

文章编号:0253-9985(2004)04-0437-07

白音查干凹陷达尔其油田 原油的分类与生物降解作用

谈玉明^{1,2}, 冯建辉^{1,2}, 张云献², 靳广兴^{2,3}, 潘长春¹, 盛国英¹, 傅家谟¹

(1. 中国科学院广州地球化学研究所, 广东广州 510640; 2. 中国石化中原油田分公司, 河南濮阳 457001;

3. 中国地质大学, 北京 100083)

摘要:根据原油的物性、族组成、生物标志化合物参数及生物降解特征, 将达尔其油田原油分为5种类型。(1)第一类为稀油。原油粘度和密度低, 族组成以饱和烃组分为主, 非烃和沥青质含量低, 甾烷异构化指标高, 未遭受生物降解, 成熟度较高。(2)第二类为原生未熟稠油。原油粘度特大, 密度相对较高, 族组成以非烃和沥青质组分为主, 饱和烃含量低。甾烷异构化指标低, 未遭受生物降解。(3)第三类为第一类与第二类原油的混合产物, 且以第一类为主。(4)第四类属普通稠油, 原油密度、粘度相对较高, 为第一类原油生物降解而形成的。(5)第五类原油是第三类原油生物降解的产物, 原油密度和粘度与第四类原油相近, 但甾烷异构化指标相对较低。除了第二类原油(未熟稠油)来源于浅部都红木组一段未熟烃源岩外, 其他四类原油都来源于(或主要来源于)深部腾格尔组和阿爾善组二段成熟度较高的烃源岩。

关键词:达尔其油田; 稠油; 生物标志化合物; 生物降解

中图分类号:TE112.114

文献标识码:A

Oil classification and biodegradation in Daerqi oilfield, Baiyinchagan depression

Tan Yuming^{1,2}, Feng Jianhui^{1,2}, Zhang Yunxian², Jin Guangxing^{2,3}, Pan Changchun¹, Sheng Guoying¹, Fu Jiamou¹

(1. Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou, Guangdong; 2. Zhongyuan Oilfield Company, SINOPEC, Puyang, Henan; 3. China University of Geosciences, Beijing)

Abstract: Based on oil physical features, group compositions, biomarker compounds and biodegradation, the crude oil in the Daerqi oilfield is classified into five types. Type I oil is a low viscosity and density, light oil. Its group composition is predominately the saturated hydrocarbon, with a low contents of nonhydrocarbon and asphaltic components. This type of oil is unbiodegraded, with a high sterane isomerization index and maturity. Type II oil is immature and extremely viscous, with a relatively high density. Its group composition is dominated by nonhydrocarbon and asphaltic components, with a low content of saturated hydrocarbon. This type of oil is unbiodegraded, with a low sterane isomerization index. Type III oil is a mixed product of type I oil and type II oil. Type IV oil is a common viscous oil, with a relatively high viscosity and density, which is formed by biodegradation of type I oil. Type V oil could be caused by biodegradation of type III oil. Its density and viscosity are similar to that of type IV oil, but sterane isomerization index is relatively low. Excluding the type II oil (immature and extremely viscous oil) from the shallow immature source rock of the Duhongmu Formation, all the oil of other four types are mainly derived from the higher mature, deep-seated source rocks of the Tenggeer Formation and/or A'ershan Formation.

Key words: Daerqi oilfield; viscous oils; biomarkers; biodegradation

白音查干凹陷位于二连盆地西缘, 是二连盆地川井坳陷的一个次级构造单元^[1]。区内地层以

中生界白垩系陆源碎屑岩为主。自上而下分为: 新生界第四系、第三系; 中生界上白垩统二连达布

基金项目:国家自然科学基金(40173022); 中国石油化工股份有限公司科学技术研究开发项目(P00015)

第一作者简介:谈玉明, 男, 40岁, 高级工程师, 油气勘探及油气藏综合研究

收稿日期:2004-07-20

苏组($K_2 er$),下白垩统巴彦花群赛汉塔拉组($K_1 bs$)、都红木组($K_1 bd$)、腾格尔组($K_1 bt$)和阿尔善组($K_1 ba$)。其中,都红木组一段($K_1 bd_1$)、腾格尔组($K_1 bt$)和阿尔善组二段($K_1 ba_2$)为凹陷的烃源岩,而其中的砂岩又是主要的储层^[2]。

1994年在白音查干凹陷发现达2井工业油流,1998年发现达9区块稠油富集区。之后,发现了达14、达16区块正常原油高产井。达尔其油田原油物性变化很大,既有正常原油,也有稠油和特稠油。稠油中既有遭受强烈生物降解的次生稠油,也有完全未经历生物降解的原生稠油。近年有许多学者从不同角度对原油的组分与其油源和生物降解作用的关系进行探讨^[3~5]。本文在对各类原油进行详尽的族组成、物性参数及生物标志

化合物参数分析的基础上,结合烃源岩研究成果,确定各类原油的油源和生物降解油与未降解油之间的亲缘关系。

1 分类

首先根据原油是否经历生物降解作用,可将达尔其油田的原油分为生物降解原油与未降解原油。再根据原油的地球化学和物性特征将未降解原油分为3类(第一类、第二类和第三类),将生物降解原油分为两类(第四和第五类)。5类原油的物性、族组成及生物标志物特征存在一定差异(表1和表2)。由于该油田各类原油的萘烷分布比较相近,而饱和烃色谱和甾烷分布相差很大^[4],本文只展示各类原油饱和烃色谱和 m/z 217 质量色谱图(图1)。

表1 达尔其油田典型原油的物性参数与族组成

Table 1 Physical features and group compositions of the typical oil from the Daerqi oilfield

样号	井号	井深/m	层位	密度 ($g \cdot cm^{-3}$)	粘度 ($mPa \cdot s$)	族组分/%			
						饱和烃	芳烃	非烃	沥青质
Da201	Da2	738.0~748.6	$K_1 bt$	0.84	7.1	83.8	11.3	3.8	1.1
Da1201	Da12	416.6~424.0	$K_1 bd$	0.97	433 104	40.6	13.8	29.7	15.9
Da1401	Da14	459.0~463.0	$K_1 bd$	0.87	24	76.1	13.2	9.7	1.0
Da301*	Da3	233.0~241.5	$K_1 bd$	0.97	1 862.7	61.5	17.5	10.9	10.1
Da701*	Da7	356.0~370.4	$K_1 bd$	0.92	2 134	58.2	18.4	13.6	9.8

注:带“*”的两个油样为生物降解油,其他3个油样未遭受生物降解(表2同)

表2 达尔其油田典型原油生物标志化合物参数

Table 2 Biomarkers of the typical oil from the Daerqi oilfield

样号	参 数								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Da201	0.57	0.94	0.70	0.052 1	0.263	0.43	0.49	0.163	0.548
Da1201	0.78	5.05	0.24	0.003 6	0.006	0.25	0.18	0.028	0.345
Da1401	0.88	1.73	0.58	0.044 2	0.175	0.31	0.37	0.133	0.552
Da301*	—	—	—	0.041 2	0.259	0.44	0.50	0.113	0.350
Da701*	—	—	—	0.031 3	0.108	0.26	0.34	0.066	0.459

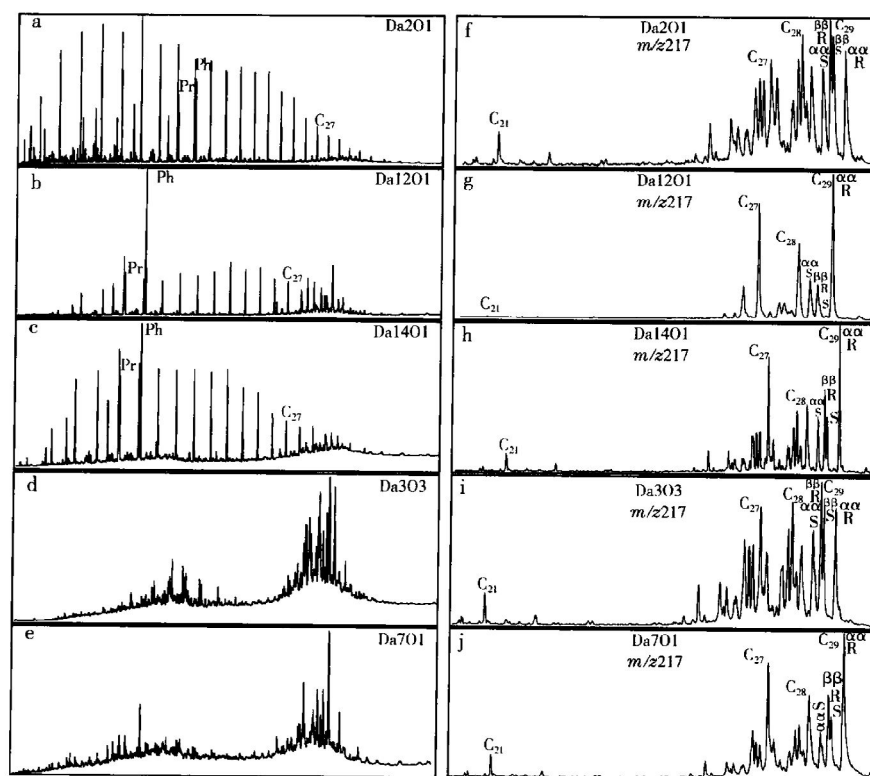
注:1— Pr/nC_{17} ;2— Ph/nC_{18} ;3— Pr/Ph ;4—甾烷 $C_{21}/(C_{21} + \sum C_{29})$;5— C_{27} 重排甾烷/ C_{27} 规则甾烷;6— C_{29} 甾烷 $20S/(R+S)$;7— C_{29} 甾烷 $\beta\beta/(\alpha\alpha + \beta\beta)$;8— C_{21} 三环萜烷/ $(C_{21} + C_{30}$ 藿烷);9— γ -蜡烷/ C_{30} 藿烷

1.1 第一类原油

以达2井原油 Da201 为代表。族组成以饱和烃为主,饱和烃含量为 83.8%,其他组分含量很低,特别是非烃和沥青质组分含量低,分别为 3.8%和 1.1%。原油密度和粘度也较低,分别为 $0.84 g/cm^3$ 和 $7.1 mPa \cdot s$ 。

和其他两类未经生物降解的原油(第二和第三类)相比,该类原油 Pr/nC_{17} 和 Ph/nC_{18} 比值相对较低,分别为 0.57 和 0.94,而 Pr/Ph 比值相对较高,为 0.70(表2和图1a)。在甾、萜烷组成方面,最显著的是 C_{29} 甾烷 $20S/(R+S)$ 和 $\beta\beta/(\alpha\alpha + \beta\beta)$ 比

值较高,分别为 0.43 和 0.49(表2和图1f)。这表明该类原油的成熟度较高^[3]。此外,甾烷 $C_{21}/(C_{21} + \sum C_{29})$ 、 C_{27} 重排甾烷/ C_{27} 规则甾烷和 C_{21} 三环萜烷/ $(C_{21} + C_{30}$ 藿烷)比值也都相对较高,分别为 0.052、0.263 和 0.163。这三个比值既与有机岩相、母质输入类型有关,也与成熟度有关。成熟度越高,这三个比值也越高^[6,7]。在达尔其油田,这类原油分布较为广泛,腾格尔组储层的原油均为该类油。此外在其上的都红木组中的油层也有该类油分布。油源对比研究表明,该类原油来源于腾格尔组和阿善组二段成熟的烃源岩^[4]。

图1 达尔其油田5类典型原油饱和烃 GC 和 $m/z217$ 质量色谱图Fig.1 Gas chromatograms and $m/z217$ mass chromatograms of saturated hydrocarbon in the five typical oils in the Daerqi oilfield

1.2 第二类原油

以达12井原油 Da1201 为代表。在族组成中,饱和烃含量较低,仅为40.6%,远低于第一类原油,而非烃和沥青质组分含量较高,两组分之之和为45.6%。该类原油物性最显著的特征是粘度大,为433 104 mPa·s,属特稠油。饱和烃色谱图显示该类原油含有异常高的植烷(图1b)。Ph/nC18 比值高达5.05,而 Pr/Ph 比值较低,仅为0.24。在甾、萜烷组成方面,首先是 C_{29} 甾烷 20S/(R+S) 和 $\beta\beta/(\alpha\alpha + \beta\beta)$ 比值较低,分别为0.25和0.18(表2和图1g)。表明该类原油的成熟度低,属于典型的原生未熟稠油。与江汉盆地、渤海湾盆地的未熟油相比有一定的相似性^[8~12]。此外,该类原油甾烷 $C_{21}/(C_{21} + \sum C_{29})$ 、 C_{27} 重排甾烷/ C_{27} 规则甾烷和 C_{21} 三环萜烷/($C_{21} + C_{30}$ 藿烷)比值也都相对较低,分别为0.003 2、0.006和0.028。可能也与该类原油成熟度低有关。油源对比研究表明,该类原油主要来源于都红木组一段未成熟烃源岩^[4]。

1.3 第三类原油

以达14井原油 Da1401 为代表。该类原油在族组成、物性和生物标志化合物基本上介于上述两类原油之间。在原油物性、族组成和饱和烃色谱图与第一类原油更为接近(表1,表2和图1c)。粘度为24 mPa·s,密度为0.87 g/cm³,仍然属于正常原油范畴。但该类原油甾、萜烷分布具有未熟原油的特征,特别是 C_{29} 甾烷 20S/(R+S) 和 $\beta\beta/(\alpha\alpha + \beta\beta)$ 比值比较低,两比值分别为0.31和0.37(表2,图1h)。以前的研究报告认为该类原油为未熟正常原油,来源于都红木组一段未熟烃源岩^{***},后来通过原油混合实验及油砂连续抽提研究,作者认为该类原油为第一和第二类原油的混合产物,并以第一类原油为主(大于68.7%)^[4],因此,在物性上仍然为正常原油。

1.4 第四类原油

以达3井原油 Da301 为代表,属生物降解原油,但甾萜类保存完好,属中度降解原油。由于经

* 王立志,苏惠,库国正,等.白音查干凹陷油气富集规律研究.中原油田勘探局勘探开发科学研究院,1999

** 张云献,吴光兴,陆宝山,等.白音查干凹陷达尔其地区稠油的成因研究.中原油田勘探局勘探开发科学研究院,1999

历了较强的生物降解作用,这类原油正构烷烃和类异戊二稀烷烃都已经消失(图1d)。该类原油的甾烷分布特征与第一类原油非常相似(图1i),而与第二和第三类原油有明显的差异。可以推断这类原油是由第一类原油在遭受生物降解后形成的。

由于正构烷烃和类异戊二稀烷烃都已消失,该类原油饱和烃含量低于第一和第三类原油,但高于第二类原油, Da301 饱和烃含量为 61.5%。而芳烃组分未受生物降解影响,相对富集,含量为 17.5%。非烃和沥青质组分含量也相对增高,分别为 10.9% 和 10.1%。该油样粘度和密度分别为 1 862.7 mPa·s 和 0.97 g/cm³,属普通稠油。

1.5 第五类原油

以达 7 井原油 Da701 为代表,生物降解作用使原油中的正构烷烃和类异戊二稀烷烃完全消失(图1e),也属中度降解原油。该类原油的甾烷分布特征与第三类原油相似(图1j)。而与第一类原油有明显的差异。因此,该类原油不可能由第一类原油生物降解而形成。

该类原油的族组成与第四类原油接近(表1),

其饱和烃含量为 58.2%,低于第一和第三类原油,但高于第二类原油。芳烃、非烃与沥青质组分含量分别为 18.4%,13.6% 和 9.8%。粘度和密度分别为 2 134 mPa·s 和 0.92 g/cm³,均高于第一和第三类原油,而低于第二类原油。

按照原油生物降解的一般规律,降解后的原油饱和烃含量应低于降解前的原油,而非烃、沥青质含量则应高于降解前的原油^[12,13]。经生物降解后原油的粘度和密度也会增高。综合生物标志物、地球化学指标及原油族组成和物性参数,可以推断第五类原油只可能由第三类混合原油经生物降解形成,而不可能是第一和第二类原油生物降解的产物。

2 地球化学特征与生物降解作用

2.1 达 6 井

我们在该井 5 个含油层位选取了 5 块井壁取心油砂样,各样品抽提物(用二氯甲烷-甲醇抽提 48 h)的饱和烃色谱和 m/z 217 质量色谱图如图 2 所示,抽提物族组成及生物标志化合物参数见表 3 和表 4。

表 3 达 6 井和达 12 井井壁取心油砂样抽提物族组成

Table 3 Group composition of the oil sand extracts of sidewall samples in Da6 & Da12 wells

样号	井号	井深/m	层位	样重/g	抽提物/mg	族组分/%			
						饱和烃	芳烃	非烃	沥青质
Da6-1	达 6	180.0	K ₁ bd ²	10.64	141.01	52.6	15.9	22.9	8.6
Da6-2	达 6	259.0	K ₁ bd ¹	2.77	185.58	47.6	11.1	30.2	11.1
Da6-4	达 6	273.5	K ₁ bd ¹	6.99	56.09	34.9	6.7	56.5	1.9
Da6-5	达 6	427.3	K ₁ ba ¹	11.04	244.33	32.1	12.7	38.7	16.5
Da6-6	达 6	435.0	K ₁ ba ¹	4.04	30.71	29.9	14.8	40.1	15.2
Da12-1	达 12	375.7	K ₁ bd ¹	6.39	451.88	16.3	4.5	75.8	3.4
Da12-2	达 12	426.0	K ₁ bd ¹	4.74	343.55	42.7	14.6	32.2	10.5
Da12-3	达 12	440.0	K ₁ bd ¹	8.37	793.50	41.4	11.3	37.3	10.0
Da12-4	达 12	454.7	K ₁ bd ¹	7.51	884.27	15.4	4.1	61.2	19.3
Da12-5	达 12	465.0	K ₁ bd ¹	2.55	320.25	13.0	3.4	79.3	4.3

表 4 达 6 井和达 12 井井壁取心油砂样抽提物生物标志化合物参数

Table 4 Biomarkers of the oil sand extracts of sidewall samples in Da6 & Da12 wells

样号	参 数								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Da6-1	-	-	-	0.087 1	0.392	0.51	0.58	0.369	0.409
Da6-2	-	-	-	0.048 5	0.334	0.50	0.56	0.177	0.608
Da6-4	0.68	2.74	0.29	0.016 5	0.018	0.22	0.22	0.063	0.364
Da6-5	-	-	-	0.038 5	0.276	0.49	0.53	0.105	0.803
Da6-6	-	-	-	0.020 8	0.265	0.49	0.50	0.058	0.718
Da12-1	0.81	5.95	0.22	0.003 1	0.007	0.23	0.17	0.024	0.347
Da12-2	-	-	-	0.028 0	0.147	0.31	0.40	0.070	0.649
Da12-3	-	-	-	0.065 2	0.145	0.33	0.45	0.169	0.466
Da12-4	0.77	5.36	0.22	0.003 4	0.006	0.24	0.18	0.029	0.372
Da12-5	0.77	5.16	0.21	0.003 8	0.009	0.24	0.17	0.038	0.300

注:1—Pr/nC₁₇;2—Ph/nC₁₈;3—Pr/Ph;4—甾烷 C₂₁/(C₂₁+ΣC₂₆);5—C₂₇重排甾烷/C₂₇规则甾烷;6—C₂₉甾烷 20S/(R+S);7—C₂₉甾烷 β/(α+β);8—C₂₁三环甾烷/(C₂₁+C₃₀甾烷);9—γ-蜡烷/C₃₀甾烷

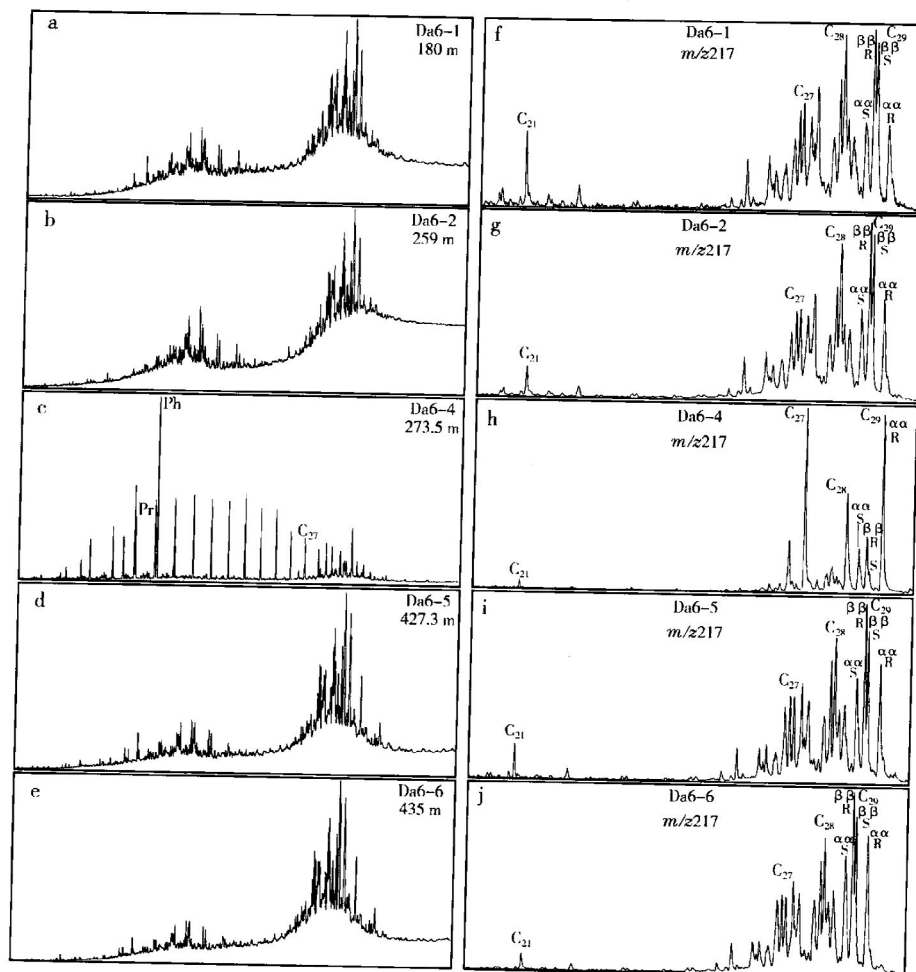
图2 达6井油砂抽提物饱和烃 GC 和 $m/z217$ 质量色谱图

Fig.2 Gas chromatograms and $m/z217$ mass chromatograms of the saturated hydrocarbon of oil sand extracts in Da6 well

从图2和表4中可以发现,达6井上部两个油层的油砂样(Da6-1和Da6-2)及下部两个油层的油砂样(Da6-5和Da6-6)原油均遭受生物降解。甾烷分布特征显示这4个油层的原油均属于第四类原油,即在遭受生物降解之前均为第一类原油。

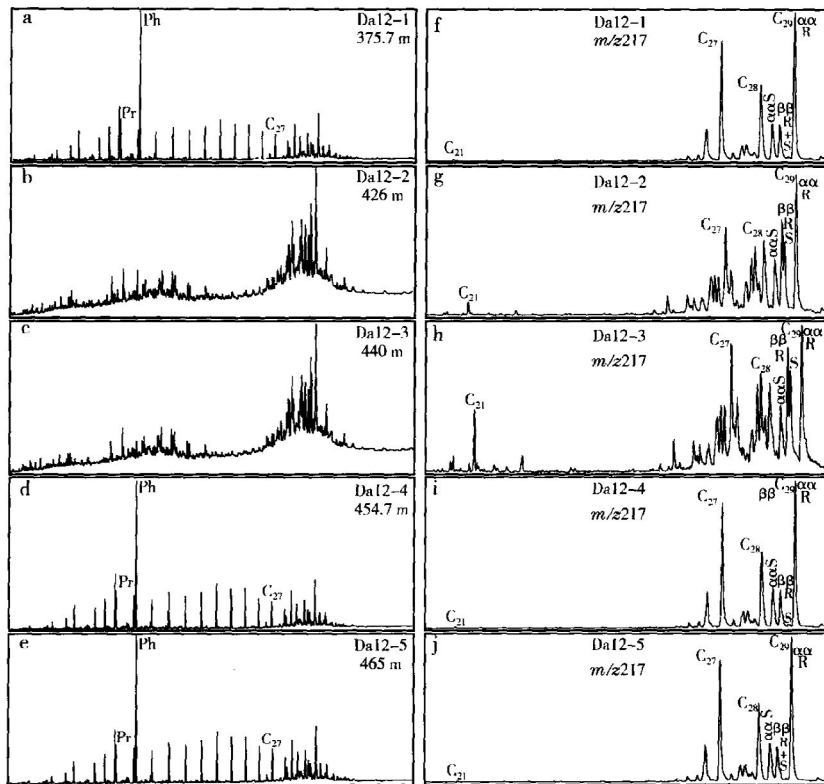
达6井中部油层的油砂样(Da6-4)原油未遭受生物降解,饱和烃色谱和甾、萜烷分布特征与第二类原油相似,为原生未熟(特)稠油,来源于都红木组一段未成熟烃源岩。与Da12O1原油相比, Da6-4油砂样 $\text{Ph}/n\text{C18}$ 比值相对偏低,而 Pr/Ph 、甾烷 $\text{C}_{21}/(\text{C}_{21} + \sum \text{C}_{29})$ 、 C_{27} 重排甾烷/ C_{27} 规则甾烷和 C_{21} 三环萜烷/ $(\text{C}_{21} + \text{C}_{30})$ 藿烷比值相对偏高,表明该油层混有少量第一类原油。

2.2 达12井

达12井五个油层的井壁取心油砂样抽提物族组成及生物标志化合物见表3和表4。饱和烃色谱、 $m/z217$ 质量色谱图见图3。

该井上部油层油砂样(Da12-1)和下部两个油层的油砂样(Da12-4和Da12-5)都未遭受生物降解作用。抽提物饱和烃色谱和甾烷分布特征都表明这3个油层的原油属于第二类原油。3个油砂样抽提物饱和烃组分含量都很低,介于13.0%~16.3%,比Da12O1油样低得多,但非烃含量很高,介于61.2%~79.3%。已有文献提到油砂抽提物比从井中开采的原油更富集非烃和沥青质组分,而饱和烃组分偏低^[10]。

该井中部两个油层油砂样 Da12-2 和 Da12-

图3 达12井油砂抽提物饱和烃GC和 $m/z217$ 质量色谱图Fig.3 Gas chromatograms and $m/z217$ mass chromatograms of the saturated hydrocarbon of oil sand extracts in Da12 well

3都遭受过生物降解。尽管第二类原油Da1201的井深(416.6~424.0 m)与油砂样Da12-2的井深(426.0 m)非常接近,但显然不属于同一类原油。Da12-2和Da12-3两个油砂样虽然经历了生物降解,抽提物饱和烃含量分别为42.7%和41.4%,远高于未遭受生物降解的Da12-1, Da12-4和Da12-5油砂样。前两个样品的 C_{29} 甾烷 $20S/(R+S)$ 和 $\beta\beta/(\alpha\alpha+\beta\beta)$ 比值以及甾烷 $C_{21}/(C_{21}+\sum C_{29})$, C_{27} 重排甾烷/ C_{27} 规则甾烷和 C_{21} 三环萜烷/ $(C_{21}+C_{30})$ 甾烷比值也都明显高于后三个样品。总之,在遭受生物降解之前两组样品的族组成及地球化学特征有明显区别。Da12-2和Da12-3可归类于第五类原油,在生物降解之前为第三类原油,由第一和第二两类原油混合而形成,并且以第一类原油为主。与油样Da1401和Da701相比,这两个油砂样的原油在生物降解之前,含有更多的第一类原油的组分。因为两个油砂样的甾烷异构化比值要相对高于油样Da1401和Da701。

3 受控因素及其意义

原油遭受生物降解最直接的原因是油层埋藏浅,圈闭条件受到破坏,地表水源源不断地渗入油藏,使细菌得以大量繁殖^[11,12]。

在达6井5个油砂样中,上部2个和下部2个油砂样中的原油均发生了生物降解作用,而中部1个油砂样中的原油保留完好,未受生物降解的影响。在达12井5个油砂样中,上部1个油砂样和下部2个油砂样都未遭受生物降解,而中间的2个油砂样中的原油却遭受较强烈的生物降解作用,正构烷烃与类异戊二烯烷烃基本消失。尤其是Da1201油样(416.6~424.0 m)与Da12-2油砂样(426.0 m)仅隔2 m,后者原油遭受较强的生物降解(图3b),而前者未受影响(图1b)。达12井未发生生物降解的3个油砂样Da12-1, Da12-4和Da12-5抽提物重量分别占样品总重量的7.07%, 11.77%和12.56%,砂岩孔隙度在20%以上。单

纯从油层埋深和砂层与地表水连通性方面很难解释达6井和达12井油层的生物降解作用。

达6井上、下部4个遭受生物降解的油砂样在生物降解之前为第一类原油,即成熟度较高的稀油。中间未遭受生物降解的油砂原油为第二类原油,属原生未成熟特稠油。

达12井中间2个遭受生物降解的油砂原油在生物降解之前为第三类原油,是由第一和第二类原油混合而形成的,并以第一类原油为主,也属于正常原油。该井上、下部的3个未遭受生物降解的油砂原油属典型的第二类原油,即未成熟特稠油。达6和达12井第二类原油未遭受生物降解,而相邻的其他类型的原油均发生较强的生物降解。这一现象说明,该油田原油的族组成和物性是影响生物降解作用的重要因素。尽管我们还不清楚第二类原油未发生生物降解的原因和机理,或许是由于非烃含量太高,抑制了细菌的生存,也可能是粘度太大,因为该类原油在地表就像固化的沥青一样,油层本身就属于天然的隔水层,使地表水无从渗入,因此,未受生物降解的影响。

白音查干凹陷在早白垩世晚期,发生整体抬升,未再沉降。烃源岩生、排烃期在盆地抬升之前,而生物降解则发生在抬升之后。此外,第三类原油是由第一和第二类原油混合形成的,而第三类原油也广泛遭受生物降解。这也说明,在生物降解之前,各类原油都已聚集成藏,第二类原油并不是在生物降解之后才注入的。第二类原油 Ph/nC_{18} 比值高,但 Pr/nC_{17} 比值低,不表明原油发生过生物降解作用。都红木组一段烃源岩饱和烃色谱图和第二类原油非常相似^[4]。

可以认为油源是决定达尔其油田原油物性和族组成的主要因素。鉴于在当前技术条件下,第二类未成熟特稠油还没有开采价值,因此,该地区油气勘探应主要针对深部腾格尔组和阿爾善组二段成熟烃源岩油源的油藏,诸如位于都红木组一段源岩之下的圈闭,或者有断层和腾格尔组、阿爾善组二段源岩沟通的圈闭。来源于浅部、未熟的都红木组一段源岩的油藏必须要有一定比例的、来

源于深部源岩的原油补充,才可能形成有开采效益的油藏。

达尔其油田第二类原油未受生物降解的影响,也许只是一个少有的特例,但也确实说明了极性组分(非烃与沥青质)含量高、粘度大的油不容易发生生物降解。这对当前日益受到重视的微生物开采技术也有借鉴意义。

参 考 文 献

- 1 肖安成,杨树锋,陈汉林.二连盆地形成的动力学背景[J].石油与天然气地质,2001,22(2):137~140
- 2 张新建,方建明.白音查干凹陷油气成藏特征分析[J].石油与天然气地质,2000,21(1):61~64
- 3 朱光有,金强,周建林,等.济阳坳陷胜坨油田原油物性及其成因探讨[J].石油与天然气地质,2004,25(1):9~13
- 4 谈玉明,冯建辉,靳广兴,等.白音查干凹陷达尔其油田原油地球化学与物性特征[J].地球化学,2003,32(3):271~281
- 5 刘华,蒋有录,杨万芹,等.东营凹陷中央隆起带油源特征分析[J].石油与天然气地质,2004,25(1):39~43
- 6 Seifert W K, Moldowan J M. Applications of steranes, triterpanes and monoaromatics to the maturation of crude oils[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1978, 42:77~95
- 7 Peters K E, Moldowan J M. The biomarker guide: interpreting molecular fossils in petroleum and ancient sediments[M]. New Jersey: Prentice-Hall, 1993. 110~265
- 8 傅家谟,盛国英,江继刚.膏盐沉积盆地形成的未成熟石油[J].石油与天然气地质,1986,7(2):150~158
- 9 彭平安,傅家谟,盛国英,等.膏盐沉积环境及成烃有机地球化学特征[J].中国科学(B辑),1989,(1):84~92
- 10 Shi Ji-Yang, Mackenzie A S, Alexander R, et al. A biological marker investigation of petroleum and shale from the Shengli Oilfield, People's Republic of China[J]. *Chemical Geology*, 1982, 35:1~31
- 11 黄第藩,李晋超.陆相沉积中的未熟石油及其意义[J].石油学报,1987,8(1):1~9
- 12 张林晔,张春荣.低熟油生成机理及成油体系——以济阳坳陷牛庄洼陷南部斜坡为例[M].北京:地质出版社,1999. 1~123
- 13 Larter S R, Aplin A C. Reservoir geochemistry: methods, applications and opportunities[A]. In: Cubitt J M, England W A. The geochemistry of reservoirs[C]. London: Geological Society Special Pub, 1997, 86: 2~32
- 14 Hunt J M. Petroleum Geochemistry and Geology[M]. New York: W H Freeman and Company, 1996
- 15 Tissot B P, Welte D H. Petroleum formation and occurrence[M]. New York: Springer-Verlag, 1984