

查干凹陷下白垩统稠油地球化学特征及成因分析^①

王朋^{1,2} 柳广弟^{1,2} 曹喆^{1,2} 苏惠³ 牛子铖^{1,2} 张婧雅^{1,2} 罗文斌^{1,2}

(1.油气资源与探测国家重点实验室 北京 102249;2.中国石油大学(北京)地球科学学院 北京 102249;

3.中国石化中原油田分公司勘探开发科学研究院 河南濮阳 457001)

摘要 通过对稠油进行常规物性、碳同位素和有机地球化学分析,系统阐述了查干凹陷稠油地化特征及其形成的主控因素。查干凹陷存在原生和次生两类稠油,原生稠油非烃含量高于饱和烃含量,原油族组分富集轻碳同位素, C₂₉规则甾烷系列中以 $\alpha\alpha\alpha$ 构型为主, $\alpha\beta\beta$ 构型甾烷含量低,没有重排甾烷。三环萜/五环萜值低,伽马蜡烷含量高,姥植比值低,其成烃母质沉积于高盐还原环境,多种地化参数表明原生稠油是巴音戈壁组烃源岩低熟演化阶段排烃的产物。次生稠油为油气运聚成藏之后,由于后期保存条件改变并经历次生改造作用形成的高密度、高黏度和低凝固点的原油。次生稠油埋深一般小于1 200 m,主要为生物降解油,其中部分属于多期混源稠油。次生稠油正构烷烃损失严重,类异戊二烯烃不同程度遭受侵蚀,甾萜烷分布完整,表征原油达到中等降解程度。研究表明,原油稠化是多种稠化因素共同作用的结果,生物降解作用是研究区稠油形成的主要机制,查干凹陷后期的构造抬升为原油稠化提供了必要条件,活跃的水介质条件为浅层喜氧微生物活动提供了良好的氧化环境和营养物质。

关键词 稠油成因 生物降解作用 原生稠油 下白垩统 查干凹陷

第一作者简介 王朋 男 1989年出生 硕士 油气藏形成机理与分布 E-mail: wangpeng6055@163.com

通讯作者 柳广弟 男 教授 E-mail: lgd@cup.edu.cn

中图分类号 P618.13 **文献标识码** A

0 引言

稠油资源在世界石油储量中占据主导地位,其资源量远大于常规油气资源。在南北美洲前陆盆地,稠油主要赋存于埋藏较浅的砂岩储层中^[1]。在我国塔里木、松辽、准噶尔、渤海湾和江汉等含油气盆地也发现规模较大的稠油资源,主要分布于从中元古代至古近纪的碎屑岩、碳酸盐岩及火山岩储层。世界重质稠油储量巨大,对今后油气勘探方向将产生不可忽视的作用^[2]。可见研究稠油地质、地化特征及其成因机理,对稠油的勘探及开发具有重要意义。稠油分类标准很多,前人主要根据原油地球化学特征将其分为原生和次生两种成因类型。原生型稠油主要指低熟阶段的烃源岩生成的原油,这种原油一般具有原地或近源成藏的特点,运移过程中仅发生物理分异作用^[3-4];次生型稠油一般指原油遭受生物降解、水洗和氧化等化学作用而发生稠化,导致原油部分组分减少或缺失^[5-8]。烃源岩有机质类型和热演化程度对原生型稠油成分和物理性质具有一定的控制作用,生物降解、水洗和氧化等作用则被认为是次生型稠油形成的主

要机制^[3-8]。

查干凹陷历经半个多世纪的油气勘探,前人对研究区构造演化、层序地层、沉积演化及烃源岩特征等已进行过相关研究和报道^[9-10],但对该区油气成因尤其是稠油成因仍然认识不清。本文在前人研究成果的基础上,利用原油常规物性、族组分碳同位素、正构烷烃和生物标志化合物等分析,系统阐述了研究区稠油地球化学特征,并对其成因展开探讨,为查干凹陷地质研究和油气勘探提供地球化学依据。

1 研究区地质背景

查干凹陷是银根—额济纳旗盆地东部典型的箕状富生油断陷,在构造上处于西伯利亚板块与华北板块的挤压碰撞缝合处,其北东长约60 km,南西宽约34 km,总勘探面积约为2 000 km²。查干凹陷自西向东依次为西部次凹、毛敦次凸和东部次凹^[9],其中不同次级凹陷或凸起又可划分为若干个次级构造带(图1),本文研究的稠油区主要分布于西部次凹。燕山运动以来至今,研究区主要经历走滑拉分断陷期—断拗转换期—拗陷期—挤压反转期四个演化阶段,地

^①国家自然科学基金面上项目(批准号:41472114)资助
收稿日期:2014-11-17;收修改稿日期:2015-01-06

层以陆源碎屑岩和火山岩沉积为主,自上而下依次为新生界第四系、第三系,上白垩统乌兰苏海组和下白垩统银根组(K_1y)、苏红图组(K_1s)及巴音戈壁组(K_1b)^[10]。其中,巴音戈壁组以半深湖—深湖相沉积为主,按岩性和岩相特征自下而上可进一步划分为巴一段(K_1b_1)和巴二段(K_1b_2);苏红图组以滨浅湖相和火山岩沉积,可划分为苏一段(K_1s_1)和苏二段(K_1s_2);银根组和乌兰苏海组主要发育浅湖相、河流相和三角洲相沉积。巴一段、巴二段和苏一段暗色泥岩为研究区三套烃源岩层,烃源岩的广泛分布使查干凹陷具备油气成藏的物质基础。近年来在查干凹陷的勘探取得了重大突破,发现了一些列商业性油气藏,其类型以构造和岩性油气藏为主,其中不少为稠油油藏。查干凹陷所处构造位置较为特殊,自燕山运动尤其是喜山运动以来,查干凹陷分别在苏红图组末期、银根组末期和乌兰苏海组末期发生三次较明显的构造抬升剥蚀,其中银根组末期剥蚀量最大,多期构造运动对研究区油气的运移、聚集和保存产生了深远的影响。

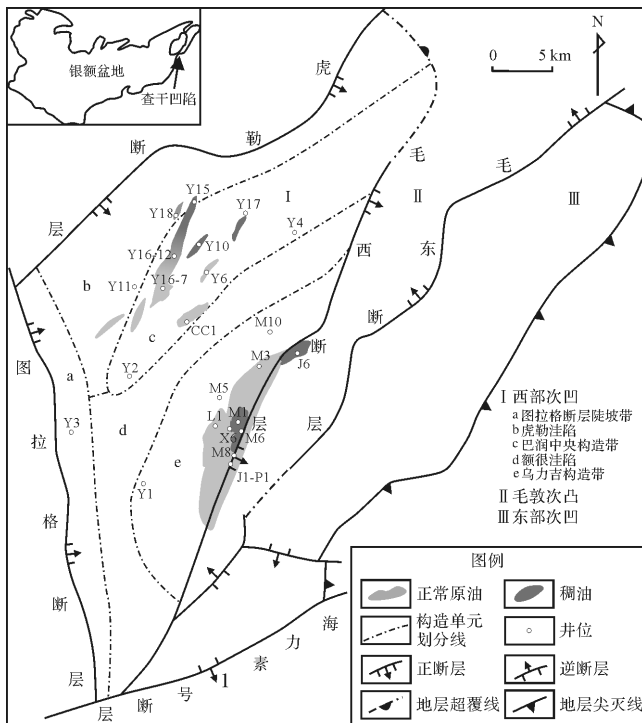


图1 查干凹陷原油分布特征(据文献[10]修改)

Fig.1 Distribution of oils in Chagan depression

2 样品与实验

本次研究共采集查干凹陷巴润中央构造带和乌力吉构造带的18个原油样品,样品放置在30 mL玻

璃瓶中保存。为了防止样品污染,装样前使用 CH_2Cl_2 冲洗玻璃瓶,装样后在瓶口垫置锡箔纸。样品采集后,保存在 $-6^{\circ}C$ 的冰柜中。首先利用石油醚沉淀除去样品中的沥青质,然后通过氧化铝/硅胶柱将可溶部分进行族组分层析分离,并用石油醚、二氯甲烷和甲醇分别洗脱饱芳非组分,最后对所有样品进行族组分碳同位素和饱和烃和芳香烃GC-MS分析。族组分碳同位素由MAT 252碳同位素分析仪测定, $\delta^{13}C$ 值相对国际PDB标准测定,精度小于 $\pm 0.3\text{‰}$ 。在中国石油大学(北京)重质油国家重点实验室使用配备HP-5MS弹性石英毛细柱($60\text{ m}\times 0.25\text{ mm}\times 0.25\text{ }\mu\text{m}$)的Agilent7890-5975c气相色谱质谱联用仪完成饱和烃和芳香烃GC-MS分析测试,其分析测试与柳广弟^[11]的流程一致。

3 结果与讨论

3.1 原油地球化学特征

通过常规物性、族组分碳同位素、正构烷烃和生物标志化合物等分析,系统阐述了稠油基本地化特征及其成烃母质的生源类型、沉积环境和成熟度等特征,为研究区稠油成因分析提供理论依据。

3.1.1 物性特征

目前查干凹陷存在正常原油、原生稠油和次生稠油等原油类型,正常原油一般紧邻生烃中心分布,而稠油则远离生烃中心沿正常原油外侧呈半环带状分布,即从查干凹陷生烃中心向凹陷边缘,从深部向浅部原油性质表现为规律性变好。稠油相对密度、黏度($50^{\circ}C$)与深度的交会关系表明,次生稠油主要分布在凹陷斜坡带 $700\sim 1\ 200\text{ m}$ 范围内,而原生稠油分布层位深度较大。查干凹陷稠油密度为 $0.940\sim 0.990\text{ g/cm}^3$, $50^{\circ}C$ 时黏度为 $520.0\sim 4\ 050.0\text{ mPa}\cdot\text{s}$,含蜡量为 $1.0\%\sim 12.5\%$,凝固点为 $10^{\circ}C\sim 15^{\circ}C$,表现为中质偏重稠油。对比稠油与正常原油的物理性质和族组分分析资料可以发现,稠油明显表现出密度和黏度高、凝固点和饱芳比低的特征(表1)。

一般来说,原油的密度和黏度主要受其中非烃和沥青质等极性杂原子化合物含量的影响^[3]。研究区正常原油族组分中饱和烃和芳香烃总含量占绝对优势($>80\%$),非烃和沥青质的含量低于 20% ;相反,稠油族组分中非烃和沥青质含量则高于 30% ,而饱和烃和芳香烃含量普遍低于 60% (表1)。浅部生物降解原油在遭受次生变化过程中,会引起正构、异构烷烃等轻质组分逐步损失,而重质馏分如极性含氮化合

表 1 查干凹陷部分原油常规物性及族组分特征

Table 1 Physical properties and group compositions for the selected oils from Chagan Depression

井号	深度 /m	层位	密度 /g/cm ³	黏度 /mPa·s	含蜡量 (%)	凝固点 /℃	饱和烃 /%	芳香烃 /%	非烃 /%	沥青质 /%	饱/芳	备注
M3	1 915.0	K _{1s1}	0.850	6.82	13.1	18	71.31	12.12	14.52	2.05	5.88	正常原油
M1	2 045.6	K _{1b2}	0.837	5.13	12.7	21	71.77	13.19	10.29	4.75	5.44	
L1	3 339.9	K _{1b2}	0.816	3.13	11.6	29	84.96	7.12	7.12	0.80	11.93	
X6	2 372.6	K _{1b2}	0.828	4.26	13.5	19	72.67	13.16	13.36	0.81	5.52	
M8	915.5	K _{1y}	0.946	1 184.40	1.8	6	48.17	17.54	23.82	10.47	2.75	次生稠油
J2-P1	1 158.68	K _{1y}	0.945	850.00	3.2	11	47.20	16.15	28.89	7.76	2.92	
J1-P1	1 010.0	K _{1y}	0.963	1 189.13	1.6	15	54.14	15.37	26.00	4.49	3.52	
M1	1 185.4	K _{1s2}	0.946	4 042.00	7.1	10	46.02	16.22	26.55	11.21	2.84	
M6	1 174.0	K _{1s2}	0.984	524.50	1.1	13	53.81	15.45	23.34	7.40	3.48	
J12	1 200.0	K _{1s2}	0.979	2 500.00	2.8	12	35.16	15.11	39.57	10.16	2.33	
Y6	2 420.5	K _{1b2}	0.955	2 610.00	12.1	/	33.86	14.70	50.66	0.79	2.30	原生

物和沥青质则逐渐相对增加,原油分子间的相互吸引力增强导致生物降解稠油密度高、黏度大^[3]。另外,稠油族组分相对含量表明,浅部生物降解稠油非烃含量低,沥青质含量高,而深部原生稠油则表现为相反的特征。一般认为非烃含量高是原油成熟度低造成的,C₂₉规则甾烷成熟度参数和异构化指标均表明原生稠油属于低熟原油,这也与由芳烃甲基菲指数折算的镜质体反射率特征一致。浅部原油遭受过生物降解作用,微生物(细菌)优先消耗正构烷烃后引起类异戊二烯烃的相对富集,进而导致原油凝固点降低。

3.1.2 碳同位素特征

原油及其族组分碳同位素值受烃源岩成熟度的影响一般不超过2‰,原油在运移过程中或聚集成藏之后,次生作用(生物降解、水洗和氧化)也会引起原油碳同位素的分馏^[12]。研究发现,细菌在降解原油过程中时,优先选择性消耗富δ¹²C的化合物或组分,

引起δ¹³C的相对富集,进而导致原油碳同位素变重^[12]。查干凹陷银根组稠油饱和烃碳同位素值介于-34‰~-32‰,苏二段稠油饱和烃碳同位素值介于-36‰~-34‰,巴二段稠油饱和烃碳同位素值则小于-36‰(图2)。巴润中央构造带巴二段原生稠油族组分碳同位素最轻,表明其良好的低成熟特征。银根组稠油族组分碳同位素最重,系生物降解成因。虽然乌力吉构造带苏二段稠油在银根期遭受生物降解作用,但是由于新生代毛西断层的反转引起其下伏正常原油的再次充注,最终导致其族组分碳同位素相对变轻,巴润中央构造带苏二段低熟生物降解原油族组分也表现为相对较轻的碳同位素值。

3.1.3 正构、异构烷烃特征

巴润中央构造带巴二段原生稠油发育完整的正、异构烷烃和类异戊二烯烃系列,CPI为1.353,具有明显的奇偶优势,较好的指示低熟原油特征。生物降解

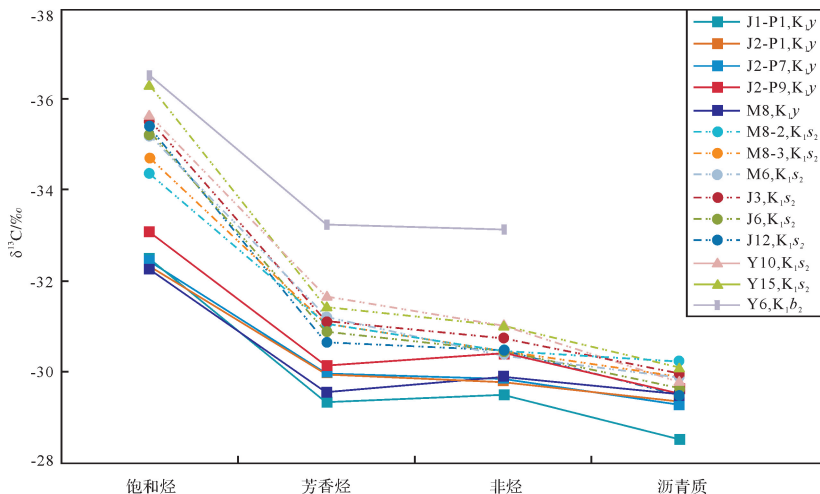


图 2 查干凹陷稠油族组分碳同位素类型曲线

Fig.2 Isotope type curves of heavy oils in Chagan Depression

作用引起正构、异构烷烃不同程度的损失,因此与正构烷烃有关的地球化学参数将失去正常的指示意义^[13]。根据正构、异构烷烃和类异戊二烯烷烃特征可以将查干凹陷稠油划分为三类:第一类为乌力吉构造带银根组和巴润中央构造带苏二段稠油,生物降解作用导致气相色谱基线明显向上漂移,具体表现为正构、异构烷烃完全消失,无环类异戊二烯烷烃严重损失;第二类为乌力吉构造带苏二段稠油,饱和烃气相色谱基线向上漂移,虽然遭受生物降解作用,但是其正构和异构烷烃较第一类完整,该类稠油反映油藏可能至少经历两期充注过程或生物降解不完全(图3)。若为生物降解不完全导致正构烷烃残留,根据降解序列可知此时饱和烃中无环类异戊二烯烷烃还未开始降解^[13],此时 Pr/nC_{17} 和 Ph/nC_{18} 应该增大。事实上,苏二段稠油 Pr/nC_{17} 值和 Ph/nC_{18} 值与正常原油大致相当。加之苏二段稠油非烃和沥青质含量高,密度和黏度与银根组稠油相当或略有增加,综合分析认为乌力吉构造带苏二段原油经历过与银根组大致相当的生物降解程度,此后又经历过正常原油充注。结合研究区烃源岩生烃史和构造演化史可知银根期充注的原油遭受生物降解作用发生稠化,新生代毛西断层反转引起深部正常原油充注^[10],使得苏二段稠油正构和异构烷烃分布较为完整,前两类稠油系生物降解成因,主要分布在乌力吉构造带和巴润中央构造带浅部银根组和苏二段地层;第三类为原生低熟稠油,仅分布于巴润中央构造带意6井区附近巴二段地层,其正构和异构烷烃保存完整,气相色谱基线也没有向上漂

移,其色谱特征与正常原油没有明显区别。

3.1.4 生物标志化合物特征

不同的沉积环境导致不同的生物群落,进而造成了生物标志化合物及其组合的差异^[12-14]。查干凹陷浅层稠油虽然遭受了生物降解作用,但对于降解程度较低的稠油,其姥鲛烷和植烷仍然表现出较为明显的特征。Peters 和 Moldowan 等研究表明,姥植比通常用于表征烃源岩或原油成烃母质沉积时的氧化还原程度,高 Pr/Ph 值(>3.0)通常反映氧化条件下陆相有机质的输入,而 Pr/Ph 值低(<0.8)则反映典型的封闭还原环境,一般在高盐环境中的烃源岩或碳酸盐岩姥植比表现为这种特征^[13]。研究区原油植烷含量具有明显的优势($0.4 < Pr/Ph < 0.8$),反映其成烃母质形成于弱还原—还原环境。伽马蜡烷经常用于表征非海相烃源岩沉积环境中的分层水体,纵向上的高盐度和温度梯度都可以引起水体的分层^[15]。因此,伽马蜡烷含量高往往指示咸水沉积环境或水体具有盐度分层。研究区原生稠油伽马蜡烷/ $C_{30}17\alpha(H)$, $21\beta(H)$ -藿烷(伽马蜡烷指数)大于 0.60,反映其成烃母质形成于弱咸水—咸水或水体具有盐度分层的沉积环境。次生稠油伽马蜡烷指数均低于 0.40,表明其生烃母质形成时水体盐度较小,为微咸水—淡水沉积环境。胡萝卜烷含量低但显著存在,这可能与烃源岩母质类型或稠油的次生作用有关^[7]。

热稳定性最小的 $C_{27} \sim C_{29}$ 生物构型甾烷系列的相对丰度常用来表征原油的母质类型^[13],研究区不同次级构造带稠油甾烷分布特征有所差别,总体上以

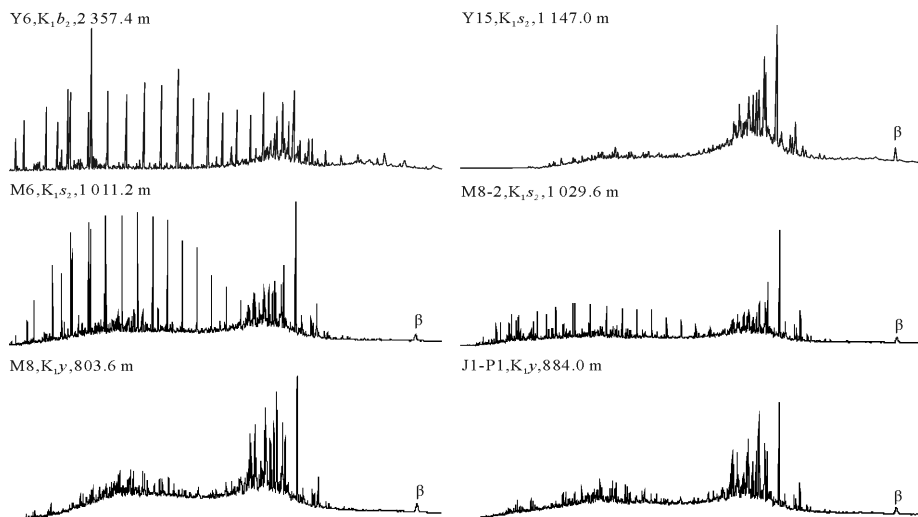


图3 查干凹陷部分稠油饱和烃 TIC 谱图特征

Fig.3 Gas chromatograms of the saturated hydrocarbon for the selected heavy oils from Chagan depression

规则甾烷为主,规则甾烷平均含量在 85%以上,重排甾烷、孕甾烷和升孕甾烷含量较低或没有。规则甾烷由 C_{27} - C_{28} - C_{29} $\alpha\alpha$ ($20S+20R$) 和 $\alpha\beta\beta$ ($20S+20R$) 化合物构成,其相对丰度通常可以用来表征烃源岩或原油成烃母质构成^[11]。 C_{27} 甾烷含量通常指示低等水生生物贡献程度, C_{28} 甾烷含量反映陆相藻类输入强度,如果 C_{29} 甾烷含量较高,则可能指示陆源高等植物贡献较大。巴润中央构造带稠油规则甾烷 $C_{27} < C_{28} < C_{29}$ 呈反“L”型或上升型分布(图 4),低丰度的 C_{27} 甾烷表明低等水生生物贡献很少或没有,原油母质来源主要为陆生高等植物。乌力吉构造带稠油规则甾烷

$\alpha\alpha\alpha 20RC_{27}$ - $\alpha\alpha\alpha 20RC_{28}$ - $\alpha\alpha\alpha 20RC_{29}$ 表现为“V”型分布,反映出原油成烃母质具有低等水生生物与陆生高等植物均等贡献。

成熟度是反映原油成因的一个重要指标,很多生物标志物可以用来表征原油的成熟度。乌力吉构造带正常原油和生物降解稠油 $\alpha\alpha\alpha C_{29}$ 规则甾烷成熟度参数 $20S/(20S+20R)$ 介于 0.42~0.55 之间,异构化参数 $C_{29}-\alpha\beta\beta/\sum C_{29}$ 分布在 0.39~0.50 之间,反映其成烃母质已经演化到成熟阶段,这与额很洼陷烃源岩埋深较大密切相关;与乌力吉构造带稠油相比,巴润中央构造带正常原油和稠油成熟度较低,规则甾烷

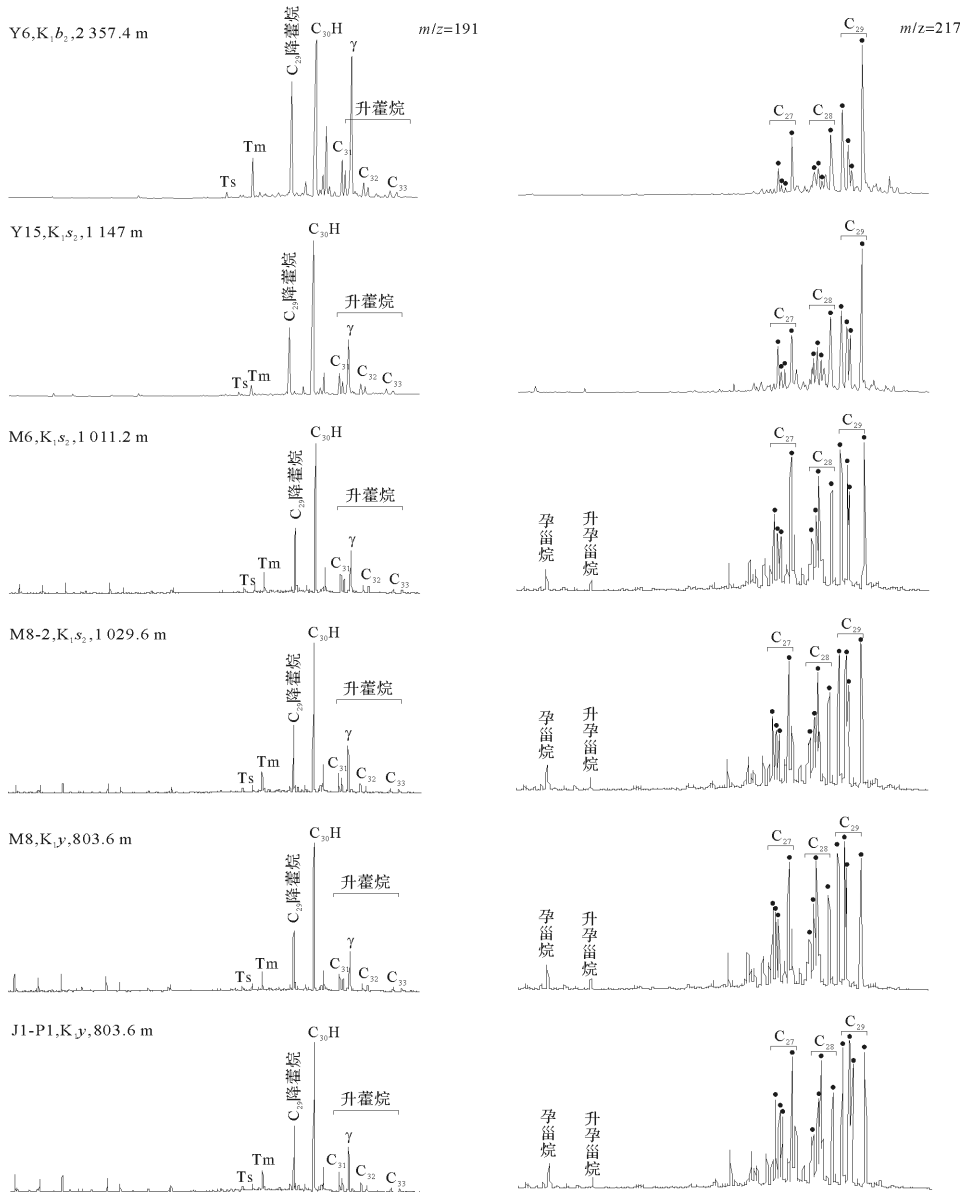


图 4 查干凹陷稠油饱和烃质量色谱图

Fig.4 Mass chromatograms(m/z191 and 217) of saturated hydrocarbons for heavy oils from Chagan depression

$\alpha\alpha\alpha C_{29}20S/(20S+20R)$ 值分布在 0.31~0.44 之间, $C_{29}-\alpha\beta\beta/\sum C_{29}$ 分布在 0.25~0.60 之间, 反映该构造带成熟原油和低熟原油均有分布, 成熟原油主要分布在巴润中央构造带南部靠近额尔根洼陷的地区, 低熟原油主要位于巴润中央构造带北部^[16-18]。

前人根据原油中不同生标化合物在降解过程中的差异性变化建立了判识生物降解程度的标尺。Connan 等^[19] 根据原油族组分的变化对其降解程度进行了定性研究。Wenger 等^[20] 提议使用那些聚焦于生物标志化合物蚀变前所发生的变化术语来表述原油中生物降解的程度。Perters 和 Moldowan 等^[13] 则充分考虑不同生物标志物的重叠关系, 根据原油中不同化合物的丰度建立了评价其生物降解程度的定量标尺。

本文依据原油饱和烃生物标志化合物特征, 采用 Perters 和 Moldowan 的判识标准对研究区次生稠油生物降解程度进行划分。从图 4 和表 2 中可以看出, 乌力吉构造带银根组原油正构和异构烷烃, 姥鲛烷和植烷等类异戊二烯烃遭受生物降解损失殆尽或少量残存, 规则甾烷和萘烷未受到损失, 表明其生物降解程度为中等 4 级。苏二段稠油正构烷烃、姥鲛烷和植烷等类异戊二烯烃分布完整, 可能为新生代毛西断层反转时油藏接受二次充注所致。巴润中央构造带苏二段稠油生物标志化合物分布特征与乌力吉构造带银根组稠油一致, 表明该区稠油也达到中等 4 级降解程度。

3.2 稠油成因分析

烃源岩有机质类型和热演化程度对稠油的成分具有重要的控制作用, 但是在油气运移过程中或进入储集层后, 其他因素例如生物降解、水洗等作用也可能成为影响稠油成分和性质的重要因素。

3.2.1 地质因素对稠油分布的控制

在苏红图组沉积末期(燕山 IV 幕运动), 研究区经历了一次“断拗转换”的强烈构造运动, 使巴音戈壁组和苏红图组卷入褶曲, 对苏红图组上部地层造成了至少 800 m 的剥蚀^[9]。由于浅部保存条件差, 储层温度和压力较低, 地表水可以沿断裂等通道进入储层, 微生物活动十分频繁, 进而导致查干凹陷巴润中央构造带和乌力吉构造带苏二段原油遭受生物降解、水洗和氧化等次生作用而发生稠化。喜山运动末期, 受欧亚板块与印度板块挤压碰撞的影响, 苏红图组和银根组地层强烈抬升, 形成由毛东和毛西两条逆冲断层所夹持的逆冲反转构造带^[10]。早白垩世以来, 毛西断层的差异性活动在纵向上形成一系列继承性油气圈闭, 同时也使油气运移成为可能。毛西断层在新生代反转过程中下降盘地层向上推覆, 断层由原来的封闭性转变为输导性, 成为油气运移的通道, 深部正常原油经毛西断层调整至银根组聚集形成油气藏。两期构造运动使查干凹陷下白垩统上部地层遭受严重剥蚀, 并使斜坡带银根组和苏二段地层埋深小于 1 500 m。由于地层埋藏浅, 第一期成藏时储层温度一般低于 70℃。受地表水下渗混合的影响, 浅部斜坡

表 2 查干凹陷部分稠油主要生物标志化合物参数

Table 2 Main biomarker parameters for the selected heavy oils from Chagan Depression

井号	深度	层位	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
J1-P1	884	K _{1y}	—	0.38	0.16	0.32	0.30	0.39	0.47	0.46	0.02	0.07	—	—
J2-P11	1 241.9	K _{1y}	—	0.38	0.11	0.31	0.30	0.38	0.47	0.44	0.02	0.07	—	—
J2-P9	1 163.5	K _{1y}	—	0.37	0.11	0.31	0.30	0.39	0.46	0.43	0.02	0.06	—	—
M8	723.6	K _{1y}	—	0.39	0.17	0.32	0.30	0.38	0.48	0.47	0.02	0.07	—	—
M8	803.6	K _{1y}	—	0.37	0.20	0.32	0.29	0.38	0.48	0.46	0.03	0.06	—	—
M8	914.0	K _{1y}	—	0.30	0.09	0.26	0.30	0.44	0.35	0.30	0.01	0.03	—	—
Y15	1 147.0	K _{1s} ²	—	0.37	0.03	0.22	0.37	0.41	0.38	0.34	0.01	0.02	—	—
M6	1 107.3	K _{1s} ²	0.53	0.39	0.10	0.30	0.30	0.41	0.43	0.41	0.02	0.07	1.03	1.25
M8-2	1 129.6	K _{1s} ²	0.72	0.39	0.10	0.30	0.30	0.40	0.44	0.42	0.03	0.08	1.03	1.43
M6	1 011.2	K _{1s} ²	0.70	0.37	0.11	0.31	0.30	0.39	0.45	0.42	0.03	0.05	0.91	1.16
Y6	2 420.5	K _{1b} ²	0.41	0.64	0.05	0.16	0.27	0.57	0.39	0.25	0.00	0.01	1.06	3.39
X6-1	2 377.0	K _{1b} ²	0.67	0.23	0.25	0.35	0.26	0.39	0.46	0.46	0.05	0.07	1.02	1.19
L1	2 563.6	K _{1b} ²	0.84	0.51	0.46	0.30	0.34	0.36	0.49	0.54	0.03	0.08	0.72	0.90
X2	2 906.0	K _{1b} ²	0.34	0.41	0.42	0.26	0.33	0.41	0.44	0.38	0.06	0.06	0.81	1.34
Y6	1 773.0	K _{1s} ²	0.45	0.33	0.07	0.29	0.31	0.40	0.44	0.34	0.02	0.04	0.74	1.64

注: A. 姥鲛烷/植烷; B. γ 蜡烷/C₃₀-藿烷; C. 三环萜烷/五环萜烷; D. $\alpha\alpha\alpha 20R_{27}$ 甾烷(%) ; E. $\alpha\alpha\alpha 20R_{28}$ 甾烷(%) ; F. $\alpha\alpha\alpha 20R_{29}$ 甾烷(%) ; G. C₂₉ 甾烷 $\alpha\alpha\alpha 20S/(20S+20R)$; H. C₂₉ 甾烷 $\alpha\beta\beta/(\alpha\beta\beta+\alpha\alpha\alpha)$; I. 孕甾烷+升孕甾烷/规则甾烷; J. 重排甾烷/规则甾烷; K. Pr/nC₁₇ ; L. Ph/nC₁₈。

区地层水矿化度一般低于 100 g/L,水型主要为硫酸钠型和重碳酸氢钠型。研究表明硫酸钠型地层水可能来源于与地表水连通的地质构造^[7],显然,查干凹陷地层水受到了地表水的影响。构造抬升导致苏二段和银根组地层温度和地层水矿化度十分适宜微生物(细菌)活动。因此,查干凹陷地质构造抬升为原油稠化提供了优越的外界条件。

3.2.2 烃源岩成熟度对原油稠化的影响

多种地球化学参数表明巴润中央构造带既有正常成熟原油,也有低熟原油。值得注意的是,巴润中央构造带巴二段原生稠油成熟度较低,属于原生低熟稠油。异胆甾烷 $20RC_{29}\alpha\beta\beta/20RC_{29}\alpha\alpha\alpha$ 比值可用于表征油气运移距离,其值小于 1 代表运移距离较近^[7],原生稠油异胆甾烷比值不超过 0.65,因此属于原地或近距离运移成藏。虎勒洼陷和中央构造带南部巴音戈壁组下部烃源岩在苏红图期镜质体反射率 R_o 值介于 0.4%~0.7%,普遍处于低熟演化阶段^[16],干酪根在低熟阶段通过解聚作用脱除杂原子官能团可生成部分可溶烃类,并具有相对较高的重质组分^[7]。研究发现该构造带原油可能来源于其下伏巴音戈壁组下部白云质泥岩^[16-18,21-22],碳酸盐和硫酸盐等矿物对低熟演化阶段烃源岩的生烃过程具有较强的催化作用^[23]。同时盐类的存在也会减少黏土矿物对烃类的吸附作用,有利于有机质向烃类转化和排运^[24],研究区烃源岩中大量碳酸盐矿物的存在可以促进其早期生成重质组分较高的低熟稠油。烃源岩抽提物饱和烃具有明显的植烷优势,姥植比值通常低于 0.85,伽马蜡烷指数大于 0.60,表明原生稠油成烃母质主要沉积于半咸化弱还原环境,这种沉积环境也有利于低熟稠油的生成^[23]。此外,烃源岩生烃活化能偏低也是其早期生成低熟稠油的重要原因^[25],巴润中央构造带南部烃源岩生烃活化能平均为 276 kJ/mol,低于额很洼陷南部烃源岩生烃活化能,其平均值为 385 kJ/mol。钻井资料显示巴二段白云质泥岩与粉砂岩储集层互层沉积,压实作用将促使低熟原油从烃源岩向储层排驱和运移。总之,碳酸盐矿物、咸化环境、低活化能以及有利的源储组合对巴二段烃源岩原生低熟稠油的生成和排驱具有重要意义,研究区早期进入生烃门限的烃源岩具备生成原生稠油的潜力^[23-25]。

3.2.3 生物降解作用是原油稠化的主控因素

原油常规物性和地化分析表明,生物降解作用是查干凹陷次生稠油形成的主要机制,其组分经历过明

显的次生改造作用,具体表现为轻质组分缺失和损耗,非烃和沥青质等重质组分含量相对增加,原油流体性质变差,原油降解产物的色谱图呈现 UCM 鼓包,而原生稠油基本不受生物降解作用的影响。Connan 和 Carolyn 等认为,原油生物降解程度随储层温度升高而降低,当储层温度高于 75℃时,原油性质的改变可以排除细菌降解的结果,即生物降解作用通常在储层温度高于 75℃时停止^[19]。当地层水矿化度高于 100~150 g/L 时,细菌生长活动将会受到抑制或停止。原油降解一般在地层水与地表水连通的条件下进行,构造抬升或反转使查干凹陷深部正常原油发生重新调整,向浅部斜坡带运移聚集成藏。受毛西等多条断层切割的影响,浅部油气储层处于地层水与地表水自由交换带或风化带,油田水遭受大气淡水的渗入和混合,造成油田水总体矿化度普遍低于 100 g/L,稠油成藏时的流体包裹体均一化温度则指示储层温度一般小于 70℃,适宜的地层温度和矿化度促使多种微生物(细菌)频繁活动。微生物(细菌)首先消耗原油中正构烷烃并导致类异戊二烯烃相对富集,由于类异戊二烯烃比正构烷烃凝固点低($<-80^\circ\text{C}$),该类化合物的相对富集会引发原油凝固点降低^[3,26-27]。查干凹陷浅层次生稠油就表现出低凝固点的特征,表明原油遭受过生物降解作用。与正常原油相比,查干凹陷浅层次生稠油规则甾烷含量相当或略有增加,表明查干凹陷浅部稠油甾烷类化合物未遭受生物降解作用。稠油中规则甾烷、萜烷分布完整,只是正构和异构烷烃,姥鲨烷和植烷等类异戊二烯烃表现出不同程度的缺失或损耗,说明研究区稠油的生物降解程度并不严重,达到中度降解程度^[14]。

3.2.4 水介质是生物降解的条件

查干凹陷 13 口井油田水矿化度随深度增加表现出增加的趋势,平面上其低值区往往与次生稠油分布区相对应。这是因为研究区主要断裂沟通了浅层圈闭与地表,地表水沿断层面渗入油藏,使地层水逐渐趋向淡化,油藏在地层水等作用下发生稠化。水洗作用对烃类组分的影响有限,加之水洗作用与生物降解作用相伴生,导致人们常常忽略其对原油组分的影响。水洗作用往往发生在油水界面,主要表现为油水界面处地层水与地表水往往形成强水动力的交替带,造成原油边缘水洗和底水水洗,其对原油性质的影响具体表现在,一方面优先选择性消耗低分子量烃类和同碳数芳香烃(C_{15-}),而重质组分(C_{15+})中只消除芳香烃和含硫化合物,类异戊二烯烃和甾萜烷则基本不

受水洗作用影响^[28]。另一方面,水介质是微生物(细菌)生存的载体以及携带其生存所需的营养物质,为微生物降解活动创造了必要条件。银根组和苏二段次生稠油非烃含量一般大于25%,其中多种氧化物的存在表明查干凹陷浅层稠油遭受过水洗和生物降解作用。查干凹陷浅层稠油藏底部地层水与地表水连通情况较好,同时油水界面为微生物(细菌)活动提供了优越条件,导致水洗和生物降解最严重的区域往往发生在油水界面处,原油饱和烃和芳香烃含量远离油水界面而逐渐增加,水洗和生物降解作用减弱。在原油的稠化过程中,生物降解与水洗作用密不可分,缺乏水介质活动的生物降解作用将受到抑制。

4 结论

(1) 常规地球化学分析表明查干凹陷存在两种成因的稠油:原生和次生稠油,稠油具有高密度、高黏度、低凝固点和低饱芳比的特征。原油物性具有从凹陷中心向凹陷边缘,从深部向浅部逐渐变稠的趋势,其物性主要受非烃和沥青质含量的影响。

(2) 在巴润中央构造带,原生稠油主要是巴二段烃源岩低熟演化阶段的产物,稠油运聚过程中未经历化学变化,为原地或近源成藏。苏二段稠油由于埋深浅,遭受生物降解和水洗等次生作用稠化;在乌力吉构造带,苏二段稠油正构烷烃分布完整,表明稠油油藏至少经历两期充注。银根组稠油为新生代毛西断层反转过程中,由下部正常油藏经毛西断层向上调整后形成。

(3) 与地表水下渗有关的生物降解作用、水洗作用和氧化作用是导致查干凹陷原油稠化的重要机制,生物降解作用可能是最主要的因素。喜山期构造抬升导致地层埋藏较浅,地层温压降低,油水界面处微生物活动频繁,导致原油遭受生物降解而发生稠化作用。

参考文献 (References)

- Head I M, Jones D M, Larter S R. Biological activity in the deep sub-surface and the origin of heavy oil[J]. *Nature*, 2003, 426(6964): 344-352.
- 牛嘉玉,洪峰. 我国非常规油气资源的勘探远景[J]. *石油勘探与开发*, 2002, 29(5): 5-7. [Niu Jiayu, Hong Feng. Exploratory prospects of unconventional oil-gas resources in China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2002, 29(5): 5-7.]
- 李素梅,庞雄奇,高先志,等. 辽河西部凹陷稠油成因机制[J]. *中国科学(D辑): 地球科学*, 2008, 38(增刊1): 138-149. [Li Sumei,

- Pang Xiongqi, Gao Xianzhi, et al. Formation mechanisms of heavy oils in the Liaohe Western depression, Bohai Gulf Basin [J]. *Science China (Seri. D): Earth Sciences*, 2008, 38(Suppl. 1): 138-149.]
- 高日胜,方杰,王曦,等. 陆相盆地重质油成因类型及其稠变序列——以二连盆地为例[J]. *石油学报*, 2013, 34(3): 479-488. [Gao Risheng, Fang Jie, Wang Tun, et al. Genetic types and densification series of heavy oils in non-marine basins; A case study on Erlian Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2013, 34(3): 479-488.]
- 马安来,张水昌,张大江,等. 生物降解原油地球化学研究新进展[J]. *地球科学进展*, 2005, 20(4): 449-454. [Ma Anlai, Zhang Shuichang, Zhang Dajiang, et al. The advances in the geochemistry of the biodegraded oil[J]. *Advances in Earth Science*, 2005, 20(4): 449-454.]
- 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. [Duan Chuanli, Chen Jianfa. Geochemical characteristics of biodegraded crude oil and their significances[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2007, 18(2): 278-283.]
- 魏彩茹,魏东涛,黄林军,等. 新疆吉木萨尔凹陷二叠系稠油地球化学特征及成因[J]. *天然气地球科学*, 2012, 23(1): 135-140. [Wei Cairu, Wei Dongtao, Huang Linjun, et al. Geochemical characteristics of Permian heavy oil and its origin in Jimsar sag, Xinjiang province [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2012, 23(1): 135-140.]
- 王志勇,杜宏宇,靳振家,等. 吐哈盆地二叠系稠油成因、成藏研究[J]. *沉积学报*, 2007, 25(5): 787-794. [Wang Zhiyong, Du Hongyu, Jin Zhenjia, et al. Discussion on the origin of heavy oil and reservoir formation in Permian system of Turpan-Hami Basin[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2007, 25(5): 787-794.]
- 徐会永,蒋有录,张立强,等. 查干凹陷构造样式及其构造演化[J]. *油气地质与采收率*, 2008, 15(4): 13-15. [Xu Huiyong, Jiang Youlu, Zhang Liqiang, et al. Structural styles and evolution characteristics of Chagan depression [J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2008, 15(4): 13-15.]
- 徐会永. 查干凹陷下白垩统层序地层及油气成藏特征研究[D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2008: 9-28. [Xu Huiyong. Sequence stratigraphy and hydrocarbon accumulation characteristics of the Lower Cretaceous in Chagan depression[D]. Qingdao: China University of Petroleum (East China), 2008: 9-28.]
- 柳广弟,杨伟伟,冯渊,等. 鄂尔多斯盆地陇东地区延长组原油地球化学特征及成因类型划分[J]. *地学前缘*, 2013, 20(2): 108-115. [Liu Guangdi, Yang Weiwei, Feng Yuan, et al. Geochemical characteristics and genetic types of crude oil from Yanchang Formation in Longdong area, Ordos Basin[J]. *Earth Science Frontiers*, 2013, 20(2): 108-115.]
- 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 Edition. Cambridge: Cambridge University Press, 2007: 72-74.
- Peters K E, Walters C C, Moldowan J M. *The Biomarker Guide: Volume 2, Biomarkers and Isotopes in Petroleum Systems and Earth History* [M]. 2nd Edition. Cambridge: Cambridge University Press, 2007: 475-625.

- 14 Peters K E, Moldowan J M. The Biomarker Guide: Interpreting Molecular Fossils in Petroleum and Ancient Sediments [M]. New Jersey: Prentice Hall, 1992: 1-363.
- 15 Sinninghe Damsté J S, Kenig F, Koopmans M P, et al. Evidence for gammacerane as an indicator of water column stratification [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1995, 59(9): 1895-1900.
- 16 陈建平,何忠华,魏志彬,等. 银额盆地查干凹陷基本生油条件研究[J]. 石油勘探与开发, 2001, 28(6): 23-27. [Chen Jianping, He Zhonghua, Wei Zhibin, et al. A study on the principal conditions of hydrocarbon generation in Chagan sag of Yingen-Ejinaqi Basin, Northwest China [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2001, 28(6): 23-27.]
- 17 陈建平,何忠华,魏志斌,等. 银额盆地查干凹陷原油地化特征及油源对比[J]. 沉积学报, 2001, 19(2): 299-304. [Chen Jianping, He Zhonghua, Wei Zhibin, et al. Geochemical characteristics of oil and source rock correlation in the Chagan sag of Yingen-Ejinaqi Basin, NW China [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2001, 19(2): 299-304.]
- 18 陈建平,王东良,秦建中,等. 银根——额济纳旗盆地原油的发现及其主要地球化学特征[J]. 地球化学, 2001, 30(4): 335-342. [Chen Jianping, Wang Dongliang, Qin Jianzhong, et al. The discovery of oil in the Inggen-Ejin Qi Basin, NW China and its geochemical characteristics [J]. *Geochimica*, 2001, 30(4): 335-342.]
- 19 Connan J. Biodegradation of Crude Oils in Reservoirs [M] // Brooks J, Welte D H, eds. *Advances in Petroleum Geochemistry I*. London: Academic Press, 1984: 299-335.
- 20 Wenger L M, Davis C L, Isaksen G H. Multiple controls on petroleum biodegradation and impact on oil quality [J]. *SPE Reservoir Evaluation and Engineering*, 2002, 5: 375-383.
- 21 刘军,罗小平,李辉,等. 查干凹陷下白垩统烃源岩地球化学特征[J]. 岩性油气藏, 2013, 25(1): 75-80, 87. [Liu Jun, Luo Xiaoping, Li Hui, et al. Geochemical characteristics of hydrocarbon source rocks of the Lower Cretaceous in the Chagan sag [J]. *Lithologic Reservoirs*, 2013, 25(1): 75-80, 87.]
- 22 林卫东. 查干凹陷原油地球化学特征与油源对比[J]. 石油与天然气地质, 2000, 21(3): 249-251. [Lin Weidong. Geochemical characteristics of crude oil and correlation of oil source in Chagan sag [J]. *Oil & Gas Geology*, 2000, 21(3): 249-251.]
- 23 王娟. 咸化环境盐类物质与有机质相互作用研究[D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2009: 11-37. [Wang Juan. A study on interaction of source rock and oil with evaporates in saline-lake facies [D]. Qingdao: China University of Petroleum (East China), 2009: 11-37.]
- 24 吴德云,张国防. 盐湖相有机质成烃模拟实验研究[J]. 地球化学, 1994, 23(增刊1): 173-181. [Wu Deyun, Zhang Guofang. Simulation experiment study on hydrocarbon generation from organic matter in saline lake facies rocks [J]. *Geochimica*, 1994, 23(Suppl. 1): 173-181.]
- 25 王铁冠,钟宁宁,候读杰,等. 中国低熟油的几种成因机制[J]. 沉积学报, 1997, 15(2): 75-83. [Wang Tieguan, Zhong Ningning, Hou Dujie, et al. Several genetic mechanisms of immature crude oils in China [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 1997, 15(2): 75-83.]
- 26 陈建平,秦建中,张吉光. 海拉尔盆地舒1井低蜡稠油成因及其意义[J]. 石油勘探与开发, 2004, 31(3): 61-64. [Chen Jianping, Qin Jianzhong, Zhang Jiguang. Origin of the low-wax heavy oils in Well Shu-1, Hailaer Basin, Northeast China [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2004, 31(3): 61-64.]
- 27 Aitken C M, Jones D M, Larter S R. Anaerobic hydrocarbon biodegradation in deep subsurface oil reservoirs [J]. *Nature*, 2004, 431(7006): 291-294.
- 28 张敏,张俊. 水洗作用对油藏中烃类组成的影响[J]. 地球化学, 2000, 29(3): 287-292. [Zhang Min, Zhang Jun. Effect of water washing on hydrocarbon compositions of petroleum sandstone reservoir in Tarim Basin, NW China [J]. *Geochimica*, 2000, 29(3): 287-292.]

Geochemistry and Origin of Heavy Oil in Lower Cretaceous of Chagan Depression

WANG Peng^{1,2} LIU GuangDi^{1,2} CAO Zhe^{1,2} SU Hui³ NIU ZiCheng^{1,2}
ZHANG JingYa^{1,2} LUO WenBin^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Petroleum Resources and Prospecting, Beijing 102249;

2. College of Geosciences, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249;

3. Research Institute of Exploration and Development, SINOPEC Zhongyuan Oilfield Company, Puyang, Henan 457001)

Abstract: Based on routine physical properties, carbon isotope and molecular geochemical analysis, this paper elaborated geochemical characteristics of heavy oil in Chagan depression and the main controlling factors of its formation systematically. There are two types of heavy oils; the primary and the secondary. The nonhydrocarbon content of primary heavy oil is higher than the saturated hydrocarbon content. Family component of heavy oils enriched lighter carbon isotope, C_{29} regular steranes series enriched $\alpha\alpha\alpha$ configuration, low abundance of $\alpha\beta\beta$ configuration steranes and no rearranged steranes. It has low tricyclene/pentacyclic terpene value, high gammacerane content, low Pr/Ph value,

the oil-forming matrixes were formed under the reducing and high salt water environment, a variety of geochemical parameters indicated that the primary heavy oil derived from the hydrocarbon expulsion of hydrocarbon source rocks at low evolutionary stages. Secondary heavy oil formed after oil and gas migration and accumulation, which has high density, high viscosity and low freezing point due to the change of late preservation condition and secondary reconstruction. The depth of secondary heavy oil was generally less than 1 200 meters, most of which were biodegraded oils and some of biodegraded oils experienced multiple period of accumulation. The n-alkanes and isoprenoid of secondary heavy oil suffered from degradation of different level, it indicates that the oil have reached moderate degree of degradation as steranes and terpanes distribute completely. Studies have shown that the thickening of crude oil is the result of a variety of factors worked together, biodegradation is the main formation mechanism of heavy oil in the study area, the later tectonic uplift provide necessary conditions for the crude oil thickened, and active water conditions provide both fine oxidation environment and nutrients for shallow aerobic microbe.

Key words: origin of heavy oil; biodegradation; original heavy oil; Lower Cretaceous; Chagan depression