

C₄-C₈ 轻烃在原油地球化学研究中的应用

——以塔里木盆地大宛齐油田凝析油为例

孔 婷^{1,2}, 张 敏^{1,2}

(1. 长江大学 油气资源与勘查技术教育部重点实验室, 武汉 430100; 2. 长江大学 资源与环境学院, 武汉 430100)

摘要: 全油样品的 GC 分析表明, 塔里木盆地大宛齐油田不同层位的 81 个原油样品富含轻烃组分, 且部分样品遭受了不同程度的微生物降解。以 C₄-C₈ 轻烃地球化学参数为工具, 对原油成熟度和次生蚀变等方面进行地球化学研究。轻烃成熟度参数表明, 原油的折算 R_c 在 0.9% 左右, 处于成熟阶段。对遭受生物降解作用的原油分析发现, 随着生物降解作用的增强, 其 Mango 轻烃参数 K₁ 值减小, K₂ 值明显增大, 甲基环己烷指数增大, 甲基环戊烷较乙基环戊烷更容易遭受生物降解, 表明单烷基环戊烷中烷基取代基越大的烃类越难遭受生物降解作用。结合轻烃参数指示的原油成熟度和母质来源, 推测研究区原油为次生凝析油。通过轻烃参数对比研究发现, 大宛齐油田凝析油轻烃参数特征与大北和其南部地区正常原油相似。依据塔里木盆地大宛齐油田的地质背景和原油成藏模式可知, 研究区原油是大北和南部地区两类原油通过深大断裂运移到塔里木盆地, 通过蒸发分馏作用聚集而成。

关键词: 轻烃; 次生凝析油; 地球化学研究; 蒸发分馏作用; 大宛齐油田; 塔里木盆地

中图分类号: TE122.1

文献标识码: A

Application of C₄-C₈ light hydrocarbons in geochemical studies:

A case of condensates in Dawanqi oil field, Tarim Basin

Kong Ting^{1,2}, Zhang Min^{1,2}

(1. Key Laboratory of Exploration Technology for Oil and Gas Research of Ministry of Education, Yangtze University, Wuhan, Hubei 430100, China; 2. College of Resources and Environment, Yangtze University, Wuhan, Hubei 430100, China)

Abstract: The GC analysis of whole oil samples demonstrates that a suite of 81 crude oils from different production wells and reservoir horizons derived from the Dawanqi oil field contain a high abundance of light hydrocarbon, and partial oils were biodegraded to different degrees. C₄-C₈ light hydrocarbons were chosen for geochemical studies including oil maturity and secondary alteration. The maturity parameters of light hydrocarbons indicate that the calculated reflectance of oils was about 0.9%, suggesting condensates in the mature stage. For biodegraded oils, with biodegradation increasing, Mango's light hydrocarbon parameters K₁ values reduce and K₂ values increase remarkably. Furthermore, MCH index also increases. Methylcyclopentanes are depleted faster than ethylcyclopentanes, implying that there is a trend of lower susceptibility to biodegradation with greater alkyl substitution. Combined with maturity and organic matter input, it is speculated that oils in the Dawanqi oil field are secondary condensates. The comparison of light hydrocarbon parameters indicates that condensates in the Dawanqi oil field are consistent with crude oils from the Dabei oil field and the southern area of Dawanqi oil field. Based on the geological background of the Dawanqi oil field in Tarim Basin and the condensate accumulation pattern, it indicates that crude oils from the Dabei oil field and the southern area moved to the Dawanqi oil field through deep faults and underwent evaporative fractionation.

Key words: light hydrocarbon; secondary condensates; geochemical studies; evaporation fractionation; Dawanqi oil field; Tarim Basin

轻烃是石油、天然气中重要的组成部分, 蕴藏着丰富的地质—地球化学信息, 在油气地球化学研究中发挥着重要作用。从 1980 年 Schaefer^[1] 建立毛细管气相色谱技术起, 国内外学者对轻烃报道很

收稿日期: 2016-11-22; 修订日期: 2017-05-10。

作者简介: 孔婷 (1992—), 女, 硕士研究生, 矿产普查与勘探专业。E-mail: kt515893413@163.com。

通信作者: 张敏 (1962—), 男, 教授, 博士生导师, 从事有机地球化学与石油地质学研究与教学。E-mail: zmjpu@163.com。

基金项目: 国家自然科学基金“地质体中高丰度重排萘烷类化合物的成因机制与石油地质意义” (41272170) 资助。

多,提出了许多轻烃参数,如庚烷值、石蜡指数、甲基环己烷指数等,作为指示油气沉积环境、成熟度、母质来源以及次生变化等的地球化学指标^[2-4]。不同学者对轻烃的定义和研究重点不同^[5-8],其中以 C_4-C_8 轻烃化合物研究较为深入。目前凝析油成藏体系主要有 2 种:第一种凝析油直接由油源岩生成,称为“原生”凝析油;第二种凝析油是由石油转化而来,称为“次生”凝析油,两者的最大差别在于凝析油成藏体系性质不同。“原生”凝析油主要是高成熟阶段(R_o 大于 1.2%)之后产生的,并和天然气伴生^[9];另一方面,一些陆源高等植物的分散树脂体等显微组分在未成熟阶段(R_o 小于 0.6%)也可以直接生成未成熟的凝析油^[2],但此种类型凝析油藏较少。相反,“次生”凝析油系统形成的控制因素是油的原生类型、流体成分主要特征等,即凝析油形成过程中地球化学分馏效应的程度。原油的轻烃组成除了受到源岩、成熟度等因素的控制外,还受到次生蚀变作用的影响,如生物降解作用和蒸发分馏作用。生物降解作用对原油的影响早已引起广泛关注,Peters 等^[10]依据不同烃类的相对丰度评价石油遭受生物降解程度,但其更多关注的是 C_{12} 的烃类化合物,因为生物降解为 1 级时,轻烃已经消耗殆尽。另外 George 等^[11]系统总结了微生物降解作用对原油轻烃 C_5-C_9 组分的影响。关于蒸发分馏作用,卢松年等^[12-13]研究发现其为次生原油气藏中原油形成新模式,傅宁等^[14]对东海西湖凹陷次生原油的地球化学特征及其成藏机制进行了研究。对于塔里木盆地大宛齐油田原油,纪红等^[15]主要对其轻烃组成特征进行了探究。关于原油的生物降解作用,杨禄等^[16-19]也进行了报道,但仅关注生物降解作用对 C_6-C_7 化合物的影响。而对大宛齐油田原油中轻烃组分 C_4-C_8 的变化特征的系统研究甚少,因此笔者在调研前人研究成果的基础上,探讨了 C_4-C_8 轻烃化合物在大

宛齐油田凝析油次生蚀变作用(生物降解作用和蒸发分馏作用)地球化学研究中的应用。

1 地质背景

大宛齐油田位于塔里木盆地库车坳陷,该坳陷位于南天山山前断裂带与塔北隆起之间,呈北东向展布。新生代晚期,受多期构造运动的影响,库车坳陷逐步形成了“四带三凹”的构造格局(图 1)。“四带”是由北部单斜带(I)、克拉苏构造带(II)、秋里塔格构造带(IV)以及南部斜坡带(V)构成;“三凹”是由拜城凹陷(III)、阳霞凹陷(VI)和乌什凹陷(VII)组成。大宛齐地区平面上划分为 DW1、DW105 西、DW105 东和 DW109 共 4 个区块,其构造钻遇的地层自上而下依次为第四系、新近系库车组(N_2k)、康村组($N_{1-2}k$)、吉迪克组(N_{1j})和古近系苏维依组($E_{2-3}s$),新近系库车组与上覆第四系为角度不整合接触^[16]。目前探明的油气埋深较浅,一般为 198~600 m,各层段油层不集中,纵向上分布比较分散(井段 67~600 m),含油井段长(500 m),油层分布于油田主体部位大宛 105 井区—109 井区—111 井区及其周围地带,主要产层位于新近系库车组。

2 样品与实验

塔里木盆地大宛齐油田原油颜色主要为黄色,并且具有六低特征:密度小(主体分布于 $0.7615 \sim 0.8063 \text{ g/cm}^3$),黏度小($0.7698 \sim 1.53 \text{ mPa} \cdot \text{s}$),含硫少,含蜡少,含胶质、沥青质少,凝固点较低($-8 \sim -14 \text{ }^\circ\text{C}$)。原油物性分析数据表明其为凝析油。本次研究共选取 85 个原油样品,其中取自大宛齐油田的有 81 个凝析油样品(11 个遭受过生物降解,70 个正常原油样品),同时选取大北油田 2 个正常原油以及大宛齐油田的南部大断裂附近却勒地区、羊塔克地区各 1 个正常原油作为对照,

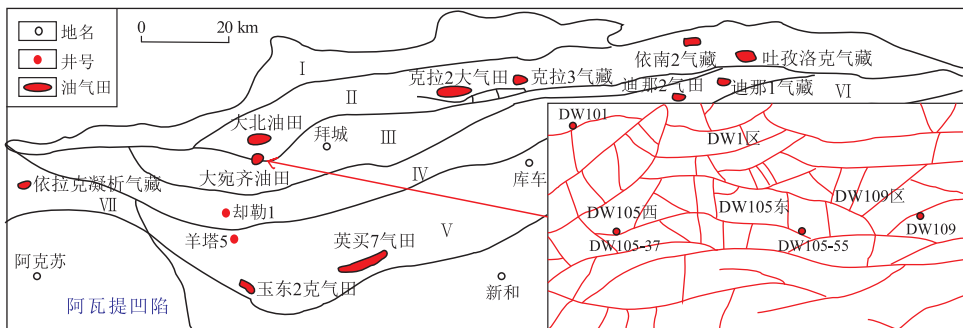


图 1 塔里木盆地大宛齐油田区域构造位置

Fig.1 Structural location of Dawanqi oil field, Tarim Basin

研究原油来源。

仪器与色谱条件: Agilent 6890N 气相色谱仪, 色谱柱为 Agilent HP-PONA 气相色谱柱 (50 m×0.20 mm×0.50 μm), 载气为高纯氦气, 原油样品进样量为 5 mL; 柱升温程序: 初始温度为 35 °C, 恒温 35 °C 保持 5 min 后, 以 4 °C/min 升温至 200 °C, 保持 2 min。采用新技术冷柱头零压力进样法, 并结合液氮富集气体装置。整个实验装置以及实验方法不采用任何化学试剂, 同样不存在污染以及其他化学反应, 测得的轻烃组分分离程度高, 代表性较强, 可以真实反映原油中轻烃组分的原始面貌。

3 结果与讨论

3.1 原油基本特征

3.1.1 全油色谱分布特征

笔者对大宛齐油田不同区块、不同层位的 81 个原油样品进行了全油色谱分析, 对比发现其面貌复杂, 分布类型较多, 反映原油烃类组成变化较大。如图 2 所示, 总体上大宛齐原油有 4 种分布面貌, 图 2a 以 DW105-37 井 (146.5~614 m) 原油为代表, 正构烷烃分布完整, 碳数分布 C_4-C_{30} , 主要以 C_{10} 或者 C_{11} 为主峰, 总体呈前峰型正态分布, 低碳数化合物中无明显生物降解迹象, 苯系物与甲基环己烷等化合物的丰度相对较高, 反映的是大宛齐油田主体原油的色谱面貌 (69 个)。图 2b 以 DW109 井 (166~173.5 m) 原油为代表, 低碳数正构烷烃损失严重, 但苯系物和甲基环己烷丰度相对较高, 高碳数正构烷烃分布完整, 碳数分布范围为 C_4-C_{30} , 其中低碳数正构烷烃的严重损耗表明原油遭受了生物降解作用 (3 个)。图 2c 以 DW105-55 井 (200.5~

343.5 m) 的原油为例, 主要特征是原油具有异常高的苯系物和甲基环己烷丰度, 其正构烷烃整体保存相对完整, 常呈正态分布, 但低碳数化合物有部分减少, 表明原油发生了轻度生物降解作用 (8 个)。由于原油降解主要是受喜氧细菌的作用, 当喜氧细菌代谢原油时温度不超过 80 °C, 故埋藏较浅的图 2b 原油较埋藏较深的图 2c 原油降解更严重^[20]。图 2d 为 DW101 井 (1 589.5~1 591.5 m) 康村组的原油, 与其他 3 种类型的差别较大, 主要是该样品低碳数化合物十分丰富, 而高碳数化合物丰度极低, 形成原因可能是原始油藏埋藏更深, 轻组分挥发扩散, 以气态形式运移到现在的圈闭, 经反凝析作用形成原油 (1 个)。

尽管大宛齐原油色谱类型较多, 但仍具有一定的规律性。根据全油色谱分布特征差异性, 将大宛齐原油分为两大类: 正常原油 (70 个) 和被生物降解的原油 (11 个)。总体而言原油遭受生物降解的程度较轻, 且埋藏浅的原油较埋藏深的原油遭受的生物降解作用更强烈。

3.1.2 原油成熟度特征

Thompson^[21] 曾提出利用庚烷值与异庚烷值将原油分为 4 类: 生物降解原油、正常原油、成熟原油和高成熟原油。但大宛齐油田原油主要由其他地区原油运移到大宛齐圈闭聚集成藏, 本身富含轻烃组分, 并且遭受了次生蚀变, 轻烃组分变化较大。王培荣等^[22] 发现经历了蒸发分馏作用的残留油中的正、异庚烷值下降, 从而导致成熟度变低, 相反蒸发分馏作用形成的原油中正、异庚烷值增加, 导致成熟度变高的假象。杨禄等^[17] 在探讨生物降解作用对大宛齐油田库车组原油轻烃参数的影响时, 也

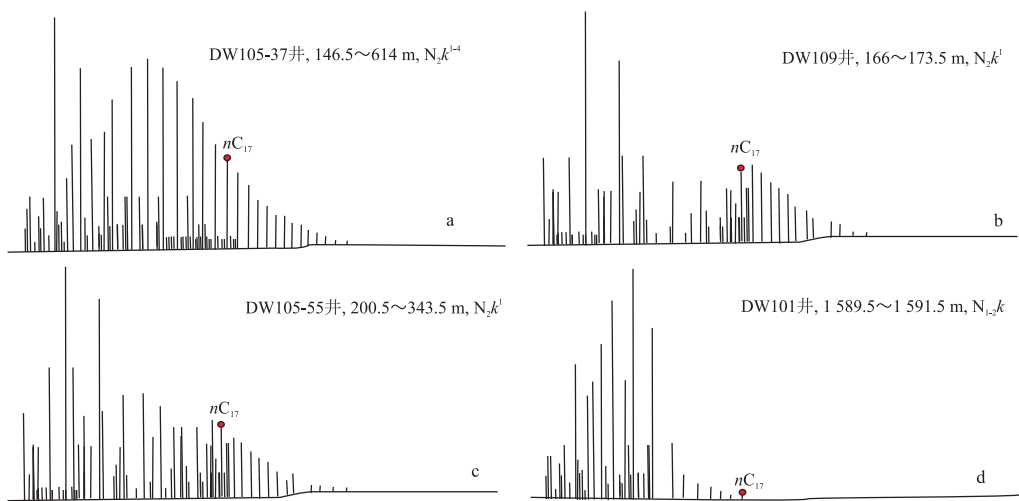


图 2 塔里木盆地大宛齐油田凝析油的全油色谱图

Fig.2 Whole oil gas chromatograms of condensates in Dawanqi oil field, Tarim Basin

提出庚烷值和异庚烷值受生物降解作用的影响,因此庚烷值的相关参数不能反映大宛齐油田原油的真实成熟度。

Mango 等^[23-24] 研究发现,2,4-二甲基戊烷与2,3-二甲基戊烷的比值(2,4-DMP/2,3-DMP)能够有效地反映烃类生成温度,推导出原油最大生成温度(T_{max})的计算公式 $T_{max} = 140 + 15 \ln(2,4-DMP/2,3-DMP)$,该轻烃温度参数受其他因素影响较小,可以将油气最大生成温度折算成相应的镜质体反射率(R_c), $R_c = 0.012 3 T_{max} - 0.676 4$ 。这种方法计算的成熟度受蒸发分馏作用影响较小,具有参考价值,由此推算大宛齐油田原油最大生成温度介于127~132 ℃,计算的成熟度结果见表1(样品编号1~15为大宛齐正常凝析油,16~26为大宛齐油田遭受生物降解的11个凝析油,27~28,29~30分别为大北油田和大宛齐南部地区正常原油)。由表1可知,大宛齐原油成熟度 R_c 分布在0.9%,与大北

油田和大宛齐南部的参照原油成熟度均相近,可以推断大宛齐原油处于成熟阶段。结合大宛齐原油的 C_{29} 甾烷成熟度指标 $\alpha\beta\beta/(\alpha\alpha+\beta\beta)$ 和 $\alpha\alpha\alpha 20S/(20S+20R)$ 可知,原油的甾烷异构化参数分布范围分别为0.44~0.61和0.45~0.54(表1)。黄第藩等^[25] 以甾烷构型演化为基础,提出一套评价体系, $C_{29}\alpha\beta\beta/(\alpha\alpha+\beta\beta)$ 和 $C_{29}\alpha\alpha\alpha 20S/(20S+20R)$ 大于0.42为成熟阶段(R_o 为0.8%),由此可知大宛齐原油均已达到成熟阶段。一般原油在 R_o 约为1.2%时由液态石油开始裂解形成凝析油,故在成熟度为0.9%的原油可能为次生凝析油。

3.2 生物降解作用对原油轻烃组分的影响

3.2.1 生物降解作用对 Mango 轻烃参数和甲基环己烷指数的影响

1987年,Mango^[3] 提出了原油的轻烃参数 $K_1 = (2-MH+2,3-DMP)/(3-MH+2,4-DMP)$,式中:2-MH为2-甲基己烷;2,3-DMP为2,3-二甲基戊

表 1 塔里木盆地大宛齐油田和大北油田以及大宛齐南部典型原油轻烃参数

Table 1 Light hydrocarbon parameters of typical oils in Dawanqi, Dabei oil fields and the south of Dawanqi oil field, Tarim Basin

地区	样品编号	井号	井深/m	层位	$C_{29}\alpha\beta\beta/(\alpha\alpha+\beta\beta)$	$C_{29}\alpha\alpha\alpha 20S/(20S+20R)$	$R_c/\%$	K_1 指数	K_2 指数	备注
大宛齐油田	1	DW1-6	96~620.5	N_2k^{1-5}	0.49	0.59	0.90	1.04	0.13	正常凝析油
	2	DW126	86.5~444.5	N_2k^{1-3}			0.92	1.06	0.14	
	3	DW117	267.5~342.5	N_2k^1			0.93	1.05	0.15	
	4	DW111-7	322.8~460.5	N_2k^{2-3}			0.93	1.06	0.18	
	5	DW111	530.5~533.5	N_2k^3	0.52	0.55	0.90	1.05	0.13	
	6	DW110-2	181~627.5	N_2k^{1-4}			0.93	1.06	0.14	
	7	DW109-81	271~348	N_2k^{1-2}			0.93	1.06	0.18	
	8	DW109-79	331~612.5	N_2k^{2-4}			0.91	1.04	0.14	
	9	DW105-37	146.5~614	N_2k^{1-4}			0.91	1.04	0.14	
	10	DW105-172	639~774	N_2k^{4-5}			0.92	1.05	0.14	
	11	DW101	1 589.5~1 591.5	$N_{1-2}k$	0.50	0.49	0.89	1.03	0.14	
	12	DW126-5	237~783.5	N_2k^{1-4}			0.91	1.04	0.21	
	13	DW109-50	161.5~195.5	N_2k^1	0.54	0.60	0.92	1.09	0.20	
	14	DW105-39	98~263	N_2k^1	0.53	0.59	0.90	0.99	0.14	
	15	DW105-35	115~270.5	N_2k^1	0.54	0.59	0.90	1.00	0.14	
	16	DW111-6	87~183	N_2k^1	0.52	0.55	0.92	0.88	0.30	生物降解凝析油
	17	DW109-55	200.5~343.5	N_2k^1	0.54	0.60	0.92	0.79	0.20	
	18	DW109	166~173.5	N_2k^1	0.48	0.47	0.92	0.91	0.41	
	19	DW105-87	129.5~672	N_2k^{1-4}			0.92	0.94	0.21	
	20	DW105-47	96~179	N_2k^1			0.90	0.69	0.18	
	21	DW105-171	97~473.5	N_2k^{1-3}			0.90	0.57	0.28	
	22	DW105-125	120~175	N_2k^1	0.52	0.58	0.89	0.79	0.20	
	23	DW112-4	103~231	N_2k^1			0.89	1.00	0.22	
	24	DW105-67	126~249	N_2k^1	0.53	0.61	0.91	0.99	0.20	
	25	DW105-59	85.5~717	N_2k^{1-5}			0.91	0.99	0.26	
	26	DW105-20	145.5~675	N_2k^{1-5}			0.92	0.97	0.27	
大北油田	27	大北 1	5 576~5 586	K_1bs	0.45	0.44	0.90	1.05	0.25	正常原油
	28	大北 202	5 711~5 845	K_1bs			0.92	1.05	0.32	
大宛齐南部	29	却勒 1	5 759.1~5 777	E			0.90	1.09	0.28	
	30	羊塔 5	5 294.3~5 325.5	E-K			0.95	1.05	0.34	

烷;3-MH为3-甲基己烷;2,4-DMP为2,4-二甲基戊烷。这4个异庚烷化合物之间无论是相对于样品的质量分数,还是相对于这些化合物的质量分数,均呈一种特定的比例,比值约为1,且保持不变。1990年,Mango^[26]又定义了参数 $K_2 = P_3 / (P_2 + N_2)$,式中: $P_2 = 2$ -甲基己烷+3-甲基己烷; $N_2 = 1,1$ -二甲基环戊烷+1,3-二甲基环戊烷(顺、反); $P_3 = 3$ -乙基戊烷+3,3-二甲基戊烷+2,3-二甲基戊烷+2,4-二甲基戊烷+2,2-二甲基戊烷+2,2,3-三甲基丁烷,用来判断是否为同一种源岩,大大深化和拓展了石油轻烃生成机理的研究。但随着研究地区和样品的日益增加,人们发现 K_1 并不总是约等于1的常数,而存在一定的变化;同时关于 K_2 ,其碳环优势不仅受源岩的影响,次生蚀变作用也会导致其值的变化。如表1所示,选取了26个大宛齐油田原油样品,其中11个遭受生物降解原油和15个正常原油,同时选取了大北油田2个和南部大断裂附近却勒地区、羊塔克地区各1个正常原油作为对照。正常原油的 K_1 值在1.03~1.06,而遭受生物降解的原油 K_1 值则明显减小,相反随生物降解作用增强, K_2 值明显增大,这可能与不同轻烃化合物抗生物降解的能力不同有关。

同时依据胡惕麟等^[27]对甲基环己烷参数的分布及指标的划分,大宛齐油田原油中甲基环己烷(MCH)的含量均大于50%,指示的是滨湖—浅湖的腐殖型有机质来源,并非低成熟阶段富树脂体生成的凝析油^[2,12]。参照前人对于次生凝析油的研究^[28-31],结合大宛齐凝析油的成熟度和母质来源,可以排除凝析油来源于原生凝析油,故可以确定大宛齐凝析油为次生凝析油。

研究大宛齐油田原油的母质来源时,发现甲基环己烷指数受生物降解作用的影响。根据大宛齐油田26个原油样品 C_7 化合物(正庚烷 nC_7 、MCH、二甲基环戊烷DMCP)组成特征绘制的三角图(图3),正常原油甲基环己烷指数均大于50%,其中大

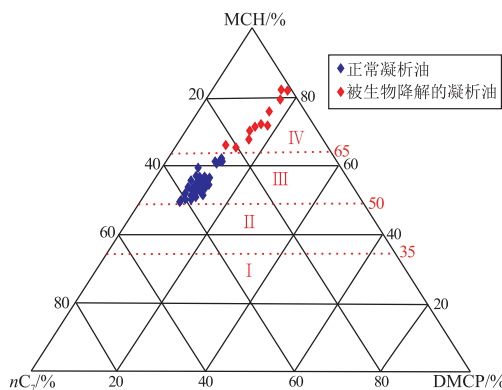


图3 塔里木盆地大宛齐油田原油 C_7 化合物组成三角图
Fig.3 Ternary diagram of C_7 for condensates in Dawanqi oil field, Tarim Basin

部分值都在50%~65%,落在Ⅲ区,指示研究区原油的母质来源;另外有11个样品落在Ⅳ区,在全烃色谱中对应的是正构烃低碳数被损耗的样品,因此被认为是次生蚀变生物降解作用导致。由此可知,生物降解作用会使甲基环己烷指数增大。

3.2.2 生物降解作用对烷基化程度不同烃类的影响

George等^[11]通过研究轻度—中度微生物降解作用对同一来源18个原油中 C_5-C_9 轻烃的影响,提出了对于环状结构、支链结构和芳香结构的低分子量烃而言,抗生物降解的能力主要受化合物的碳骨架结构、烷基化程度和烷基化位置这3个因素的影响。杨禄等^[18]以大宛齐油田为例,深入研究了原油中 C_7 烃类烷基取代位不同的化合物抗生物降解强弱。本次研究则主要探讨生物降解作用对不同烷基化程度取代基的影响。图4为大宛齐油田26个原油样品烷基化程度不同的环戊烷化合物百分含量图(原油样品编号与表1相同),分别为环戊烷(CP)、甲基环戊烷(MCP)和乙基环戊烷(ECP)。正常原油(样品编号1~15)甲基环戊烷含量最高,乙基环戊烷含量次之,环戊烷含量最低;遭受生物降解作用的原油(样品编号16~26)乙基环戊烷含量最高,甲基环戊烷含量次之,环戊烷含

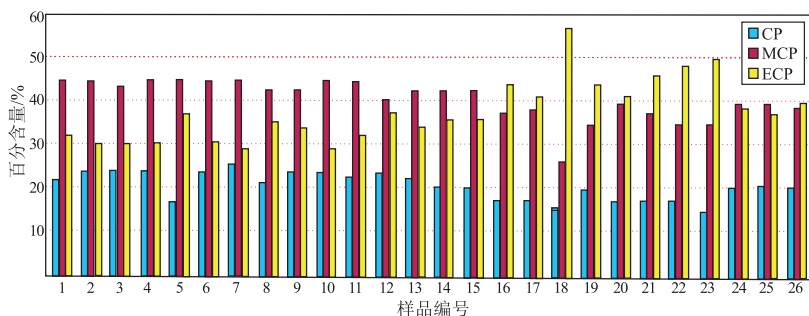


图4 塔里木盆地大宛齐油田原油烷基环戊烷相对含量

Fig.4 Relative abundance of alkylcyclopentanes for condensates in Dawanqi oil field, Tarim Basin

量仍然最低。表明随着原油遭受生物降解作用的增强,乙基环戊烷相对含量较环戊烷和甲基环戊烷的含量明显增大,占主导地位,说明甲基环戊烷的抗生物降解能力比乙基环戊烷弱。这一现象说明相同碳骨架化合物其烷基化程度越大,即取代基越大,该化合物抗生物降解能力越强。

3.2.3 生物降解作用对不同碳结构烃类的影响

前人研究表明,生物的降解作用是一个准阶梯式的过程,烃类化合物会依不同的优先次序被消耗掉^[10]。石油组分中首先被降解的是正构烷烃,随之为异构烷烃。图 5 为遭受生物降解的原油与正常原油轻烃 C₄-C₆化合物相对含量对比图。由图 5a 与图 5b 可知,随生物降解作用加强,3-甲基戊烷(3MP)较 2-甲基戊烷(2MP)相对含量更高,说明 3-甲基戊烷的抗生物降解作用更强,与杨禄等^[18]探究的 C₇化合物中 3-甲基己烷(3MH)较 2-甲基己烷(2MH)抗微生物降解能力强的结论一致。由图 5a 与图 5c 可知,遭受生物降解原油的异戊烷/正戊烷(*i*C₅/*n*C₅)比值远大于正常原油,而遭受生物降解原油的异丁烷/正丁烷(*i*C₄/*n*C₄)比值与正常原油相比较,这可能由碳结构的不同导致。因此 *i*C₅/*n*C₅ 比值较 *i*C₄/*n*C₄ 比值更易于指示生物降解作用,图 5a 中 2 个正常点与其他正常原油点分离可能是由于 C₄ 化合物更易挥发造成的误差。由此可知,生物降解作用对不同碳环结构的烃类有不同的影响,同时取代基靠近两端的化合物较取代基在中间的化合物更容易遭受生物降解作用。

3.3 蒸发分馏作用对原油轻烃组分的影响

蒸发分馏作用是指下伏高成熟源岩生成的大

量天然气进入已生成的油藏,在储层高温高压条件下对已生成的原油进行溶解,并将溶解于其中的原油轻馏分甚至中等分子量烃类在压力平衡破坏的条件下,沿断裂不整合面等运移通道“携带”至条件适宜的储层,形成凝析油、轻质油藏的分馏过程^[13]。国内马柯阳^[13]最早应用蒸发分馏机理对塔北隆起的凝析气藏成因进行了解释,之后张水昌^[32]提出储层连通的断层或断裂的发育以及过量外来气的注入是运移分馏作用形成凝析油气藏的重要条件。何文祥等^[33]通过正构烷烃摩尔分数的对数值与其碳数呈线性关系,判断原油是否遭受运移分馏作用;祁灵^[34]在探究库车坳陷原油地化特征时,揭示大宛齐原油经过蒸发分馏作用;龚德瑜等^[35]通过分析库车坳陷 12 个油气田(藏)21 个凝析油样品,揭示库车坳陷凝析油普遍经历了蒸发分馏作用。根据经典的石油生成理论,认为原生凝析油是成岩作用晚期高成熟阶段(*R*_o>1.2%)干酪根降解或早期大分子烃类热裂解的产物。参考 Snowdon 等^[2,9]提出的由陆源高等植物的分散树脂体等显微组分直接生成未成熟凝析油(0.4%<*R*_o<0.6%)的模式,结合前文折算的凝析油镜质体反射率(*R*_e=0.9%)和甲基环己烷指数指示的母质来源类型,可以确定大宛齐原油是由蒸发分馏作用所形成的次生凝析油。

轻烃参数对比揭示大宛齐油田原油(81 个样品)有 2 种来源,参照大北地区(2 个)和南部地区(2 个)正常原油,用轻烃参数环己烷/甲基环戊烷(CH/MCP)与甲基环己烷/二甲基环戊烷(MCH/DMCP)来区分原油来源(图 6)。大多数原油中环

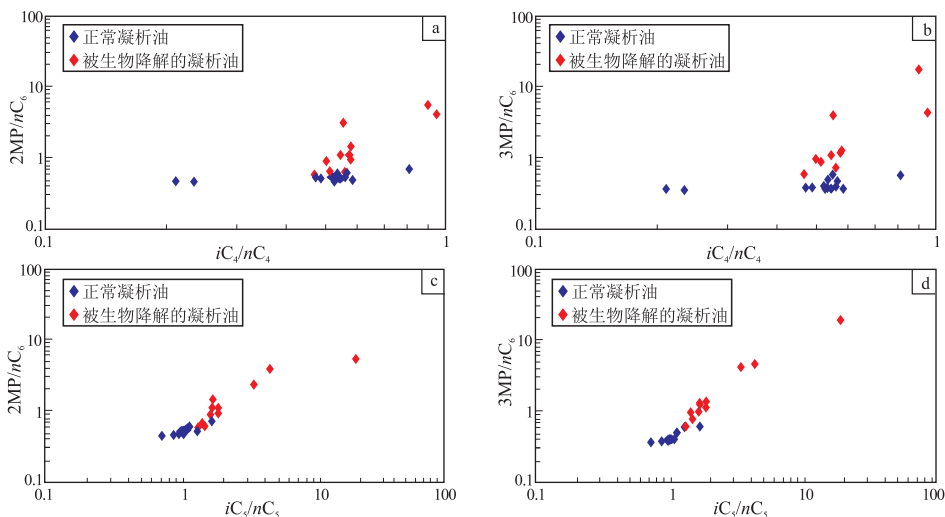


图 5 塔里木盆地大宛齐油田原油异丁(戊)烷/正丁(戊)烷和 2(3)-甲基戊烷/正己烷相关关系

Fig.5 Iso-butane (pentane)/n-butane (pentane) vs. 2(3)-methylpentane/n-hexane for condensates in Dawanqi oil field, Tarim Basin

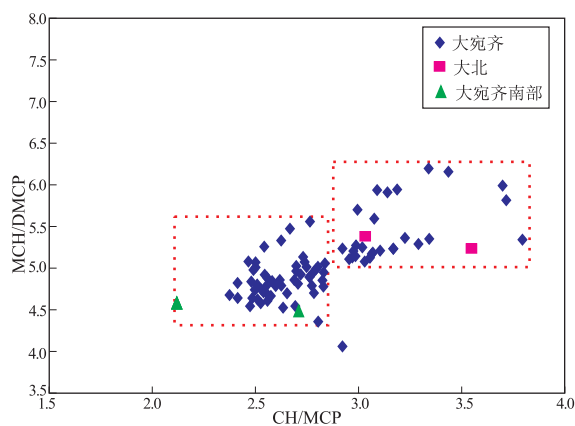


图6 塔里木盆地大宛齐油田原油来源分类

Fig.6 Classification of oil source for condensates in Dawanqi oil field, Tarim Basin

己烷/甲基环戊烷值与南部地区相似,在2.1~2.8之间,为南部地区原油蒸发分馏作用形成;另一部分环己烷/甲基环戊烷值在2.8~3.8之间,与大北地区相近,表明来源于大北地区。总体来说大宛齐原油是由大北地区和南部地区2种油源经过蒸发分馏作用在大宛齐浅部成藏。杨禄等^[16]通过运用Mango轻烃参数二甲基环戊烷/甲基环戊烷比值(DMCYC₅/MCYC₆)与甲基环戊烷/环己烷比值(MCYC₅/CYC₆),揭示了大宛齐原油的区域性差异,与本次研究得出的结论一致。

根据大宛齐油气运移方向研究报告^[36],结合塔里木盆地大宛齐油田地质背景,发现现有大宛齐油气藏与库车坳陷三叠—侏罗系烃源岩早油晚气的生烃史不符,而是经下部地层后期高一过成熟气洗,从而在上部地层中重新成藏的结果。通过对研究区地质背景的研究,从图7可看出原油的运移分布路线与断裂带剖面位置,大宛齐原油是由大北地区和大宛齐南部地区两类原油通过深大断裂运移分馏到库车组底部后,再通过蒸发分馏作用至大

宛齐浅部成藏。根据前人对库车坳陷原油的地球化学研究及油源对比,根据生物标志化合物特征特别是萜烷系列,大宛齐油田原油可分为两类:第一类原油具有高伽马蜡烷、低重排藿烷、三环萜烷呈 $C_{19} < C_{20} < C_{21} > C_{23}$ 的分布特征,该类原油总体上与北部大北地区的原油相同,可能来源于上三叠统黄山街组烃源岩;第二类原油具有低伽马蜡烷、高重排藿烷、三环萜烷呈 $C_{19} > C_{20} > C_{21} > C_{23}$,以及含有一定丰度的 C_{30} 未知三环萜烷的分布特征,该类原油与南部地区却勒1井等原油的组成相似,可能来源于中侏罗统恰克马克组烃源岩^[16,37-40]。

结合图6和图7可知,第一类原油是由大北地区原油经过运移分馏作用形成的,大宛齐南部地区原油不仅运移到宛齐油田经过蒸发分馏作用形成第二类原油,同时也运移到达却勒1井的下部,故却勒1井原油与大宛齐第二类原油地化特征相似。两类原油在运移方向上的差异和轻烃地球化学属性表明,大宛齐原油来源于大北油田和大宛齐南部地区。

4 结论

(1) 全油色谱分析发现,大宛齐油田81个原油普遍含有较高苯系物,大多数原油样品具有前峰型特征,部分埋藏较浅的原油样品表现出遭受生物降解作用的分布形态。结合Mango等提出的轻烃成熟度参数的计算结果可知,原油折算镜质体反射率均为0.9%左右,表明大宛齐油田原油为成熟阶段的产物。

(2) 随微生物降解作用增强,大宛齐油田原油样品Mango轻烃参数 K_1 值减少, K_2 值和甲基环己烷指数随之增大,不同碳环结构的烃类遭受不同程度的降解,同时遭受生物降解作用的原油甲基环戊烷相对含量减少,乙基环戊烷相对含量增大,表明

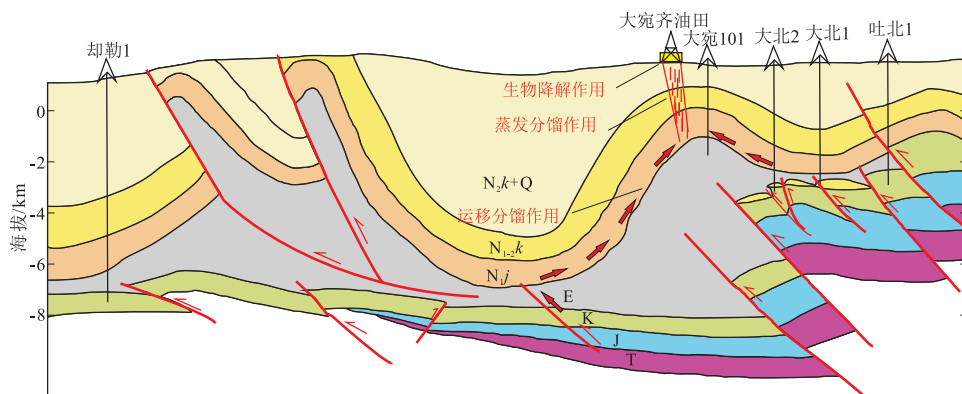


图7 塔里木盆地大宛齐油田原油成藏模式

Fig.7 Hydrocarbon accumulation pattern for condensates in Dawanqi oil field, Tarim Basin

烷基环戊烷中取代基越大的烃类越难遭受生物降解。

(3) 结合轻烃参数指示的原油成熟度和母质来源可知, 研究区原油是由蒸发分馏作用形成的次生凝析油。大宛齐油田原油和大北油田及其南部地区正常原油的轻烃参数对比发现, 研究区与对比地区原油轻烃地球化学特征相似。根据塔里木盆地大宛齐油田的构造特征和原油成藏模式可知, 大宛齐油田原油是来自大北油田和大宛齐南部地区的两类原油通过深大断裂运移到大宛齐浅部成藏。

参考文献:

- [1] Schaefer R G, Leythaeuser D. Analysis of trace amounts of hydrocarbons (C_2-C_8) from rock and crude oil samples and its application in petroleum geochemistry[J]. *Physics & Chemistry of the Earth*, 1980, 12: 149-156.
- [2] Snowdon L R, Powell T G. Immature oil and condensate; modification of hydrocarbon generation model for terrestrial organic matter[J]. *AAPG Bulletin*, 1982, 66(6): 755-788.
- [3] Mango F D. An invariance in the isoheptanes of petroleum[J]. *Science*, 1987, 237(4814): 514-517.
- [4] Thompson K F M. Light hydrocarbons in subsurface sediments[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1979, 43(5): 657-672.
- [5] 戴金星. 利用轻烃鉴别煤成气和油型气[J]. *石油勘探与开发*, 1993, 20(5): 26-32.
Dai Jinxing. Identification of coal formed gas and oil type gas by light hydrocarbons[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 1993, 20(5): 26-32.
- [6] 程克明, 金伟明, 何忠华, 等. 陆相原油及凝析油的轻烃单体组成特征及地质意义[J]. *石油勘探与开发*, 1987, 14(1): 34-43.
Cheng Keming, Jin Weiming, He Zhonghua, et al. Composition characteristics of light hydrocarbons in continental oil and condensate and their geological significance[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 1987, 14(1): 34-43.
- [7] Mango F D. The light hydrocarbons in petroleum; A critical review[J]. *Organic Geochemistry*, 1997, 26(7/8): 417-440.
- [8] 蒋启贵, 张彩明, 张美珍, 等. 岩石 C_6-C_{15} 轻烃定量分析方法研究[J]. *石油实验地质*, 2007, 29(5): 512-515.
Jiang Qigui, Zhang Caiming, Zhang Meizhen, et al. Research on the quantitative analysis method of C_6-C_{15} light hydrocarbon in source rock samples[J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2007, 29(5): 512-515.
- [9] Tissot B P, Welte D H. *Petroleum formation and occurrence*[M]. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 1978: 129-131.
- [10] Peters K E, Walters C C, Moldowan J M. *The biomarker guide (volume 1). Biomarkers and isotopes in the environment and human history*[M]. 2nd ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2007: 490.
- [11] George S C, Boreham C J, Minifie S A, et al. The effect of minor to moderate biodegradation on C_5 to C_9 hydrocarbons in crude oils[J]. *Organic Geochemistry*, 2002, 33(12): 1293-1317.
- [12] 卢松年, 张刚. 一种新的凝析油形成模式[J]. *中国科学(B辑)*, 1994, 24(1): 81-86.
Lu Songnian, Zhang Gang. A new genesis mode of condensate[J]. *Science in China (Series B)*, 1994, 24(1): 81-86.
- [13] 马柯阳. 凝析油形成新模式: 原油蒸发分馏机制研究[J]. *地球科学进展*, 1995, 10(6): 567-571.
Ma Keyang. Study on petroleum evaporative fractionation: A new mechanism for the generation of condensate[J]. *Advance in Earth Sciences*, 1995, 10(6): 567-571.
- [14] 傅宁, 李友川, 陈桂华, 等. 东海西湖凹陷油气“蒸发分馏”成藏机制[J]. *石油勘探与开发*, 2003, 30(2): 39-42.
Fu Ning, Li Youchuan, Chen Guihua, et al. Pooling mechanisms of “evaporating fractionation” of oil and gas in the Xihu Depression, East China Sea[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2003, 30(2): 39-42.
- [15] 纪红, 黄光辉, 成定树. 大宛齐油田原油轻烃地球化学研究[J]. *石油天然气学报*, 2014, 36(2): 23-26.
Ji Hong, Huang Guanghui, Cheng Dingshu. Geochemical characteristics of light hydrocarbons in Dawanqi oilfield[J]. *Journal of Oil and Gas Technology*, 2014, 36(2): 23-26.
- [16] 杨禄, 张春明, 李美俊, 等. Mango 轻烃参数在塔里木盆地大宛齐油田中的应用[J]. *天然气地球科学*, 2016, 27(8): 1524-1531.
Yang Lu, Zhang Chunming, Li Meijun, et al. Application of Mango's light hydrocarbon parameters in Dawanqi oilfield, Tarim Basin, China[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2016, 27(8): 1524-1531.
- [17] 杨禄, 李美俊, 张春明. 生物降解作用对大宛齐油田库车组原油轻烃参数的影响[J]. *高校地质学报*, 2016, 22(3): 549-554.
Yang Lu, Li Meijun, Zhang Chunming. Influence of biodegradation on light hydrocarbon parameters in crude oil of Kuqa Formation from Dawanqi oilfield[J]. *Geological Journal of China Universities*, 2016, 22(3): 549-554.
- [18] 杨禄, 张春明, 李美俊, 等. 轻度微生物降解作用对原油中 C_7 轻烃的影响: 以大宛齐油田为例[J]. *地球化学*, 2015, 44(5): 485-492.
Yang Lu, Zhang Chunming, Li Meijun, et al. Influence of slight biodegradation on C_7 hydrocarbons in crude oils: A case study of Dawanqi oilfield in Tarim Basin[J]. *Geochimica*, 2015, 44(5): 485-492.
- [19] Yang Lu, Zhang Chunming, Li Meijun, et al. The effect of slight to minor biodegradation on C_6 to C_7 light hydrocarbons in crude oils: A case study from Dawanqi oilfield in the Tarim Basin, NW China[J]. *Acta Geochimica*, 2016, 35(2): 203-214.
- [20] 卢双舫, 张敏. *油气地球化学*[M]. 北京: 石油工业出版社, 2008.
Lu Shuangfang, Zhang Min. *Oil and gas geochemistry*[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2008.
- [21] Thompson K F M. Classification and thermal history of petroleum based on light hydrocarbons[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1983, 47(2): 303-316.
- [22] 王培荣, 徐冠军, 张大江, 等. 常用轻烃参数正、异庚烷值应用中的问题[J]. *石油勘探与开发*, 2010, 37(1): 121-128.
Wang Peirong, Xu Guanjun, Zhang Dajiang, et al. Problems with

- application of heptane and isoheptane values as light hydrocarbon parameters [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2010, 37(1): 121-128.
- [23] Mango F D. The origin of light hydrocarbons in petroleum: Ring preference in the closure of carbocyclic rings [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1994, 58(2): 895-901.
- [24] Bement W O, Levey R A, Mango F D. The temperature of oil generation as defined with C_7 chemistry maturity parameter (2, 4-DMP/2, 3-DMP) [M]. *Donostian-San Sebastian; European Association of Organic Geochemists*, 1995: 505-507.
- [25] 黄第藩, 李晋超, 张大江, 等. 柴达木盆地第三系原油的熟化序列及其在石油资源预测中的重要意义 [J]. *石油学报*, 1989, 10(3): 1-11.
- Huang Difan, Li Jinchao, Zhang Dajiang, et al. The maturation series of Tertiary crude oil from Qaidam Basin and its significance in forecasting petroleum resources [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 1989, 10(3): 1-11.
- [26] Mango F D. The origin of light hydrocarbons in petroleum: A kinetic test of the steady-state catalytic hypothesis [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1990, 54(5): 1315-1323.
- [27] 胡惕麟, 戈葆雄, 张义纲, 等. 源岩吸附烃和天然气轻烃指纹参数的开发和应用 [J]. *石油实验地质*, 1990, 12(4): 375-394.
- Hu Tilin, Ge Baoxiong, Zhang Yigang, et al. The development and application of fingerprint parameters for hydrocarbons absorbed by source rocks and light hydrocarbons in natural gas [J]. *Experimental Petroleum Geology*, 1990, 12(4): 375-394.
- [28] Curiale J A, Bromley B W. Migration induced compositional changes in oils and condensates of a single field [J]. *Organic Geochemistry*, 1996, 24(12): 1097-1113.
- [29] Dzou L I P, Hughes W B. Geochemistry of oils and condensates, K field, offshore Taiwan: A case study in migration fractionation [J]. *Organic Geochemistry*, 1993, 20(4): 437-462.
- [30] Thompson K F M. Gas-condensate migration and oil fractionation in deltaic systems [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 1988, 5(3): 237-246.
- [31] Thompson K F M. Fractionated aromatic petroleum and the generation of gas-condensates [J]. *Organic Geochemistry*, 1987, 11(6): 573-590.
- [32] 张水昌. 运移分馏作用: 凝析油和蜡质油形成的一种重要机制 [J]. *科学通报*, 2000, 45(6): 667-670.
- Zhang Shuichang. The migration fractionation: An important mechanism in the formation of condensate and waxy oil [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2000, 45(14): 1341-1344.
- [33] 何文祥, 王培荣, 潘贤庄, 等. 莺—琼盆地原油的蒸发分馏作用 [J]. *石油勘探与开发*, 2004, 31(4): 52-54.
- He Wenxiang, Wang Peirong, Pan Xianzhuang, et al. Evaporative fractionation of crude oils in the Ying-Qiong Basin [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2004, 31(4): 52-54.
- [34] 祁灵. 库车坳陷原油中重排藿烷类化合物的组成特征与成因探讨 [D]. 荆州: 长江大学, 2015.
- Qi Ling. Distribution characteristics and genesis of rearrangement hopane compounds in crude oil from Kuqa Depression [D]. Jingzhou: Yangtze University, 2015.
- [35] 龚德瑜, 于聪, 杨曦, 等. 库车坳陷凝析油地球化学特征及其蒸发分馏机制 [C] // 第十四届全国有机地球化学学术会议论文集. 珠海: 中国地质学会, 2013.
- Gong Deyu, Yu Cong, Yang Xi, et al. Geochemical characteristics and formation mechanism of condensates from Kuqa Depression [C] // The 13th National Meeting on Organic Geochemistry in China. Zuhai: Geological Society of China, 2013.
- [36] 张敏. 大宛齐油气运移方向研究 [R]. 武汉: 长江大学, 2009.
- Zhang Min. The study of migration direction of hydrocarbon from Dawanqi oilfield [R]. Wuhan: Yangtze University, 2009.
- [37] 肖中尧, 黄光辉, 卢玉红, 等. 库车坳陷却勒1井原油的重排藿烷系列及油源对比 [J]. *石油勘探与开发*, 2004, 31(2): 35-37.
- Xiao Zhongyao, Huang Guanghui, Lu Yuhong, et al. Rearranged hopanes in oils from the Quele 1 well, Tarim Basin, and the significance for oil correlation [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2004, 31(2): 35-37.
- [38] 詹兆文, 包建平, 朱翠山, 等. 库车坳陷却勒1油藏原油地球化学特征与来源研究 [J]. *石油天然气学报 (江汉石油学院学报)*, 2011, 33(5): 22-26.
- Zhan Zhaowen, Bao Jianping, Zhu Cuishan, et al. Geochemical characteristics and origins of crude oil from Quele-1 reservoir in Kuqa Depression [J]. *Journal of Oil and Gas Technology (Journal of Jiangnan Petroleum Institute)*, 2011, 33(5): 22-26.
- [39] 卓勤功, 赵孟军, 谢会文, 等. 库车前陆盆地大北地区储层沥青与油气运聚关系 [J]. *石油实验地质*, 2011, 33(2): 193-196.
- Zhuo Qingong, Zhao Mengjun, Xie Huiwen, et al. Relationship between reservoir bitumen and hydrocarbon migration in Dabei region, Kuqa Foreland Basin [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2011, 33(2): 193-196.
- [40] 卓勤功, 李勇, 鲁雪松, 等. 克拉苏构造带凝析油特征及其对油气成藏的指示意义 [J]. *天然气地球科学*, 2012, 23(6): 1097-1103.
- Zhuo Qingong, Li Yong, Lu Xuesong, et al. Condensate characteristics and its significance for hydrocarbon accumulation in the Kelasu structural belt [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2012, 23(6): 1097-1103.

(编辑 韩 或)