaidam Basin and Oil-rock Correlation[D]. Beijing: Graduate University of Chinese Academy of Sciences, 2004.
- [16] 张 敏. 柴达木盆地北缘油源及含油气系统分析[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2004.
- ZHANG Min. Analyses on the Oil Source and the Oil/Gas System in the North Fringe of Qaidam Basin[D]. Beijing: Graduate University of Chinese Academy of Sciences, 2004.
- [17] 党玉琪, 胡 勇, 余辉龙, 等. 柴达木盆地北缘石油地质[M]. 北京: 地质出版社, 2003.
- DANG Yu-qi, HU Yong, YU Hui-long, et al. Petroleum Geology in North Qaidam Basin[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2003.
- [18] 王玉华, 侯启军, 孙德君, 等. 柴达木盆地北缘地区中新世地层油气生成与资源评价[M]. 北京: 科学出版社, 2004.
- WANG Yu-hua, HOU Qi-jun, SUN De-jun, et al. Formation and Resource Evaluation of Petroleum and Gas of Meso-Cenozoic in Northern Qaidam Basin[M]. Beijing: Science Press, 2004.
- [19] 曹 剑, 边立曾, 胡 凯, 等. 柴达木盆地北缘侏罗系不同沉积环境烃源岩生物标志物特征及其应用[J]. 地质学报, 2008, 82(8): 1121-1128.
- CAO Jian, BIAN Li-zeng, HU Kai, et al. Biomarker Features of Jurassic Mudstone Source Rock from Different Sedimentary Environments in the Northern Qaidam Basin and Its Applications[J]. Acta Geologica Sinica, 2008, 82(8): 1121-1128.
- [20] 杨永泰, 张宝民, 席 萍, 等. 柴达木盆地北缘侏罗系展布规律新认识[J]. 地层学杂志, 2001, 25(2): 154-159.
- YANG Yong-tai, ZHANG Bao-min, XI Ping, et al. New Knowledge About Distribution of the Jurassic Strata Along the Northern Margin of Qaidam Basin[J]. Journal of Stratigraphy, 2001, 25(2): 154-159.
- [21] 翟光明, 徐凤银, 李建青. 重新认识柴达木盆地力争油气勘探获得新突破[J]. 石油学报, 1997, 18(2): 1-7.
- ZHAI Guang-ming, XU Feng-yin, LI Jian-qing. A Reconsideration of Qaidam Basin for a Great Breakthrough in Oil and Natural Gas Exploration[J]. Acta Petrolei Sinica, 1997, 18(2): 1-7.
- [22] PETERS K E, WALTERS C C, MOLDOWAN J M. The Biomarker Guide: Biomarkers and Isotopes in Petroleum Exploration and Earth History[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2005.
- [23] 包建平, 马安来, 黄光辉, 等. 三塘湖盆地原油地球化学特征及其成因类型[J]. 石油勘探与开发, 1999, 26(4): 25-29.
- BAO Jian-ping, MA An-lai, HUANG Guang-hui, et al. The Origin and Geochemical Characteristics of Crude Oils from Santanghu Basin[J]. Petroleum Exploration and Development, 1999, 26(4): 25-29.
- [24] 王昌桂, 程克明, 徐永昌, 等. 吐哈盆地侏罗系煤成烃地球化学[M]. 北京: 科学出版社, 1998.
- WANG Chang-gui, CHENG Ke-ming, XU Yong-chang, et al. Geochemistry of Jurassic Coal-derived Hydrocarbons of Turpan-Hami Basin[M]. Beijing: Science Press, 1998.
- [25] 陈建平, 赵长毅, 王兆云, 等. 西北地区侏罗纪煤系烃源岩和油气地球化学特征[J]. 地质论评, 1998, 44(2): 149-159.
- CHEN Jian-ping, ZHAO Chang-yi, WANG Zhao-yun, et al. Organic Geochemical Characteristics of Oil, Gas and Source Rocks of Jurassic Coal Measures in Northwestern China[J]. Geological Review, 1998, 44(2): 149-159.
- [26] PHILP R P, GILBERT T D. Biomarker Distributions in Austrian Oils Predominantly Derived from Terrigenous Source Material[J]. Organic Geochemistry, 1986, 10(1/2/3): 73-84.
- [27] CLACK J P, PHILP R P. Geochemical Characterization of Evaporated Carbonate Depositional Environments and Correlation of Associated Crude Oils in the Black Creek Basin, Alberta[J]. CSPG Bulletin, 1989, 37(4): 401-416.
- [28] VENKATESAN M I. Tetrahymanol: Its Widespread Occurrence and Geochemical Significance[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1989, 53(11): 3095-3101.
- [29] ZHU Y M, HAO F, ZOU H Y, et al. Jurassic Oils in the Central Sichuan Basin, Southwest China: Unusual

- Biomarker Distribution and Possible Origin[J]. *Organic Geochemistry*, 2007, 38(11):1884-1896.
- [30] 赵孟军, 张水昌. 17 α (H)-重排藿烷在塔里木盆地中的指相意义[J]. *石油勘探与开发*, 2001, 28(1):36-38.
ZHAO Meng-jun, ZHANG Shui-chang. The Special Sedimentary Facies Indicated by 17 α (H)-diahopanes in Tarim Basin[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2001, 28(1):36-38.
- [31] 张水昌, 张宝民, 边立曾, 等. 8 亿多年前由红藻堆积而成的下马岭组油页岩[J]. *中国科学: D 辑, 地球科学*, 2007, 37(5):636-643.
ZHANG Shui-chang, ZHANG Bao-min, BIAN Li-zeng, et al. Xiamaling Formation Oil Shale Deposits from Red Algae in 800 Million Years Ago[J]. *Science in China: Series D, Earth Sciences*, 2007, 37(5):636-643.
- [32] 曹 剑, 边立曾, 胡 凯, 等. 柴达木盆地北缘侏罗系烃源岩中发现底栖宏观红藻类生烃母质[J]. *中国科学: D 辑, 地球科学*, 2009, 39(4):474-480.
CAO Jian, BIAN Li-zeng, HU Kai, et al. Benthic Macro Red Alga: A New Possible Bio-precursor of Jurassic Source Rocks in the Northern Qaidam Basin, NW China[J]. *Science in China: Series D, Earth Sciences*, 2009, 39(4):474-480.
- [33] 朱扬明, 钟荣春, 蔡勋育, 等. 川中侏罗系原油重排藿烷类化合物的组成及成因探讨[J]. *地球化学*, 2007, 36(3):253-260.
ZHU Yang-ming, ZHONG Rong-chun, CAI Xun-yu, et al. Composition and Origin Approach of Rearranged Hopanes in Jurassic Oils of Central Sichuan Basin[J]. *Geochimica*, 2007, 36(3):253-260.
- [34] 施 洋, 包建平, 朱翠山, 等. 柴达木盆地西部七个泉与咸水泉油田原油地球化学特征对比研究[J]. *天然气地球科学*, 2010, 21(1):132-138.
SHI Yang, BAO Jian-ping, ZHU Cui-shan, et al. Comparative Study on Geochemistry Between Crude Oils from Qigequan and Xianshuiquan Oilfields in Western Qaidam Basin[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2010, 21(1):132-138.
- [35] 任拥军, 杨景楠, 邱隆伟, 等. 大王北洼陷烃源岩有机地球化学特征[J]. *高校地质学报*, 2010, 16(1):63-72.
REN Yong-jun, YANG Jing-nan, QIU Long-wei, et al. Organic Geochemical Characteristics of Source Rocks in Dawangbei Subbasin[J]. *Geological Journal of China Universities*, 2010, 16(1):63-72.
- [36] 陈小慧, 张 敏, 祁 灵. 利用芳烃参数探讨塔里木盆地库车坳陷原油中高丰度重排藿烷类的成因[J]. *科学技术与工程*, 2017, 17(3):196-202.
CHEN Xiao-hui, ZHANG Min, QI Ling. Using Aromatic Parameters to Study the Origin of High Abundance of Rearranged Hopanes in Crude Oils in Kuche Depression, Tarim Basin[J]. *Science Technology and Engineering*, 2017, 17(3):196-202.
- [37] 包建平, 刘玉瑞, 朱翠山, 等. 北部湾盆地迈陈凹陷徐闻 X1 井油气地球化学特征[J]. *天然气地球科学*, 2006, 17(3):300-304.
BAO Jian-ping, LIU Yu-rui, ZHU Cui-shan, et al. The Geochemical Properties of Natural Gas and Crude Oil from Xuwen X1 Well, Maichen Sag, Beibuwan Basin[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2006, 17(3):300-304.
- [38] 张 敏, 林壬子, 梅博文. 油藏地球化学: 塔里木盆地库车含油气系统研究[M]. 重庆: 重庆大学出版社, 1997.
ZHANG Min, LIN Ren-zi, MEI Bo-wen. *Reservoir Geochemistry: Approach to Kuche Petroleum System of Tarim Basin, China* [M]. Chongqing: Chongqing University Press, 1997.
- [39] GALIMOV E M. Isotope Organic Geochemistry[J]. *Organic Geochemistry*, 2006, 37(10):1200-1262.