

<http://www.geojournals.cn/dzxb/ch/index.aspx>

鄂尔多斯盆地西峰油田原油地球化学特征及其成因

段毅¹⁾, 吴保祥¹⁾, 张辉²⁾, 郑朝阳¹⁾, 王传远¹⁾

1) 中国科学院兰州地质研究所, 730000; 2) 中国科学院广州地球化学研究所, 510640

内容提要: 通过对鄂尔多斯盆地西峰油田原油进行系统地采样和高分辨率的 GC-MS、IRMS 分析, 研究了原油的生物标志化合物和碳同位素组成特征, 并且进行了油源对比, 探讨了其成因。研究资料指示了所研究原油属于同一成因类型; 原油有机母质为菌藻类和高等植物, 特别是高等植物为原油的形成作出了贡献; 原油形成于弱还原和淡水或微咸水环境; 原油均为成熟原油; 原油地球化学特征和上三叠统延长组长, 油层组具有亲缘关系, 反映了原油主要来源于长₇油层组。这些研究结果为盆地的石油勘探提供了科学依据。

关键词: 鄂尔多斯盆地; 原油; 生物标志化合物; 组成和分布特征; 碳同位素; 成因

西峰油田位于鄂尔多斯盆地伊陕斜坡的南部, 是新发现的一个大型油田。虽然20世纪70年代和90年代在该区对现在西峰油田目的层进行过研究和勘探, 但是均未取得实质性突破。直到2001年在西峰董志和合水板桥等地区勘探获得重大突破, 特别是西峰地区西17井在现在油田目的层获得日产34.68 t的高产纯油后, 经过进一步石油勘探, 发现了西峰油田这样一个亿吨级大油田。目前初步评价推测油田的储量规模在近期可以达到 $2 \times 10^8 \sim 3 \times 10^8$ t (付金华等, 2004)。

盆地中上三叠统延长组和下侏罗统延安组既是生油层, 又是储集层 (屈红军等, 2003)。延长组主要由一套内陆沉积碎屑岩构成, 厚度达500~1200m, 自上而下可以划分为10个油层组 (长₁至长₁₀油层组)。盆地延长组的石油勘探以往重点在长₆油层组, 并且在伊陕斜坡的陕北地区找到了4个大油田。西峰油田主力油层为长₆油层组, 是盆地中在长₆找到的第一个大油田。长₆油层组储层为三角洲砂体, 分布面积大, 砂岩孔隙以粒间孔为主, 孔隙度一般为5.4%~16.6%, 渗透率主要集中在 $0.6 \times 10^{-3} \sim 3.0 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 之间。其他油层组中含油性较差, 其中中上部长₅和长₃油层组油藏分布在西峰油田西北部镇原以北地区。延安组由河流和湖沼沉积碎屑岩构成, 自上而下也分成10个油层组 (延₁至延₁₀), 其中河流

砂岩和三角洲前缘砂岩及远坝砂岩成为延安组重要的储集岩。西峰油田延安组油藏分布在油田西北部镇原以北地区。油田为岩性砂体前方的岩性致密遮挡及砂体尖端的封闭而形成的岩性油藏。从油源岩来说, 延长组中部长₄₊₅—长₆油层组为浅湖—深湖沉积, 特别是长₇油层组为深湖沉积, 最大沉积中心位于华池—富县一带; 长₇油层组有机碳含量较高, 有机质类型好, 有机质处于成熟阶段, 构成盆地重要的油源岩。延安组为湖沼沉积, 具有煤系烃源岩特征, 有机质成熟度相对较低, 形成工业性油藏的可能性小。

以往西峰油田石油地质研究主要集中在储层和油源岩评价方面, 尚未见原油地球化学研究方面的报道。我们系统地采集了西峰油田原油样品, 研究了原油的母质性质、形成环境和成熟度, 进而进行了油源对比。为了进行对比研究, 研究样品中还包括了盆地中华池油田的2个延安组原油和3个二叠系原油。这些研究有助于了解此类大油田的成因, 并为盆地中石油勘探提供了科学依据。

1 样品与分析

样品均为2003年3月份采集, 来自鄂尔多斯盆地西峰油田近几年开采的油井 (图1), 并且以前均未进行过原油地球化学分析; 样品采集时, 对油水进

注: 本文为中国科学院国际合作重点项目 (编号 GJHZ0530)、中国科学院环局知识创新重要方向项目 (编号 KZCX3-128) 和国家重点基础研究发展计划“973”项目 (编号 2005CB422105) 资助的成果。

收稿日期: 2004-05-08; 改回日期: 2005-12-12; 责任编辑: 周健。

作者简介: 段毅, 男, 1956年生, 博士。现为中国科学院兰州地质研究所研究员, 博士生导师, 主要从事油气地球化学和有机地球化学研究。通讯地址: 730000, 兰州市东岗西路324号; 电话: 0931-4960889; 传真: 0931-8278667。

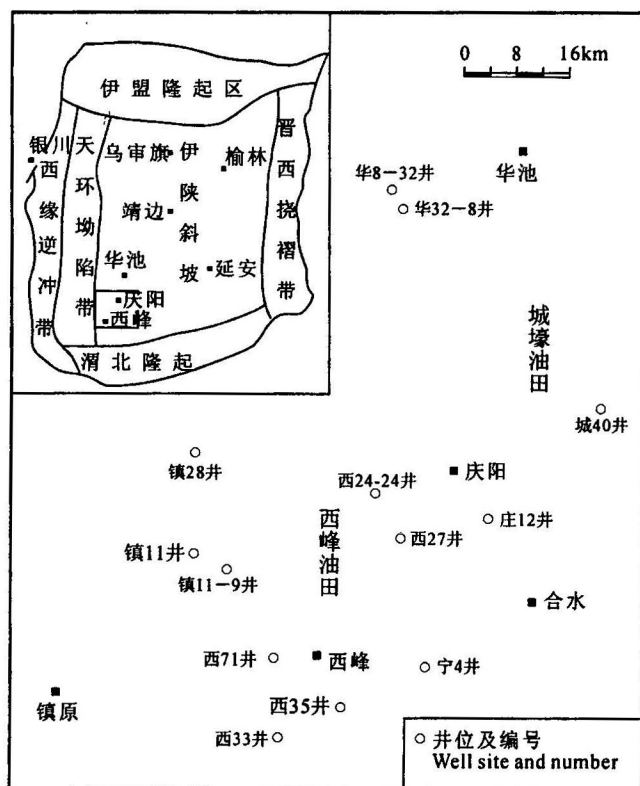


图 1 样品采集位置图

Fig. 1 Studied area showing the sampling location

行了分离;运回实验室在低温下保存。取原油经沉淀沥青质后,用氧化铝/硅胶柱色谱进行分离。饱和烃和芳烃馏分分别用正己烷和苯冲洗,非烃馏分用乙

醇冲洗。然后,饱和烃馏分用色谱(GC)和美国安捷伦科技公司(Agilent)制造的色谱-质谱联用仪(GC-MS)进行分析鉴定。MS 为 5973N,离子源温度为 250℃,电离电压为 70eV。GC 为 6890N,色谱柱为 HP-5(30m×0.32mm),固定相涂膜厚度 0.25μm,载气为氦气,起始温度 80℃,以 4℃/min 升温至少 300℃,然后恒温 30min。

2 结果与讨论

2.1 原油的母源性质及形成环境

西峰油田原油中正构烷烃分布极为相似,主峰碳为 $C_{19} \sim C_{21}$;除 E-11 样品外, C_{21}^-/C_{21}^+ 分布在 0.66~0.90 之间,均小于 1(表 1、图 2),反映了高碳数正构烷烃占优势,说明原油的母质由陆生植物和水生生物构成,并且陆生植物具有较大的贡献。原油中 Pr/nC_{17} 和 Ph/nC_{18} 值,通常用来研究母质类型、形成环境和成熟度(Connan and Cassou, 1980; Peters et al., 1999; Hanson et al., 2000)。西峰油田原油的这两个比值分布在一个较窄的范围内,反映它们来自一个类似的生物源(图 3; Li et al., 1999),其大小指示了原油母质为混合型(图 4)。

规则甾烷的分布可以提供原油母质信息(Moldowan et al., 1985; Philp et al., 1991; Duan et al., 2001)。西峰油田原油 C_{27} 、 C_{28} 和 C_{29} 甾烷的相对含量分别为 23.0%~26.5%、26.8%~30.2% 和 44.7%~50.0%(表 2),这些值在图 5 中分布范围

表 1 西峰油田原油中正构烷烃和类异戊二烯烷烃分析资料

Table 1 Analytical data of *n*-alkanes and isoprenoid alkanes of crude oils from the Xifeng oilfield

样品类型	油田	样号	井号	层位	深度(m)	碳数范围	主峰碳数	OEP	C_{21}^-/C_{21}^+	Pr/Ph	Pr/ nC_{17}	Ph/ nC_{18}
油样	华池油田	Y-5	华8-32	Y ₈	1208	14~35	25	1.06	0.32	0.98	0.85	0.84
		Y-7	华32-8	Y ₁₀	1376	14~35	19	1.04	0.62	1.16	0.40	0.34
	西峰油田	E-22	镇11-9	Y ₈	1601	12~36	20	1.04	0.77	1.23	0.71	0.55
		E-17	镇28	长 ₃	1603	12~35	19	1.02	0.84	1.11	0.45	0.40
		E-19	镇11	长 ₃	1637	12~35	20	1.02	0.82	1.14	0.71	0.60
		Zh-1	庄12	长 ₈	1539	11~38	19	1.05	0.93	1.02	0.66	0.65
		E-11	西27	长 ₈	1817	11~34	19	1.03	1.49	1.07	0.78	0.71
		E-12	西24-24	长 ₈	1450	11~36	19	1.06	0.90	1.34	0.46	0.34
		E-9	西74	长 ₈	1660	11~38	21	1.01	0.77	1.17	0.61	0.51
		E-6	西33	长 ₈	1463	11~37	21	1.03	0.78	1.17	0.97	0.81
		E-3	西35	长 ₈	1328	14~36	20	1.03	0.66	1.11	0.48	0.39
		Zh-6	宁4	长 ₈	1095	13~34	19	1.04	0.76	1.00	0.49	0.48
	二叠系含油气层	Sh-1	鸳鸯探1	P _{2s}	1239	11~35	17	0.99	1.08	1.57	0.16	0.08
		Sh-2	鸳鸯探1	P _{1s}	1598	11~37	21	0.99	0.43	1.46	0.16	0.05
		Sh-4	图东1	P _{1t}	2271	14~38	24	0.99	0.21	1.83	0.26	0.15
岩样	西峰油田	R-1	西17	长 ₁	2043	13~35	16	1.02	1.08	1.47	0.68	0.51
		R-2	宁4	长 ₃	1570	14~35	19	1.01	0.58	1.03	0.75	0.73
		R-3	镇33	长 ₁	2187	13~36	17	1.05	0.60	1.05	0.97	0.95

注: $C_{21}^-/C_{21}^+ = \leq C_{21}$ 正构烷烃 / $> C_{21}$ 正构烷烃; OEP = $[(C_1 + 6C_2 + C_3 + C_4) / (4C_1 + 4C_3 + 3)]^{(-1)^{i+1} + 1}$, $i = C_{24} \sim C_{34}$ 。

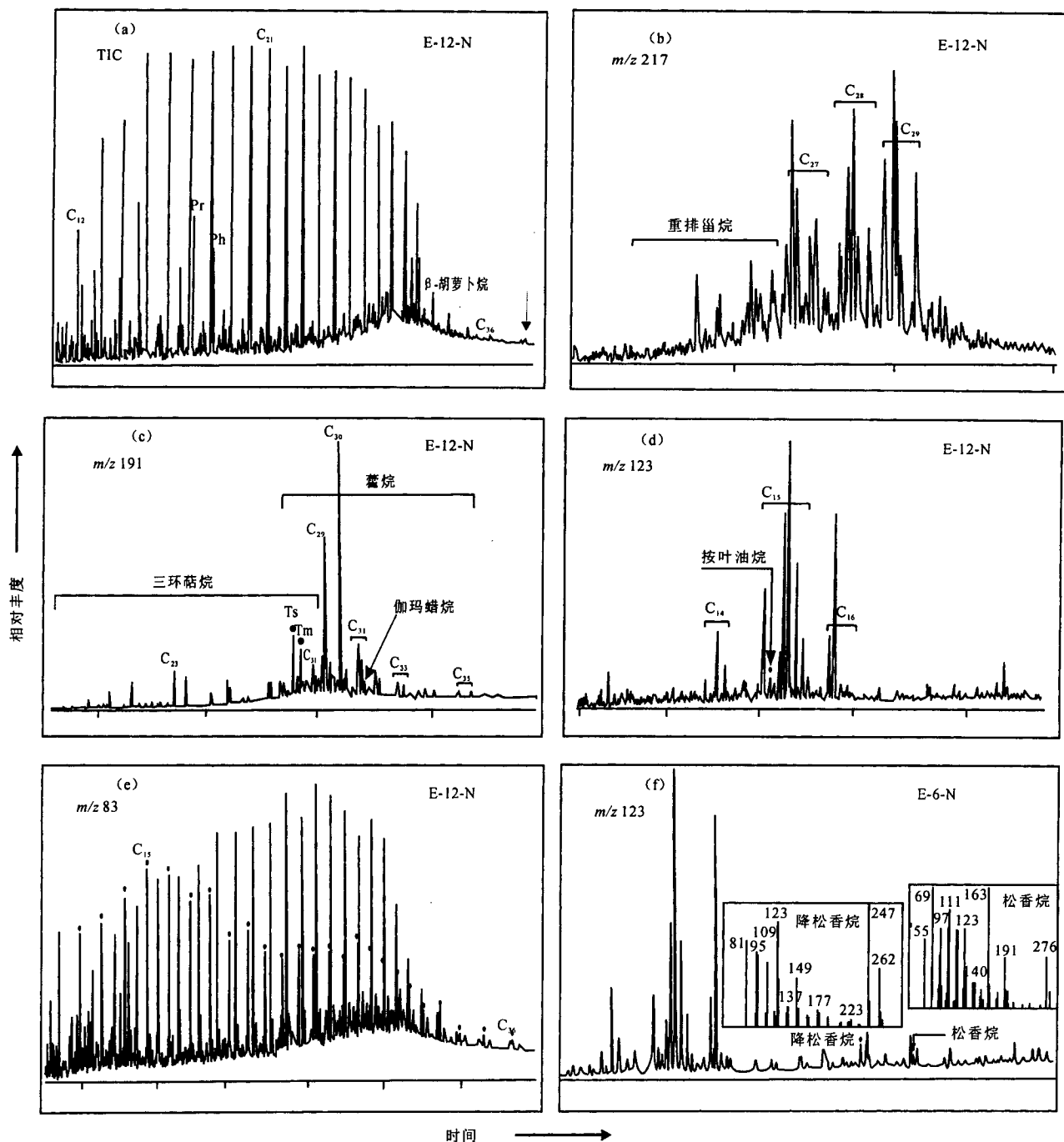


图 2 原油样品 TIC (a)、 m/z 217 (b)、 m/z 191 (c)、 m/z 123 (d)、 m/z 83 (e)、 m/z 123 (f) 质量色谱图

Fig. 2 Representative mass chromatograms of TIC (a), m/z 217 (b), m/z 191 (c), m/z 123 (d), m/z 83 (e) and m/z 123 (f) for the oils

较窄；并且与二叠系原油相比含有较多的 C_{27} 和 C_{28} 规则甾烷，这与 Grantham 和 Wakefiel (1988) 研究发现随着地质年代变新，海相原油中 C_{28}/C_{29} 值增加是一致的。另外，与成油母质以菌藻类为主的柴达木盆地西部原油中规则甾烷组成 (C_{27} 、 C_{28} 和 C_{29} 甾烷相对含量分别为 39.0%~52.7%、17.4%~23.3% 和

22.8%~39.8%) 相比较，研究样品中含有更多的 C_{28} 和 C_{29} 规则甾烷。规则甾烷这种分布同样说明西峰油田原油具有类似的成油母质，它们为水生藻类、浮游动物和高等植物，并且高等植物是原油形成的重要贡献者。西峰油田原油中含有 4-甲基甾烷，4-甲基甾烷/规则甾烷比值分布在 0.16~0.23 之间。4-

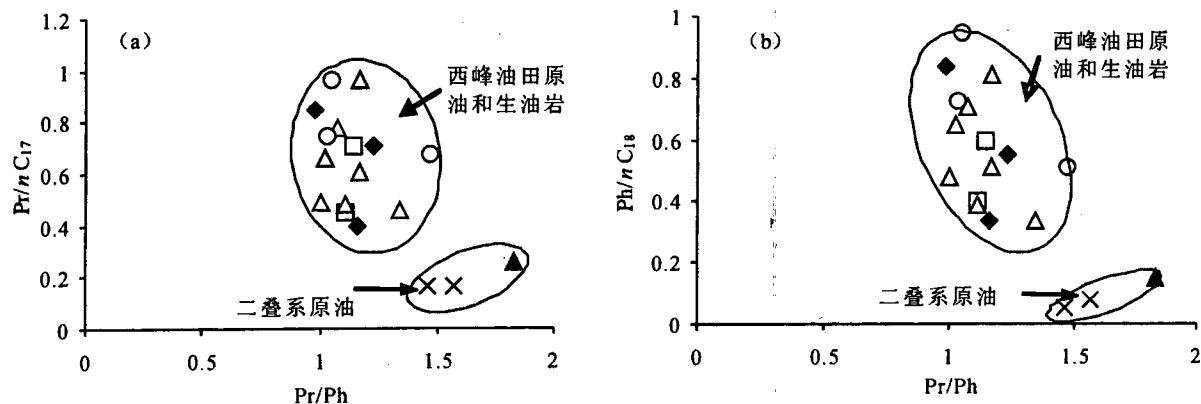


图 3 原油中 Pr/nC_{17} 与 Pr/Ph (a) 和 Ph/nC_{18} 与 Pr/Ph (b) 值相关图

Fig. 3 Cross plots of Pr/nC_{17} vs. Pr/Ph (a) and Ph/nC_{18} vs. Pr/Ph (b) ratios of the crude oil samples

◆—延安组油样; □—长3油样; △—长8油样; ×—山西组油样; ▲—太原组油样; ○—长7岩样
◆—Yanan Formation oils; □—Chang-3 oils; △—Chang-8 oils; ×—Shanxi Formation oils; ▲—Taiyuan Formation oil; ○—Chang-7 rocks

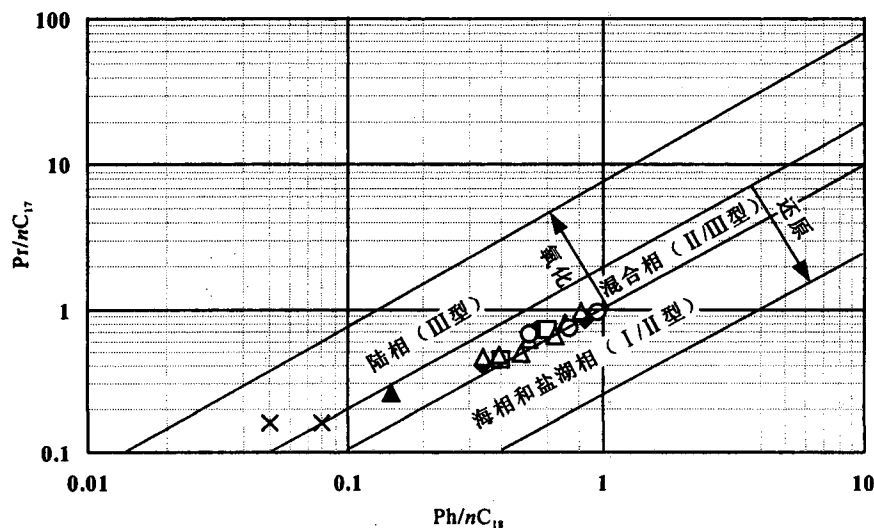


图 4 原油中 Pr/nC_{17} 与 Ph/nC_{18} 值相关图

Fig. 4 Cross plots of Pr/nC_{17} vs. Ph/nC_{18} ratios of the crude oil samples

◆—延安组油样; □—长3油样; △—长8油样; ×—山西组油样; ▲—太原组油样; ○—长7岩样
◆—Yanan Formation oils; □—Chang-3 oils; △—Chang-8 oils; ×—Shanxi Formation oils; ▲—Taiyuan Formation oil; ○—Chang-7 rocks

甲基甾烷一般来自甲藻类 (Robinson et al., 1984), 但是也存在细菌之中 (Philp et al., 1991)。原油中 4-甲基甾烷的存在, 说明甲藻类对原油的形成也作出了贡献。

西峰油田原油中含有丰富的二环萜烷, 二环萜烷/藿烷比值分布在 0.05~3.28 (表 3), 明显高于柴达木盆地西部以菌藻为主的成油母质的原油 (0.03~0.22, 段毅等, 2004b), 可能指示了西峰油田原油更多地来自陆源高等植物, 尽管也来自微生物。同时, 二环萜烷中存在着按叶油烷, 该化合物来自陆

源高等植物。原油中三环萜烷和四环萜烷的含量与母源性质密切相关 (Seifert and Moldowan, 1978; Aquino Neto et al., 1983), 并且 C_{25} 三环萜烷/ C_{24} 四环萜烷、三环萜烷的 $(C_{19}+C_{20})/C_{23}$ 和 C_{25}/C_{26} 及 C_{24} 四环萜烷/ $(C_{24}$ 四环萜烷 + C_{26} 三环萜烷) 比值已用来判识形成原油的母质 (Hanson et al., 2000; Zhang et al., 2000)。已有的研究表明, 三环萜烷 C_{25}/C_{26} 比值在海相原油中 >1 , 在陆相原油中 <1 (Burwood et al., 1992), 该比值在西峰原油中为 0.25~0.50 (表 3); C_{25} 三环萜烷/ C_{24} 四环萜烷比值在塔里木盆

表 2 西峰油田原油中甾烷分析资料

Table 2 Analytical data of steranes of crude oils from the Xifeng oilfield

样号		规则甾烷相对含量(%)			规则甾烷 藿烷	重排甾烷 规则甾烷	4-甲基甾烷 规则甾烷	$\frac{\alpha\alpha-C_{29}20S}{20S+20R}$	$\frac{C_{29}\beta\beta}{\alpha\alpha+\beta\beta}$	$\frac{Dia-C_{29}20S}{20S+20R}$
		C ₂₇	C ₂₈	C ₂₉						
油样	Y-5	27.5	29.6	42.9	0.29	0.13	0.20	0.53	0.58	0.56
	Y-7	26.2	30.8	43.1	0.35	0.13	0.21	0.50	0.60	0.48
	E-22	23.2	26.8	50.0	0.18	0.11	0.18	0.47	0.51	0.55
	E-17	23.1	27.4	49.5	0.21	0.12	0.20	0.51	0.58	0.55
	E-19	23.5	29.5	47.0	0.16	0.13	0.19	0.53	0.56	0.56
	Zh-1	23.0	30.1	47.0	0.28	0.16	0.20	0.51	0.60	0.54
	E-11	26.5	29.7	43.8	0.34	0.21	0.16	0.55	0.60	0.55
	E-12	25.5	29.8	44.7	0.26	0.15	0.23	0.52	0.58	0.49
	E-9	23.7	29.9	46.3	0.19	0.14	0.21	0.53	0.58	0.52
	E-6	24.2	29.9	45.9	0.19	0.17	0.20	0.53	0.50	0.47
	E-3	25.1	30.2	44.7	0.20	0.15	0.21	0.54	0.60	0.52
	Zh-6	24.7	27.7	47.5	0.22	0.16	0.19	0.52	0.58	0.58
	Sh-1	22.0	25.3	52.7	0.33	0.88	n	0.48	0.56	0.59
	Sh-2	22.5	25.1	52.3	0.27	0.99	n	0.50	0.55	0.60
	Sh-4	21.7	25.3	53.0	0.21	0.87	n	0.49	0.56	0.59
岩样	R-1	30.0	24.1	45.9	0.28	0.48	0.21	0.54	0.52	0.58
	R-2	29.6	20.6	49.9	0.29	0.52	0.15	0.48	0.54	0.61
	R-3	30.3	19.7	50.0	0.31	0.55	0.12	0.49	0.52	0.58

注: Dia-C₂₉-C₂₉重排甾烷; n—未检出。

表 3 西峰油田原油中萜烷分析资料

Table 3 Analytical data of terpanes of crude oils from the Xifeng oilfield

样号	$\frac{C_{25}\text{三环萜烷}}{C_{24}\text{四环萜烷}}$	三环萜烷		A	B	C	萜烷相对含量(%)				$\frac{T_s}{T_m}$	D	三环萜烷 萜烷	二环萜烷 萜烷	$\frac{C_{30}\text{莫烷}}{C_{30}\text{藿烷}}$	$\frac{C_{31}22S}{22S+22R}$
		$(C_{19}+C_{20})/C_{23}$	C_{25}/C_{26}				C_{27+29}	C ₃₀	$>C_{30}$	$C_{34}+C_{35}$						
油样	Y-5	0.60	0.63	0.50	0.07	0.45	0.07	32.1	43.8	24.1	2.8	0.85	0.04	0.29	0.09	0.59
	Y-7	0.67	0.67	0.40	0.10	0.38	0.08	32.8	40.7	26.5	3.4	1.14	0.06	0.41	0.10	0.57
	E-22	0.50	0.57	0.44	0.06	0.47	0.05	31.4	42.7	25.9	2.9	0.63	0.04	0.22	0.09	0.60
	E-17	0.67	0.60	0.50	0.04	0.43	0.04	30.6	46.6	22.8	3.0	0.62	0.04	0.20	0.08	0.58
	E-19	0.50	0.56	0.31	0.08	0.38	0.04	33.0	44.7	22.3	2.8	0.67	0.04	0.25	0.10	0.59
	Zh-1	0.50	0.64	0.30	0.09	0.38	0.08	34.4	42.2	23.4	3.5	0.76	0.06	0.36	0.09	0.59
	E-11	0.50	1.05	0.43	0.11	0.46	0.09	37.0	41.7	21.3	2.8	1.00	0.05	0.59	0.07	0.55
	E-12	0.57	0.63	0.40	0.10	0.41	0.08	36.0	41.0	23.0	2.7	1.25	0.05	0.38	0.08	0.57
	E-9	0.50	0.44	0.42	0.08	0.45	0.04	32.8	43.4	23.8	2.8	0.93	0.04	0.25	0.08	0.58
	E-6	0.46	0.58	0.38	0.10	0.45	0.06	33.8	39.1	27.1	3.2	0.89	0.06	0.29	0.11	0.56
	E-3	0.50	0.50	0.33	0.07	0.40	0.06	33.1	43.0	23.9	2.8	0.85	0.04	0.26	0.08	0.58
	Zh-6	0.38	0.58	0.25	0.05	0.40	0.04	30.5	46.2	23.3	2.5	0.92	0.04	0.23	0.09	0.59
	Sh-1	0.32	3.17	0.43	0.16	0.58	0.16	29.0	32.1	38.9	4.4	1.00	0.13	0.69	0.11	0.62
	Sh-2	0.39	1.64	0.54	0.19	0.58	0.15	31.0	30.4	38.6	3.6	0.95	0.15	0.59	0.11	0.62
	Sh-4	0.36	1.63	0.67	0.17	0.65	0.13	30.8	30.5	38.6	7.8	0.60	0.10	0.27	0.06	0.63
岩样	R-1	0.50	1.56	0.33	0.06	0.40	0.09	29.5	38.9	31.6	2.9	3.89	0.08	0.29	0.09	0.56
	R-2	0.33	1.38	0.50	0.04	0.45	0.10	23.8	40.5	35.7	3.0	2.63	0.08	0.16	0.10	0.58
	R-3	0.33	1.63	0.50	0.03	0.48	0.10	23.8	38.8	37.4	2.8	1.90	0.09	0.16	0.12	0.59

注: A—C₂₃三环萜烷/(C₂₃三环萜烷+C₃₀藿烷); B—C₂₄四环萜烷/(C₂₄四环萜烷+C₂₆三环萜烷); C—C₂₉三环萜烷/(C₂₉三环萜烷+C₃₀藿烷); D—伽玛蜡烷/ $\alpha\beta$ -C₃₀藿烷。

地海相原油中一般大于1,在陆相原油中几乎都小于1(Hanson et al., 2000),西峰油田原油中该比值分布在0.38~0.67之间,这些都反映了西峰油田原油成油母质具有更多的陆源有机质。C₂₄四环萜烷一般在陆源有机质中含量较高,Hanson等(2000)用C₂₄四环萜烷/(C₂₄四环萜烷+C₂₆三环萜烷)与C₂₃三环萜烷/(C₂₃三环萜烷+C₃₀藿烷)比值相关图,成功地

区分了塔里木盆地海相与陆相原油。在该图中(图6),西峰油田原油与二叠系原油明显不同。进一步证据是西峰油田原油存在陆源三环二萜烷,如海松烷和降海松烷(图2f),说明了成油物质陆源高等植物的贡献。

五环三萜类在研究样品中很丰富(表2、3)。藿烷的组成特征是,C₂₇+C₂₉藿烷为29.0%~37.0%,明

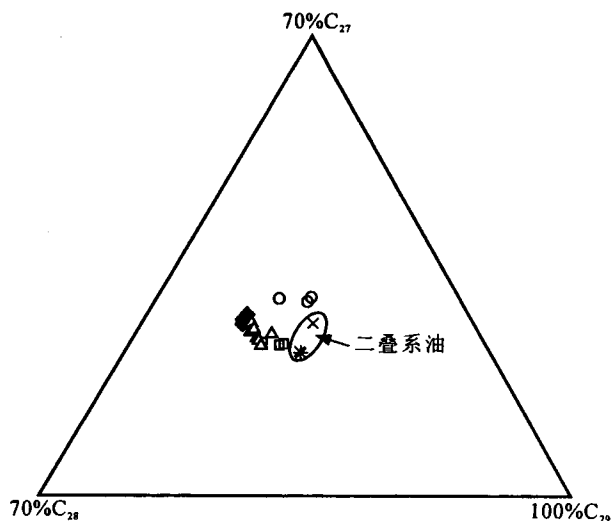


图 5 原油中不同碳数规则甾烷分布图

Fig. 5 Ternary diagram of C_{27} , C_{28} and C_{29}

sterane compositions of the crude oil samples

- ◆—延安组油样; □—长3油样; △—长8油样; ×—山西组油样;
 ▲—太原组油样; ○—长7岩样
 ◆—Yanan Formation oils; □—Chang-3 oils; △—Chang-8 oils;
 ×—Shanxi Formation oils;
 ▲—Taiyuan Formation oil; ○—Chang-7 rocks

显高于柴达木盆地西部第三系原油中 $C_{27}+C_{29}$ 藿烷的相对含量(20.2%~27.5%;段毅等, 2004b), 后者原油主要来自菌藻类有机质。另一个证据就是西峰油田原油含有低丰度的烷基环己烷, 其碳数分布在 11~37 之间, 主峰碳数为 C_{15} 、 C_{17} 和 C_{18} , 烷基环己烷/藿烷比值很低, 为 0.76~5.56(表 4), 明显不同二叠系原油。

西峰油田原油中 Pr/Ph 值为 1.00~1.34(表 1), 与柴达木盆地西部强还原环境形成的原油中该比值(0.51~0.64)相比, 西峰油田原油中 Pr/Ph 值属中度, 并且在图 4 中这些原油位于还原和氧化环境的交汇区域。原油中存在低丰度 β -胡萝卜素, 一般高 β -胡萝卜素存在于强还原环境。这些资料表明西峰油田原油形成于弱还原环境。伽玛蜡烷和升藿烷具有指示沉积环境的作用, 原油高丰度的伽玛蜡烷和升藿烷一般与高盐度沉积环境有关(Moldowan et al., 1985; Fu et al., 1986; Philp et al., 1991; 段毅等, 2004b)。例如, 柴达木盆地西部盐湖相成因的原油中伽玛蜡烷/ $\alpha\beta$ - C_{30} 藿烷比值和 $>C_{30}$ 、 C_{34+35} 藿烷相对含量都很高, 分别为 0.27~1.00 和 26.3%~51.3%、2.8%~17.1%。西峰油田原油中该比值很

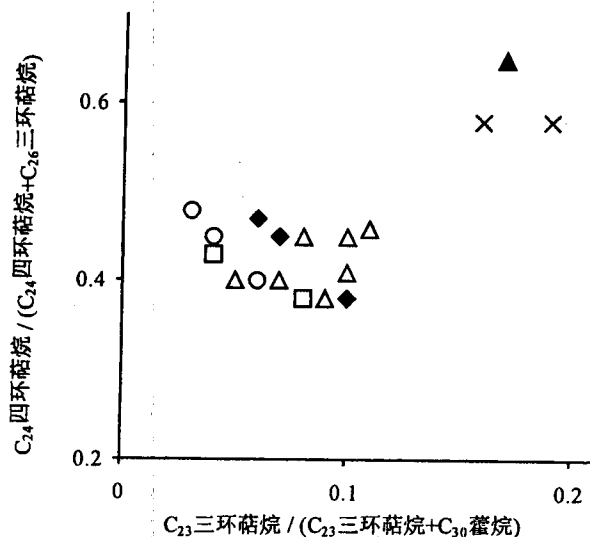
图 6 原油中 C_{24} 四环萜烷/(C_{24} 四环萜烷 + C_{26} 三环萜烷) 与 C_{23} 三环萜烷/(C_{23} 三环萜烷 + C_{30} 藿烷) 比值相关图

Fig. 6 Cross plot of C_{24} tetracyclic terpane/(C_{24} tetracyclic terpane + C_{26} tricyclic terpane) vs. C_{23} tricyclic terpane/(C_{23} tricyclic terpane + C_{30} hopane) ratios of the crude oil samples

- ◆—延安组油样; □—长3油样; △—长8油样; ×—山西组油样;
 ▲—太原组油样; ○—长7岩样
 ◆—Yanan Formation oils; □—Chang-3 oils; △—Chang-8 oils;
 ×—Shanxi Formation oils; ▲—Taiyuan Formation oil; ○—Chang-7 rocks

低, 分别为 0.04~0.06 和 21.3%~27.1%、2.5%~3.5%, 并且这些原油在图 7a 中分布在一个很小的范围内。二叠系原油形成于海陆交互环境, 具有较高的伽玛蜡烷/ $\alpha\beta$ - C_{30} 藿烷比值。原油中碳同位素组成与沉积环境和有机质类型等因素有关(Sofer, 1984; Peters et al., 1996; Duan et al., 1997a, 1997b), 盐湖和沼泽沉积环境中形成的原油具有高的 $\delta^{13}C$ 值, 前者的例子为柴达木盆地西部原油(-25.4‰~-27.5‰, 段毅等, 2003b), 后者则是本研究中二叠系原油。西峰油田原油 $\delta^{13}C$ 值较低, 为 -31.4‰~-31.6‰, 在图 7b 中分布范围很小, 并且与二叠系和柴达木盆地西部原油分布区明显不同。这些资料说明西峰油田原油形成于淡水或微咸水湖泊环境。

2.2 原油的成熟度

原油的成熟度是研究其成因的一个重要指示, 许多生物标志化合物参数则是可以用来确定研究原油的成熟度。西峰油田原油 C_{29} 甾烷 20S/(20S +

表 4 西峰油田原油中烷基环己烷、 β -胡萝卜素、碳同位素和芳烃分析资料Table 4 Analytical data of alkylcyclohexane, β -carotane, carbon isotopic compositions and aromatic hydrocarbon of crude oils from the Xifeng oilfield

样号		碳数 范围	主峰 碳数	CPI	C_{21-}/C_{21+}	烷基环己烷 萘烷	β -胡萝 卜烷	$\delta^{13}C$ (‰)	MPI ₁	R_c (%)
油 样	Y-5	14~33	18	0.99	0.84	1.89	+	-31.4	1.01	0.93
	Y-7	14~36	18	0.99	0.92	3.06	+	-31.1	0.85	0.82
	E-22	13~36	17	1.13	1.06	1.30	+	-31.4	n	n
	E-17	11~36	15	1.02	1.43	1.27	+	-31.5	0.82	0.79
	E-19	11~36	15	1.08	1.55	1.24	+	-31.4		
	Zh-1	11~36	15	1.10	1.75	2.14	+	-31.5	0.79	0.77
	E-11	11~36	15	1.09	3.33	5.56	+	-31.2	n	n
	E-12	11~36	15	1.07	1.54	2.36	+	-31.2	0.83	0.80
	E-9	13~37	15	1.13	0.99	1.04	+	-31.5	0.72	0.72
	E-6	11~36	15	1.13	1.25	1.27	+	-31.6	n	n
	E-3	14~33	18	0.98	0.73	0.76	+	-31.6	0.72	0.72
	Zh-6	13~33	18	0.99	0.99	1.21	+	-31.3	n	n
	Sh-1	11~34	17	1.07	2.31	133.45	+	-26.1	n	n
	Sh-2	14~36	20	1.00	0.54	55.98	+	-26.1	n	n
	Sh-4	15~37	27	1.03	0.31	18.92	+	-26.8	1.27	1.11
岩 样	R-1	14~36	16	1.04	2.18	5.04	+	n	n	n
	R-2	15~30	17	0.94	1.57	1.11	+	n	n	n
	R-3	14~37	17	1.02	1.15	1.90	+	n	n	n

注：+— β -胡萝卜素以低丰度存在；MPI₁—甲基菲指数1； R_c —根据 MPI₁ 计算的镜质体反射率值； C_{21-}/C_{21+} — $\leq C_{21}$ 烷基环己烷/ $>C_{21}$ 烷基环己烷；OEP—奇碳数烷基环己烷/偶碳数烷基环己烷；n—未检出

20R) 和 $\beta/(\alpha+\beta)$ 比值分别为 0.47~0.55 和 0.51~0.60 (表 2), 表明原油均为成熟原油。可是, 二叠系原油成熟度已经较高, 但是这两个参数均未达到平衡值, 其原因还不清楚, 虽然一些研究表明, 过高的成熟度和源岩性质都会影响这两个参数 (Peters et al., 1990; Zhang et al., 2000)。重排甾烷/规则甾烷、 C_{29} 重排甾烷 20S/(20S+20R)、 C_{29} 三环萜烷/(C_{29} 三环萜烷 + C_{30} 霍烷) 和 C_{31} 霍烷 22S/(22S+22R) 都已用来研究原油的成熟度 (Li et al., 1998; Zhang et al., 2000; Hanson et al., 2000; 段毅等, 2004b)。本次研究中, 这些参数较好的反映了所研究原油的成熟度, 即它们在二叠系原油中均高于其他原油 (表 2 和 3, 图 8 和 9)。虽然原油中重排甾烷/规则甾烷能反映其成熟度, 但是已有的研究表明, 酸性粘土可以提高规则甾烷向重排甾烷的转化 (Rubinstein et al., 1975), 从而源岩的性质可以影响原油中重排甾烷/规则甾烷的比值 (Peters and Moldowan, 1993)。所研究原油的源岩性质均相同 (见下文讨

论), 因此该比值主要反映了原油的成熟度。西峰油田原油中重排甾烷/规则甾烷比值均为 0.11~0.21, 与柴达木盆地北部淡水湖沼泽相成熟原油的 (0.28~0.39) 相似, 反映了研究原油为成熟原油。在西峰油田原油中, C_{29} 三环萜烷/(C_{29} 三环萜烷 + C_{30} 霍烷) 比值为 0.04~0.09, 类似于塔里木盆地陆相成熟原油 (Zhang et al., 2000); C_{29} 重排甾烷 20S/(20S+20R) 和 C_{31} 霍烷 22S/(22S+22R) 比值以及正构烷烃的 CPI 值均反映了成熟原油的特征。原油中芳烃甲基菲异构体比值可以指示其成熟度 (Radke et al., 1982)。已有的研究表明, 在 II 型和 III 型有机质中, 甲基菲指数 I 和 II (MPI-1 和 MPI-2) 与有机质镜质组反射率 (R_o) 相关, 并且当 $R_o > 0.65\%$ 时, 这两个参数值与 R_o 呈正相关 (Radke et al., 1986; Boreham

et al., 1988), 利用 MPI-1 所计算原油的 R_o 列于表 4。西峰油田原油的 R_o 值为 0.72%~0.80%, 进一步说明了研究原油为成熟原油。

2.3 油源分析

通过上述资料可以看出, 西峰油田延₈、长₃和长₈。

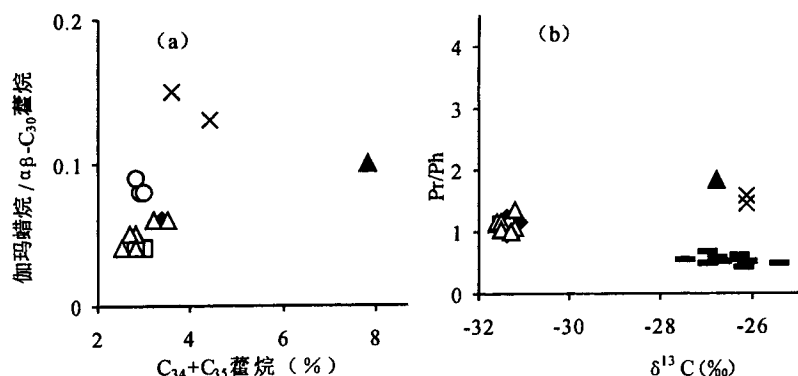


图 7 原油中伽玛蜡烷/ $\alpha\beta$ - C_{30} 萘烷与 $C_{34}+C_{35}$ 萘烷(a)和 Pr/Ph 与 $\delta^{13}C$ 值(b)值相关图

Fig. 7 Cross plots of gammacerane/ $\alpha\beta$ - C_{30} hopane vs. $C_{34}+C_{35}$ hopanes (a) and Pr/Ph vs. $\delta^{13}C$ values (b) ratios of the crude oil samples

◆—延安组油样; □—长₃油样; △—长₈油样; ×—山西组油样; ▲—太原组油样;
○—长₇岩样; ■—柴达木盆地西部油样

◆—Yanan Formation oils; □—Chang-3 oils; △—Chang-8 oils; ×—Shanxi Formation oils; ▲—Taiyuan Formation oil; ○—Chang-7 rocks; ■—West Qaidam oils

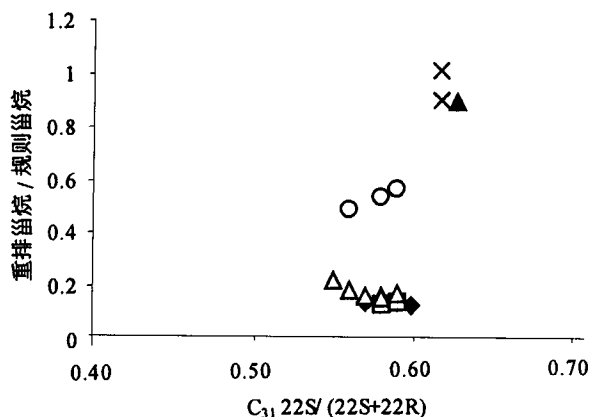


图 8 原油中重排甾烷/规则甾烷与 $C_{31}22S/(22S+22R)$ 值相关图

Fig. 8 Cross plot of diasteranes /regular sterane vs. $C_{31}22S/(22S+22R)$ hopanes ratio of the crude oil samples
 ◆—延安组油样; □—长₃油样; △—长₈油样; ×—山西组油样;
 ▲—太原组油样; ○—长₇岩样
 ◆—Yanan Formation oils; □—Chang-3 oils; △—Chang-8 oils;
 ×—Shanxi Formation oils; ▲—Taiyuan Formation oil; ○—Chang-7 rocks

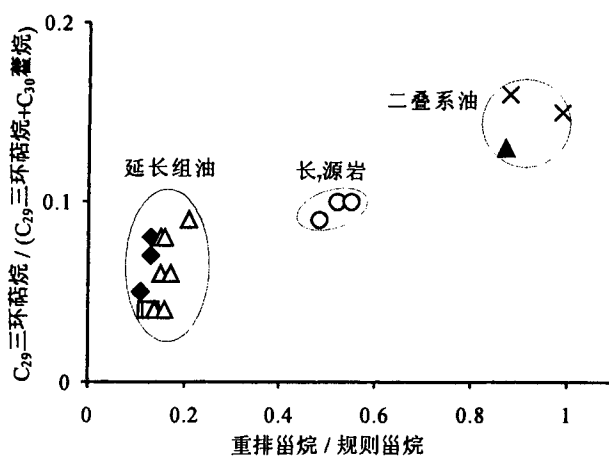


图 9 原油中 C_{29} 三环萜烷/(C_{29} 三环萜烷 + C_{30} 藿烷) 与重排甾烷/规则甾烷比值相关图

Fig. 9 Cross plot of C_{29} tricyclic terpanes/(C_{29} tricyclic terpanes + C_{30} hopanes) vs. diasteranes/regular sterane ratios of the crude oil samples
 ◆—延安组油样; □—长₃油样; △—长₈油样; ×—山西组油样;
 ▲—太原组油样; ○—长₇岩样
 ◆—Yanan Formation oils; □—Chang-3 oils; △—Chang-8 oils;
 ×—Shanxi Formation oils; ▲—Taiyuan Formation oil; ○—Chang-7 rocks

储层的原油地球化学特征极为相似,它们来自同一油源;西峰油田原油的油源也与华池油田延₈和延₁₀储层原油的相同;但是,从原油母质性质和成熟度方面来看,它们都与二叠系原油的油源截然不同。这表

明西峰油田原油来自中生界;二叠系原油来自成熟度较高的二叠系海陆交互相煤系地层。鄂尔多斯盆地中生界有两套烃源岩,即延安组(J_1)和延长组(T_3)。延安组为湖沼环境下形成的烃源岩,其可溶有机质碳同位素组成较重, $\delta^{13}C$ 值分布在 -23.9% ~ -27.1% 之间; C_{29} 甾烷含量较高;成熟度较低($R_o=0.53\%$ ~ 0.65% ; Wang et al., 1995)。这些主要地球化学特征与西峰油田原油的差别显著,反映了西峰油田原油不可能来自延安组烃源岩。延长组烃源岩形成于淡水或微咸水湖泊,特别是延长组中部(长₄₊₅—长₈)烃源岩形成于浅湖一半深湖,发育有暗色泥岩、碳质泥岩和油页岩烃源岩层系。该烃源岩在西峰油田的有机碳含量较高,主要分布在 0.6% ~ 6.0% 之间;有机质类型为混合型;有机质已成熟, R_o 值主要分布在 0.70% ~ 0.96% 之间(未发表资料),从而延长组应是西峰油田原油可能的油源岩。其中下部长₇生油层组,为湖盆发育全盛期产物,生油性明显好于其他层段,是西峰油田原油的主力油源岩。为了证明这一点,我们对西峰油田不同地区的长₇烃源岩样品进行了与原油相同的分析,以便进行油源研究。上述资料表明,分别位于西峰油田西部、中部和东部的宁4井、西17井和镇33井的长₇烃源岩,其正构烷烃、类异戊二烯烷烃、甾烷、萜烷和烷基环己烷分布及组成特征与该油田原油的相似,两者生物标志化合物参数分布范围相近,不同于二叠系原油;同时原油的 $\delta^{13}C$ 值也在长₇烃源岩范围内(岩石抽提物 $\delta^{13}C$ 值为 -30.4% ~ -33.3% ; Wang et al., 1995),这表明西峰油田原油与长₇烃源岩具有亲缘关系。这种研究结果与 Wang 等(1995)对鄂尔多斯盆地陇东地区其他油田的三叠系原油油源研究结果是一致的。例如,三叠系原油饱和烃和芳烃的 $\delta^{13}C$ 值与延长组烃源岩的接近(图10a),与延安组烃源岩的相差较远,并且认为原油碳同位素组成比延长组烃源岩的轻 1% ~ 2% ,是由原油运移所致;与延长组和延安组烃源岩中甾烷分布特征相比较,三叠系原油中甾烷分布特征较接近于延长组烃源岩(图10b)。

3 结论

西峰油田是鄂尔多斯盆地近几年新发现的一个大型油田,迄今为至还未见对原油地球化学研究的报道。通过对西峰油田系统采样,进行生物标志化合物和碳同位素研究,发现西峰油田各区块和各层位原油具有相似的地球化学特征,反映了它们来自同

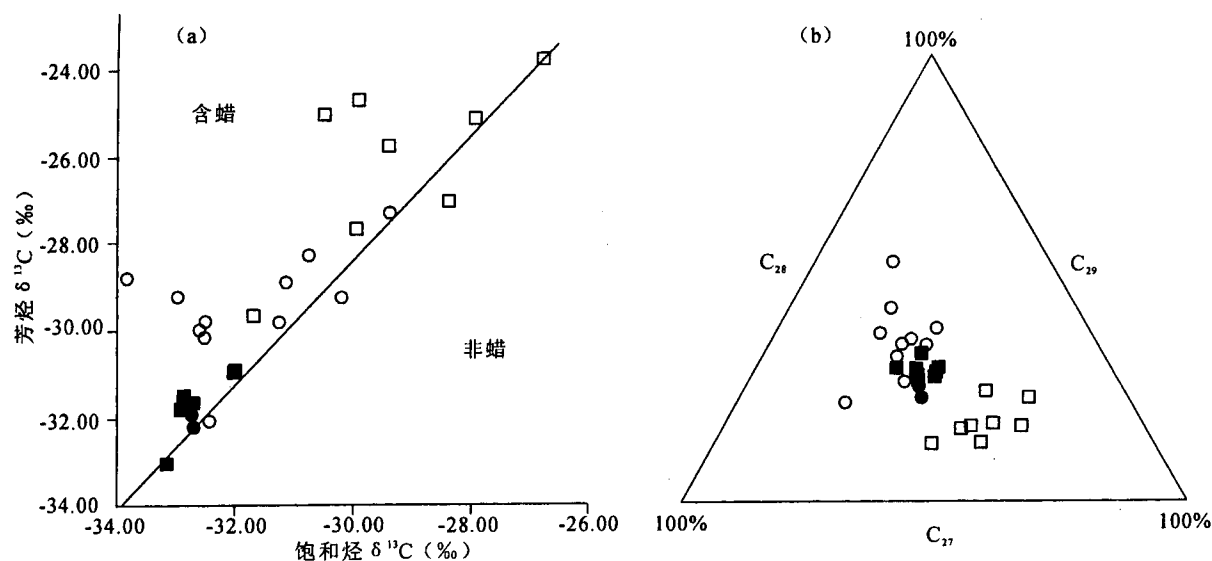


图10 鄂尔多斯盆地陇东地区延长组与延安组原油和烃源岩中 $\delta^{13}\text{C}$ 值(a)及甾烷(b)分布

Fig. 10 The distributions of $\delta^{13}\text{C}$ values (a) and steranes (b) in crude oils and source rocks from Yanchang and the Yanan Formations located in Longdong region of Ordos basin

○—延长组源岩; □—延安组源岩; ●—延长组油; ■—延安组油
○—Yanchang Formation rocks; □—Yanan Formation rocks; ●—Yanchang Formation oils; ■—Yanan Formation oils

—油源。原油的正构烷烃以高碳数占优势,甾烷以 C_{29} 含量较高,含有较多的二环萜烷、四环萜烷,存在陆源三环二萜烷,含有较低丰度的烷基环己烷,这些说明原油的母质除了菌藻类外,陆源高等植物作出了重要贡献。原油中 Pr/Ph 值中度, β -胡萝卜素以低丰度存在,反映了原油形成于弱还原环境;原油中伽玛蜡烷和 $>\text{C}_{31}$ 藿烷含量很低,碳同位素组成较轻,指示了原油形成于淡水或微咸水环境。原油中 C_{29} 甾烷和 C_{31} 藿烷异构体参数接近或达到平衡值,重排甾烷/规则甾烷和 Ts/Tm 值适度,正构烷烃 CPI 值接近于1,利用甲基菲指数计算的 R_c 值为 0.72%~0.80%,说明原油为成熟原油。油源对比表明,西峰油田原油的源岩主要为延长组长,油层组。

参 考 文 献

付金华, 罗安湘, 喻建, 毛明陆. 2004. 西峰油田成藏地质特征与勘探方向. 石油学报, 25: 25~29.
屈红军, 李文厚, 梅志超, 陈全红. 2003. 论层序地层学与含油气系统在油气勘探中的联系——以鄂尔多斯中生代盆地为例. 地质论评, 2003, 49(5): 495~500.
段毅, 王智平, 张晓宝, 张辉, 周世新. 2003a. 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, (3): 414~422.
段毅, 彭德华, 张晓宝, 周世新, 王智平, 张辉. 2003b. 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, 21(2): 355~359.
段毅, 张辉, 吴保祥. 2004a. 鄂尔多斯盆地西峰油田原油含氮化合物

分布特征与油气运移. 石油勘探与开发, 31(5): 17~20.
段毅, 王智平, 张辉, 吴保祥, 王传远, 孟自芳, 张晓宝, 周世新. 2004b. 柴达木盆地原油烃类地球化学特征. 石油实验地质, 26(4): 359~364.
Aquino Neto F R, Trendel J M, Restle A, Connan J, Albrecht P. 1983. Occurrence and formation of tricyclic and tetracyclic terpanes in sediments and petroleum. In: Bjorøy M, et al., ed. Advances in Organic Geochemistry 1981. John Wiley, Chichester, 659~667.
Boreham C J, Crick I H, Powell T G. 1988. Alternative calibration of the methylphenanthrene index against vitrinite reflectance: application to maturity measurements on oils and sediments. Organic Geochemistry, 12: 289~294.
Connan J, Cassou A M. 1980. Properties of gases and petroleum liquids derived from terrestrial kerogen at various maturation levels. Geochimica et Cosmochimica Acta, 44: 1~23.
Duan Y, Wen Q B, Luo B J. 1997a. Isotopic composition and probable origin of individual fatty acids in modern sediments from Ruorgai Marsh and Nansha Sea, China. Organic Geochemistry, 27: 583~589.
Duan Y, Wen Q B, Zheng G D, Luo B J. 1997b. The carbon isotopic study of individual alcohol compounds in modern sediments from Nansha Sea, China. Science in China (Series D), 40: 491~495.
Duan Y, Ma L H. 2001. Lipid geochemistry in a sediment core from Ruorgai Marsh deposit (Eastern Qinghai—Tibet plateau, China). Organic Geochemistry, 32: 1429~1442.
Fu J G, Sheng P, Peng S C, Brassell S C, Eglington G. 1986. Peculiarities of salt lake sediments as potential source rocks in China. Organic Geochemistry, 10: 119~126.
Grantham P J, Wakefield L L. 1988. Variations in the sterane carbon number distributions of marine source rocks derived crude oils

- through geological time. *Organic Geochemistry*, 12: 61~73.
- Hanson A D, Zhang S C, Moldowan J M, Liang D G, Zhang B M. 2000. Molecular organic geochemistry of the Tarim basin, Northwest China. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 84: 1109~1128.
- Li M W, Yao H X, Fowler M G, Stasiuk L D. 1998. Geochemical constraints on models for secondary petroleum migration along the upper Devonian Rimbey — Meadowbrook reef trend in central Alberta, Canada. *Organic Geochemistry*, 29: 163~182.
- Li M W, Lin R Z, Liao Y S, Snowdon L R, Wang P R, Li P L. 1999. Organic geochemistry of oils and condensates in the Kekeya field, southwest depression of the Tarim basin (China). *Organic Geochemistry*, 30: 15~37.
- Moldowan J M, Seifert W K, Gallegos E J. 1985. Relationship between petroleum composition and depositional environment of petroleum source rocks. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 69: 1255~1268.
- Peters K E, Moldowan J M. 1993. The biomarker guide: interpreting molecular fossils in petroleum and ancient sediments. Englewood Cliffs, New Jersey, Prentice Hall, 363 pp.
- Peters K E, Cunningham A E, Walters C C, Jiang J, Fan Z. 1996. Petroleum systems in the Jiangling — Dangyang area, Jiangnan basin, China. *Organic Geochemistry*, 24: 1035~1060.
- Peters K E, Fraser T H, Amris W, Rustanto B, Hermanto E. 1999. Geochemistry of crude oils from eastern Indonesia. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 83 (12): 1927 ~ 1942.
- Philp R P, Fan P, Lewis C A, Li J, Zhu H, Wang H. 1991. Geochemical characteristics of oils from Chaidamu, Shangannan and Jiangnan basins, China. *Journal of Southeast Asian Earth Science*, 5: 351~358.
- Radke M, Willsch H, Leythaeuser D. 1982. Aromatic components of coal: relation of distribution pattern to rank. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 46: 1831~1848.
- Radke M, Willsch H, Leythaeuser D. 1986. Maturity parameters based on aromatic hydrocarbon: Influence of organic matter type. In: Leythaeuser D, Rullkötter J, eds. *Advance in Organic Geochemistry 1985*. *Organic Geochemistry*, 10: 51~63.
- Robinson N, Eglinton G, Brassell S C, Cranwell P A. 1984. Dinoflagellate origin for sedimentary 4 α -methylsteroids and 5 α (H) stanols. *Nature*, 308, : 439~441.
- Rubinstein I, Sieskind O, Albrecht P. 1975. Rearranged steranes in a shale: occurrence and simulated formation. *Journal of Chemical Society Perkin*, 1: 1833~1835.
- Seifert W K, Moldowan J M. 1978. Application of steranes, terpanes and monoaromatics to the maturation, migration and source of crude oils. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 42: 77~95.
- Sofer Z V I. 1984. Stable carbon isotope compositions of crude oils: Application to source depositional environments and petroleum alteration. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 68: 31~49.
- Wang H D, Allen J, Philp R P. 1995. An organic geochemical investigation of oils and source rocks from two Mesozoic formations of Shangannan basin, China. *Journal of Southeast Asian Earth Sciences*, 11: 277~288.
- Zhang S C, Hanson A D, Moldowan J M, Graham S A, Liang D G, Chang E, Fago F. 2000. Paleozoic oil-source rock correlations in the Tarim basin, NW China. *Organic Geochemistry*, 31: 273 ~ 286.

Geochemistry and Genesis of Crude Oils of the Xifeng Oilfield in the Ordos Basin

DUAN Yi¹⁾, WU Baoxiang¹⁾, ZHANG Hui²⁾, ZHENG Chaoyang¹⁾, WANG Chuanyuan¹⁾

1) Lanzhou Institute of Geology, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou, Gansu, 730000

2) Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou, Guangdong, 510640

Abstract

Crude oil samples of the Xifeng oilfield in the Ordos basin were collected systematically and analyzed by means of high-resolution GC-MS and IRMS. In this paper, biomarkers and carbon isotopic compositions in crude oils were studied, and the oil/source correlation and their genesis were discussed. The data indicate that the studied oils are of the same genetic type. The oil-forming matrixes are algae and higher plants, especially with an important contribution of higher plants to the formation. The crude oils were formed under weak reducing and fresh water environments. The crude oils are mature. The geochemical characteristics of crude oils are closely correlated to those of the Upper Triassic Chang-7 subsection, reflecting that crude oils were mainly originated from the Chang-7 oil bed group.

Key words: Ordos basin; crude oil; biomarker; composition and distribution; carbon isotope; genesis