

文章编号:1000-0550(2004)增刊-0061-05

柴达木盆地原油成因研究^①

段毅 张辉 郑朝阳 吴保祥

(中国科学院兰州地质研究所 兰州 730000)

摘 要 柴达木盆地是我国西北地区大型含油气盆地之一。经过 50 年的油气勘探,已在该盆地发现 18 个油田,它们主要分布柴西地区,对其成因一直是人们关注的问题。通过对这些油田原油的物理化学性质、油源对比和成因机制综合研究表明,柴西地区和柴北地区是两个不同的成油单元,它们原油的形成环境、母质类型、成熟度和油源都是截然不同的。并且认为,虽然柴达木盆地第三系生油岩有机碳含量较低,但是其形成于强还原和咸水环境,有利于生物脂类的保存,生物脂类与可溶有机质和干酪根一起在低成熟阶段可以生成大量石油,是柴西地区未熟低熟原油形成的主要途径。

关键词 柴达木盆地 原油 成因机制

第一作者简介 段毅 男 1956 年出生 博士 研究员 博士生导师 油气地球化学

中图分类号 P593 **文献标识码** A

柴达木盆地是我国西部重要的含油气盆地,自 1954 年该盆地油气勘探以来,已经发现了 18 个油田,大部分油田分布在柴达木盆地西部坳陷区,只有几个油田分布在北部断块带(图 1)。西部坳陷区发现的生油岩主要为第三系渐新统下干柴沟组和中新统上干柴沟组的泥岩、泥灰岩和钙质泥岩,它们形成于咸水—超咸水湖泊环境^[1],具有比较低的有机碳含量(平均为 0.59%),机质类型为 I 型,成熟度范围变化较宽,但是

主要为低成熟。北部断块带发现的生油岩主要为中、下侏罗系泥岩、炭质泥岩和煤层,下侏罗统烃源岩中煤、炭质泥岩不发育,中侏罗统烃源岩中煤比较发育,是仅次于暗色泥岩的另一套重要烃源岩,油页岩只在红山和鱼卡地区发育,它们形成于淡水湖沼环境。中、下侏罗系泥岩和炭质泥岩有机碳含量一般大于 1%,有机质类型主要为 III 型,其次为 II 型,有机质成熟度从低成熟至过成熟。柴达木盆地原油的成因一直是人们关注

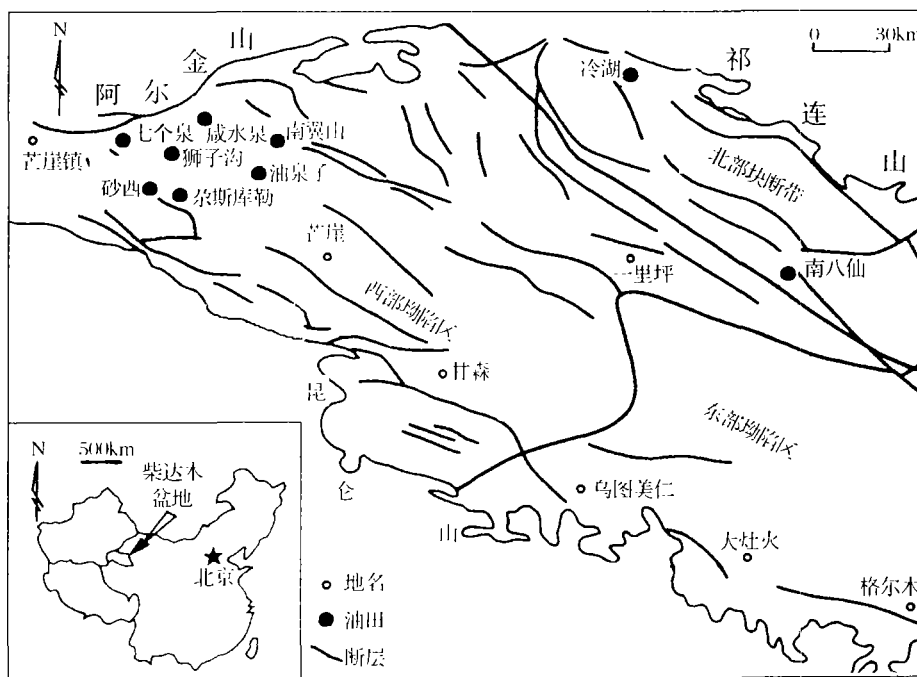


图 1 柴达木盆地油气分布

Fig. 1 Sketch map of oil and gas field in the Qaidam basin

①中国科学院资源环境领域知识创新工程重要方向项目(KZCX3-SW-128)

收稿日期:2003-12-29

的问题^[1~4]。本文对采集于柴北地区、柴西地区原油和第三系、侏罗系烃源岩的饱和烃、芳烃组分及原油进行了系统的地球化学分析,研究了原油的物理化学性质的地球化学特征和油源对比,探讨了它们的成因机制,为柴达木盆地原油的成因认识提供了进一步证据。

1 原油的整体性质

柴达木盆地原油密度总体偏低,为 0.804 0~0.864 2 g/cm³(表 1)。柴西地区低成熟原油密度较高,为 0.818 0~0.864 2 g/cm³,低于我国绝大多数低成熟原油密度的 0.850 0~0.940 0 g/cm³^[5],但是要高于

柴北地区成熟原油的密度,后者为 0.804 0~0.814 6 g/cm³。原油的密度直接与原油中非烃和沥青质相对含量有关。如表 1 所示,原油的密度随非烃+沥青质的相对含量增加而变大。柴北地区原油为成熟原油,饱和烃相对含量较高,非烃+沥青质的相对含量较低,其密度较低;柴西地区原油为低成熟原油,饱和烃相对含量较低,非烃+沥青质的相对含量较高,其密度较高。柴达木盆地低成熟原油粘度的分布是柴西地区除南翼山原油粘度小外,其他原油粘度分布在 7.90~25.20 mPa·s 之间,明显地高于柴北地区成熟原油的粘度(1.46~6.62 mPa·s)。

表 1 原油物理性质和族组成

Table 1 Physical features and fraction components of the crude oils

油田	密度/g·cm ⁻³	粘度/mPa·s ⁻¹	凝点/℃	饱和烃/%	芳烃/%	非烃/%	沥青质/%	非烃+沥青质/%	饱和烃 芳烃	非烃 沥青质
狮子沟	0.854 0	8.94	29.3	38.7	2.1	39.1	20.1	59.2	18.4	1.9
花土沟	0.846 9	7.90	17.0	36.7	6.8	53.4	3.2	56.6	5.4	16.7
尕斯	0.834 9	15.10	34.4	43.3	5.2	45.3	6.2	51.5	8.3	7.3
南翼山	0.818 0	0.53		45.2	6.9	46.9	1.0	47.9	6.6	46.9
油泉山	0.853 0	8.58		36.3	7.4	52.1	4.2	56.3	4.9	12.4
冷湖三	0.810 5	6.62	-2.0	54.9	8.9	34.7	1.5	36.2	6.2	23.1
冷湖四	0.814 6	5.03	-6.0	51.1	8.8	37.2	2.9	40.1	5.8	12.8
冷湖五	0.805 0	1.46	-9.0	80.0	4.4	14.8	0.8	15.6	18.2	18.5
南八仙	0.804 0	1.84		92.2	2.4	5.1	0.4	5.5	38.4	12.8

2 原油的形成环境

原油中生物标志化合物的分布,在柴西地区和柴北地区明显不同,反映了它们的原油形成环境和成油母质类型不同。柴西地区原油正构烷烃 CPI 值为 0.94~0.99,显示了偶奇优势(表 2);Pr/Ph 比值为 0.42~0.67,具有植烷优势;并且含有丰富的β胡萝卜素,胡萝卜素/藿烷比值在 0.06~0.33 之间;含有相对较高的硫茚化合物(图 2);存在丰富的脱羟基维生素 E 系列化合物;具有较重的碳同位素组成,δ¹³C 值为 -25.4‰~-27.5‰,这些说明它们主要形成于强还原环境。柴北地区原油 CPI 值为 1.06~1.12,略显奇偶优势;Pr/Ph 比值较高,为 3.08~3.75;未检出β胡萝卜素,含有相对较高的氧茚化合物;未检出脱羟基维生素 E 系列化合物;具有较轻的碳同位素组成,δ¹³C 值为 -26.7‰~-31.6‰,这些反映了它们主要形成于弱氧化或弱还原成油环境^[4,6~8]。

伽玛蜡烷在西部原油中很丰富,伽玛蜡烷/C₃₀αβ藿烷比值高达 0.27~1.00;在柴北地区原油中很低,该比值仅为 0.03~0.08。两地区原油中>C₃₀藿烷的含量明显不同,柴西地区原油中>C₃₀藿烷的含量较高,除油泉子原油外,均大于 38%;而柴北地区原油中>

C₃₀藿烷的含量较低,都小于 36.5%。这些说明柴西地区原油形成于盐湖相成油环境,而柴北地区原油形成于淡水湖沼相成油环境^[4,9~11]。

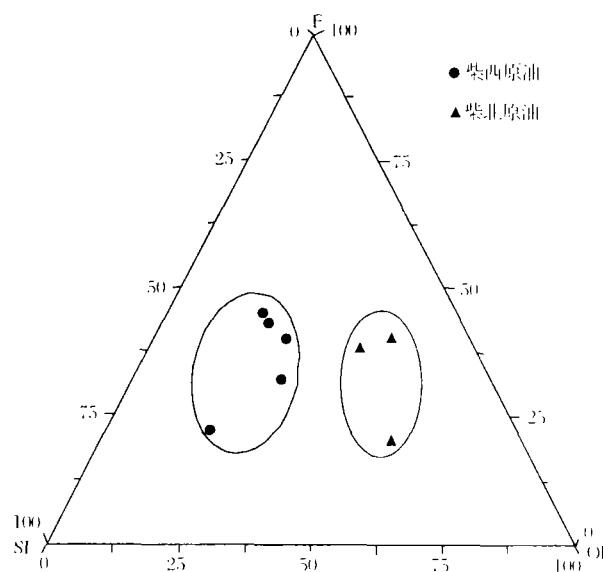


图 2 原油芳烃中三芴系列组成

Fig. 2 Distributions of fluorene, dibenzofuran and dibenzothiophene in the crude oils

柴西地区原油中 C₂₇甾烷含量较高,为 35.7%~52.7%,C₂₉甾烷含量较低,为 28.8%~39.8%(图 3);

表 2 原油分析资料
Table 2 Analytical data of the crude oils

地区	油田	CPI	Pr/Ph	Pr/nC ₁₇	Ph/nC ₁₈	C ₃₀ 甾烷 规则甾烷	重排甾烷 规则甾烷	>C ₃₀ 甾 烷/%	伽玛蜡烷 C ₃₀ αβ甾烷	T _s T _m	环己烷 藿烷	胡萝卜烷 藿烷	维生素 E 甾烷	三芳 甾烷	2,4-/2,3- DMP	温度 /°C	δ ¹³ C /‰
柴西地区	狮子沟	0.88~0.99	0.49~0.53	0.49~1.42	0.89~3.69	0.21~0.38	0.07~0.10	51.3~44.8	0.66~0.78	0.23~0.43	7.3~16.2	0.19~0.33				-25.4~-26.3	
	花土沟	0.93	0.51	0.59	1.22	0.14	0.11	38.1	0.46	0.56	15.8	0.20				-26.6~-26.7	
柴北地区	七个泉	0.88	0.40	0.56	1.56	0.26	0.08	50.4	0.75	0.28	8.0	0.19				-26.3~-27.3	
	尕斯	0.94~0.98	0.41~0.67	0.48~1.02	0.91~1.77	0.09~0.31	0.06~0.10	41.2~48.0	0.54~0.80	0.28~0.41	2.9~14.4	0.06~0.14	++++	0.13~0.18	109.4~114.3	-26.0~-27.5	
	咸水泉	0.87	0.44	2.60	5.69	0.13	0.06	40.4	0.62	0.39	6.4	0.20				-26.4	
	南翼山	0.98	0.66	0.73	1.20	0.25	0.14	46.3	0.43	0.53	15.7	0.16				-26.5~-26.7	
	油泉子	0.94~0.97	0.55~0.64	0.53~1.16	0.76~1.55	0.25~0.32	0.05~0.08	26.3~33.6	0.27~0.30	0.53~0.44	7.1~13.4	0.07~0.09				-26.8	
柴北地区	冷湖	1.06~1.08	3.08~3.23	0.30~0.60	0.10~0.12	0	0.25~0.40	30.0~36.5	0.03~0.08	1.55~1.76	20.7~36.0	0		0.40~0.51	126.3~129.9	-26.7~-31.6	
	南八仙	1.12	3.75	0.28	0.08	0	0.35	31.4	0.05	2.47	63.6	0				-28.1	

注: - 为不存在; + 为存在; ++ 为低丰度; +++ 为高丰度; DMP 为二甲基戊烷。

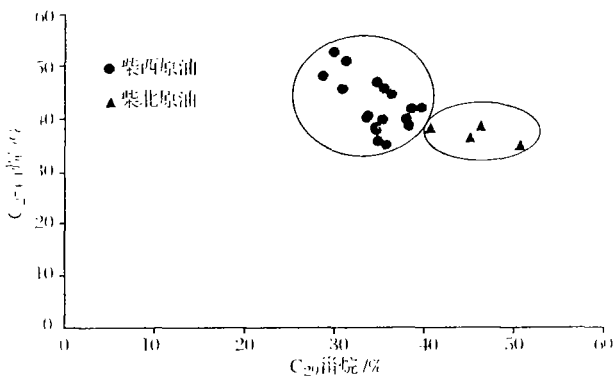


图 3 原油中 C₂₇ 和 C₂₉ 甾烷含量相关
Fig. 3 Cross plot of relative contents of C₂₇ and C₂₉ steranes in the crude oils

含丰富的 4-甲基甾烷, 4-甲基甾烷/规则甾烷比值为 0.09~0.38; 烷基环己烷含量较低, 烷基环己烷/藿烷比值为 2.9~16.2, 这些说明柴西地区原油的母质主要为菌藻类。而柴北地区原油中甾烷的含量是 C₂₉ 组分高, 为 40.7%~50.6%, C₂₇ 组分低, 为 34.6%~38.3%; 未检出 4-甲基甾烷; 烷基环己烷含量较高, 烷基环己烷/藿烷比值介于 20.7~63.6, 这些反映了柴北地区原油主要起源于陆源高等植物^[9,11]。

3 原油的成熟度

C₂₉ 甾烷 20S/20S+20R 和 ββ/ββ+αα 比值、重排甾烷相对含量、T_s/T_m 比值和轻烃异构体参数都是有机质成熟度指标, 可以用来确定原油的成熟度。Huang 等^[12]把 C₂₉ 甾烷 20S/20S+20R 和 ββ/ββ+αα 比值这两个参数分别为 0.25 和 0.27 定为未成熟和低成熟界限, 分别为 0.42 和 0.43 定为低成熟和成熟界限。据此

对所研究原油成熟度的划分如图 4 所示, 柴西地区存在着未成熟、低成熟和成熟三种原油类型, 柴北地区原油均为成熟原油。原油中重排甾烷的相对含量随成熟度增加(表 2), 是一个很好的成熟度指标。柴西地区原油中重排甾烷含量较低, 重排甾烷/规则甾烷比值为 0.05~0.14, 指示了其成熟度相对较低。柴北地区原油中重排甾烷含量较高, 重排甾烷/规则甾烷比值为 0.25~0.40, 反映了其成熟度相对较高。T_s/T_m 比值与重排甾烷含量一样, 通常也作为成熟度参数。该比值在柴西地区原油中较低, 为 0.23~0.44, 说明原油成熟度相对较低。在柴北地区原油中较高, 为 1.55~2.47, 表明原油成熟度相对较高。已有的研究表明, 原油中的轻烃异构参数与原油的成熟度有一定的相关性, Mango^[13,14]认为 2,4-/2,3-二甲基戊烷比值是温度的函数, 不受母源性质和沉积环境的影响。BeMent 等^[15]建立了这个比值与原油形成温度的关系式。我们

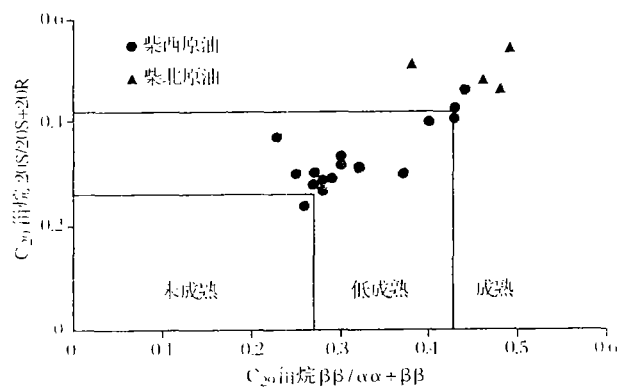


图 4 原油中 C₂₉ 甾烷 20S/(20R+20S) 和 ββ/(ββ+αα) 比值相关

Fig. 4 Cross plot of C₂₉ sterane 20S/(20R+20S) ratios and ββ/(ββ+αα) ratios in the crude oils

分析结果表明,柴西地区原油中 2,4-/2,3-二甲基戊烷比值较低,为 0.13~0.18,对应的原油最大生成温度为 109.4~114.3℃。柴北地区原油中 2,4-/2,3-二甲基戊烷比值较高,为 0.40~0.51,对应的原油最大生成温度为 126.3~129.9℃。这些同样说明柴西地区原油的成熟度比柴北地区原油的低。

4 油源对比

原油中类异戊二烯烃化合物和伽玛蜡烷与母源具有亲缘关系,因此可以用类异戊二烯烃化合物和伽玛蜡烷参数进行油源对比。如图 5 所示,柴西地区原油的点群分布在第三系生油岩可溶有机质点群范围内,它们具有低的 Pr/Ph 比值和高的伽玛蜡烷/C₃₀ 比值;柴北地区原油的点群分布在中下侏罗系生油岩可溶有机质点群范围内,它们具有高的 Pr/Ph 比值和低的伽玛蜡烷/C₃₀ 比值。这说明柴西地区原油来自第三系盐湖相烃源岩,柴北地区原油来自中下侏罗系淡水成因的湖沼相烃源岩。

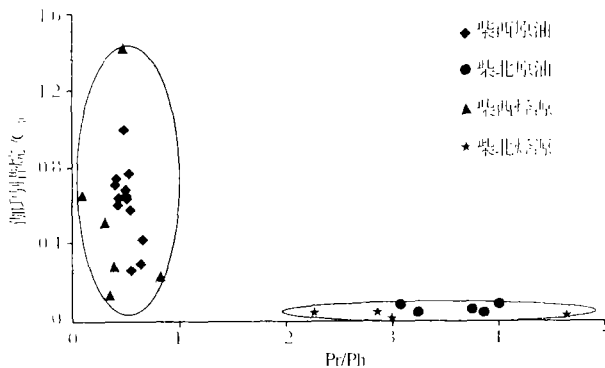


图 5 原油和生油岩中 Pr/Ph 与伽玛蜡烷/C₃₀ 比值相关
Fig. 5 Cross plot of Pr/Ph ratios and gammacerane/C₃₀ hopane ratios in the crude oils

甾烷的碳数分布反映了母源的形成环境和母质类型,是最有效的油源对比参数之一。如图 6 所示,柴西地区原油与西部第三系生油岩可溶有机质具有相对较高的 C₂₇ 甾烷,它们分布在一个区域内;柴北地区原油和中下侏罗系生油岩含有相对高的 C₂₉ 甾烷,它们分布在一个区域内,说明柴西地区原油与第三系生油岩有亲缘关系,而柴北地区原油与中下侏罗系生油岩关系密切。

原油和生油岩中芳烃化合物的组成和分布也是进行油源对比研究的重要参数。柴西地区和柴北地区原油和生油岩中芳烃组成差异显著,并且具有很好的可对比性。例如,上述所述的柴西地区原油芳烃中三芳甾烷含量较高,柴北地区原油芳烃中三芳甾烷含量较低,对于生油岩中芳烃组成的分析结果同样表明,柴西地区第三系生油岩中的三芳甾烷含量较高,柴北地区侏

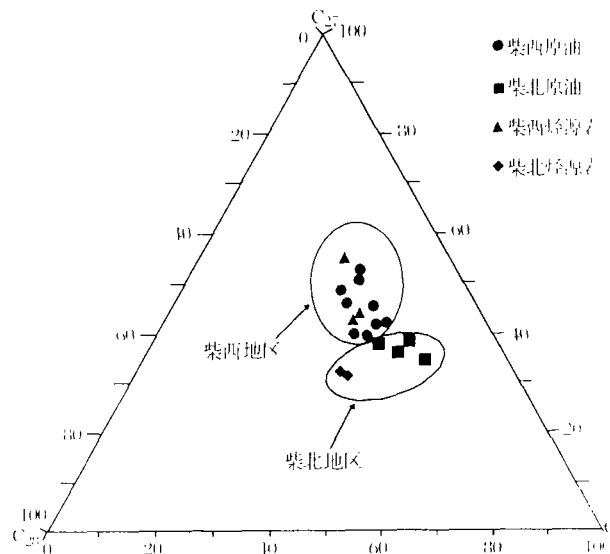


图 6 原油和生油岩中 C₂₇、C₂₈ 和 C₂₉ 甾烷分布
Fig. 6 Distributions of C₂₇, C₂₈ and C₂₉ sterane compositions in the source rocks and crude oils

罗系生油岩中的三芳甾烷含量较低(未发表资料)。进一步说明柴西地区原油起源于第三系生油岩,柴北地区原油起源于侏罗系烃源岩。

5 原油的成因

世界上许多地区存在工业性的未熟、低熟油气藏,这种油气的发现,突破了经典的有机质晚期成烃理论,开拓了新的油气研究和勘探领域,目前已成为国内外油气地质研究的热点领域。如上所述,柴达木盆地已找到的石油主要为未熟、低熟原油,并且通过油源对比证明了这些未熟、低熟原油来自第三系盐湖相低成熟生油岩。为了认识这些未熟、低熟原油的成因,对柴达木盆地第三系盐湖相低成熟生油岩(R₀=0.32%)的可溶有机质氯仿“A”和岩石分别进行了热模拟实验,结果发现柴达木盆地第三系盐湖相低成熟生油岩在热模拟温度 200~300℃ 之间的低成熟演化阶段,都可以生成大量的液态烃,并且 250℃ 达到生烃和排烃最高峰^①。这对柴达木盆地低成熟油气研究是一个突破性的发现。因为一般的生油岩热模拟液态烃生成高峰温度都在 350℃ 左右,相比之下,柴达木盆地第三系盐湖相低成熟生油岩热模拟生烃高峰温度提前 100℃;同时,也证明了沥青“A”也是该烃源岩液态烃生成的重要贡献者。对柴达木盆地未熟、低熟原油中丰富的非烃组分(占原油的 27.0%~55.8%)研究表明^②,它们由脂肪酸、烷基醇、脂肪酸脂肪酸甘油一酯和酰胺及甾醇所组成(表 3)。原油中这些非烃化合物的大量存在,特别是高

① 孟任祥,张晓宝,房玄,等. 柴达木盆地第三系烃源岩热模拟实验研究. 2003

表3 原油中非烃组分的相对丰度

Table 3 Relative abundances of non-hydrocarbon compounds in the crude oils

样品号	烷基醇/%	脂肪酸/%	甘油一酯/%	甾醇/%	酰胺/%
花土沟	35.1	29.6	32.7	1.5	1
狮子沟	33.3	13.1	46.6	1.6	5.4
油砂山	39.1	12.2	45.8	1.9	1.0
油砂山	37.2	42.3	18.8	0.8	0
尕斯	36.9	13.4	48.1	0.8	0.8
尕斯	29.6	21.3	47.6	1.3	0.2

含量的脂肪酸甘油一酯的存在,表明原油主要来自生物脂类。另外,所研究的原油正构烷烃具有明显的偶奇优势,色谱主峰碳数为 C_{16} (C_{18} 或 C_{22}),正构烷烃这种分布特征与脂肪酸、烷基醇和脂肪酸甘油一酯的相似^[2],说明正构烷烃可能主要来自这些化合物的还原产物。因此,虽然柴达木盆地第三系生油岩有机碳含量较低,但是其形成的环境为强还原和咸水环境,有利于生物脂类的保存,生物脂类与可溶有机质和干酪根一起在低成熟阶段生成大量石油,是柴西地区未熟低熟原油形成的主要途径。这种柴达木盆地第三系盐湖相低成熟油的形成机制丰富了低成熟油气成因理论,并为柴达木盆地寻找低成熟石油提供了科学依据。

参考文献(References)

- 1 黄杏珍,邵宏舜,顾树松. 柴达木盆地的油气形成与寻找油气田方向. 兰州:甘肃科学技术出版社,1993. 363~370
- 2 段毅,王智平,张晓宝,等. 柴达木盆地西部原油极性化合物特征及其地球化学意义. 地质学报,2003,77(3):414~422
- 3 Ritts B D, Hanson A D, Zinniker D, *et al.* Lower-Middle Jurassic nonmarine source rocks and petroleum systems of the northern Qaidam basin, northwest China. AAPG Bulletin, 1999, 83: 1980~3200
- 4 Hanson A D, Ritts B D, Zinniker D, *et al.* Upper Oligocene lacustrine source rocks and petroleum systems of the northern Qaidam basin, northwest China. AAPG Bulletin, 2001, 85: 601~3619
- 5 王铁冠,钟宁宁,侯谈杰,等. 低熟油气形成机理与分布. 北京:石油工业出版社,1995
- 6 ten Haven H L, Leeuw J W de, Rullkötter, *et al.* Restricted utility of the pristane/phytane ratio as a palaeoenvironmental indicator. Nature, 1987, 330: 641~3642
- 7 包建平,王铁冠,干一女. 脱羟基维生素E及其地球化学意义. 江汉石油学院学报,1989,11(3):10~316
- 8 段毅,彭德华,张晓宝,等. 柴达木盆地原油碳同位素组成的主控因素与成因类型. 沉积学报,2003,21(2):355~3359
- 9 Moldowan J M, Seifert W K, Gallegos E J. Relationship between petroleum composition and depositional environment of petroleum source rocks. AAPG Bulletin, 1985, 69: 1255~31268
- 10 Fu J G, Sheng P, Peng S C, *et al.* Peculiarities of salt lake sediments as potential source rocks in China. Org Geochem, 1986, 10: 119~3126
- 11 Philp R P, Fan P, Lewis C A, *et al.* Geochemical characteristics of oils from Chaidamu, shanganning and Jiangnan basins, China. Journal of Southeast Asian Earth Sciences, 1991, 5: 351~3358
- 12 Huang D F, Li J C, Zhang D J, *et al.* Maturation sequence of Tertiary crude oils in the Qaidam Basin and its significance in petroleum resource assessment. Journal of Southeast Asian Earth Sciences, 1991, 5: 359~3365
- 13 Mango F D. An invariance in the isoheptanes of petroleum. Science, 1987, 273: 514~3517
- 14 Mango F D. The origin of light hydrocarbons in petroleum: A kinetic test of the steady-state catalytic hypothesis. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1990, 54: 1315~31323
- 15 BeMent W O, Levey R A, Mango F D. The origin of oil generation as defined with a C7 chemistry parameter (2,4-DMP/2,3-DMP). Grimalt J O, Dorransoro C. Organic Geochemistry: Developments and Application to Energy, Climate, Environment and Human History. A. I. G. O. A., San Sebastian, 1995. 505~3507

Study on Genesis of Crude Oil from Qaidam Basin

DUAN Yi ZHANG Hui ZHENG Chao-yang WU Bao-xiang

(Lanzhou Institute of Geology, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 73000)

Abstract Qaidam basin is one of the largest petroliferous basins in the northwestern China. After 50 years oil-gas exploration, 18 oil fields have been found in this basin, which are mainly distributed in the western portion of Qaidam basin. Their geneses are always the focus in which people are interested. The physical and chemical character, oil-rock correlation and genetic mechanism are studied, it is indicated that the western Qaidam and the northern Qaidam are two different oil-generating units, that they have obviously different oil-forming environments, precursor types, maturity and source of oil. Although organic carbon abundance of source rocks is low, plant lipids are well preserved in the reducing and saline acustrine environments. Plant lipids together with soluble organic matter and kerogen can generate a significant volume of crude oil at low mature stage and be the main way to produce immature and low mature crude oils in the western Qaidam basin

Key words Qaidam basin, crude oils, genetic mechanism