

文章编号: 1000-0550(2013)02-0374-10

鄂尔多斯盆地吴堡地区上三叠统延长组原油 地球化学特征及油源对比^①

白玉彬^{1,2} 罗静兰² 刘新菊³ 靳文奇³ 王小军³

(1. 西安石油大学地球科学与工程学院 西安 710065;

2. 大陆动力学国家重点实验室/西北大学地质系 西安 710069; 3. 长庆油田分公司第一采油厂 陕西延安 716000)

摘要 鄂尔多斯盆地延长组油源一直存在争议,尤以长8~长10油藏的油源问题最为突出。通过吴堡地区延长组长6~长10原油的物理性质、族组成、生物标志化合物等特征、油-油、油-源对比等综合分析,探讨延长组原油的成因,明确各油层组石油来源,为该区油气勘探与预测提供地质依据。结果显示,长6~长10原油族组具有饱和烃含量最高,芳香烃次之,非烃和沥青质含量最低的特征。长6~长10均为成熟原油,显示出低等水生生物和高等植物混合成因,但长6原油与长7~长10原油族组成特征存在明显差异。长6原油为长7烃源岩早期烃类运移的结果,其成熟度最低,长7~长10原油为生烃高峰阶段石油运移结果,成熟度较高。长6和长7油藏的原油主要为长7底部张家滩页岩贡献,此外,长7中上部和长6地层中发育的有效烃源岩也有一定贡献。长8油藏原油为混合成因原油,主要为长7底部烃源岩向下运移结果,其次为长8内部烃源岩和长9顶部李家畔页岩之贡献。长9油藏原油主要为李家畔页岩向下倒灌形成,长10油藏可能主要为长9₂有效烃源岩向下运移成藏。热成熟度不同是导致远离主力烃源岩原油族组分之间差异性的主要原因。

关键词 原油地球化学 油源对比 延长组 吴堡地区 鄂尔多斯盆地

第一作者简介 白玉彬 男 1981年出生 讲师 博士研究生 石油地质 E-mail: baiyubin@xsyu.edu.cn

通讯作者 罗静兰 E-mail: jlluo@nwu.edu.cn

中图分类号 P593 **文献标志码** A

0 引言

一般认为,鄂尔多斯盆地中生界油藏的原油主要来自上三叠统延长组长8~长4+5湖相及三角洲相暗色泥岩^[1],并以湖相长7生油岩为主,后者是鄂尔多斯盆地中生界油藏、特别是延长组长6及其以上油藏的主力源岩^[2~4]。位于长9顶部的李家畔页岩多作为长8与长9油层组分层标志和层序界面考虑^[5,6],对其生烃能力关注较少。近年来,在深化延长组中一浅层石油勘探的同时,延长组深层石油勘探也获得重大突破,发现了长8、长9、长10油藏,并初步形成大面积分布的局面,显示出良好的石油勘探前景。同时,对延长组烃源岩的认识也有了新的进展,张文正等^[7,8]通过对志丹地区丹48井长9₁暗色泥岩(李家畔页岩)地球化学分析,发现长9₁是另一套重要的区带性烃源岩,并指出志丹南部长8、长9油藏与长9₁烃源岩具有亲缘关系。周进高等^[9]研究表明

长9油层组顶部和底部发育2套优质烃源岩,长9发育了自生自储式、下生上储式和上生下储式3种成藏组合类型。白玉彬等^[10]对安塞地区长9₁烃源岩地球化学特征和油源对比研究亦表明长9₁油藏原油来自于长9₁烃源岩贡献。

但长期以来,对于鄂尔多斯盆地延长组深层石油来源问题没有达成共识,不同学者对不同地区、不同油层组石油来源的认识存在较大差异。目前对于长8油藏石油来源存在2种不同观点:一种观点认为鄂尔多斯盆地西南部地区长8油藏油源为长7烃源岩贡献,形成上生下储式成藏组合^[11,12];另一种观点认为盆地中南部志丹地区长8油藏与长9₁烃源岩具有亲缘关系^[8]。长9油藏原油来源亦存在2种不同观点:其一认为长9原油主要来自于长7烃源岩^[12,13~16],其运移路径主要是孔隙型输导体系、断层和构造裂隙,志丹局部地区为长7和长9烃源岩贡献^[14];其二认为长9油藏为自生烃源岩贡献,并存在

^①国家自然科学基金(批准号:41272138);国家重大科技专项(编号:2011ZX05001-002-008,2011ZX05008-004-61);陕西省教育厅专项科研项目(批准号:12JK0491)资助。

收稿日期:2012-06-11;收修改稿日期:2012-10-22

自生自储式、下生上储式和上生下储式3种成藏组合类型^[9]。长10油藏的油源也存在2种不同观点:杨华等^[17]通过志丹地区长10油藏油源对比研究认为,长10油藏为湖盆中部长7优质烃源岩垂向倒灌入长10储层后经侧向运移聚集成藏;华庆地区长10原油亦为长7烃源岩贡献^[12]。另有学者认为安塞地区长10原油来源于长9烃源岩^[18]。由此可见,延长组深层石油来源问题仍然存在争议。油源认识不清使得延长组深层的石油勘探一度陷入困境。因此,明确延长组深层石油来源问题对于指导其石油勘探具有重要的现实意义。

吴堡地区位于鄂尔多斯盆地陕北斜坡中西部,东北距志丹县城直线距离约60 km,勘探面积约100 km²,是长庆油田第一采油厂近年来高产高效勘探开发区块(图1)。该地区具有多层系含油的特点,其中长6油层组为其主力产层,其次为长4+5、长7和长8油层组;在延安组、长3、以及长9和长10油层组亦

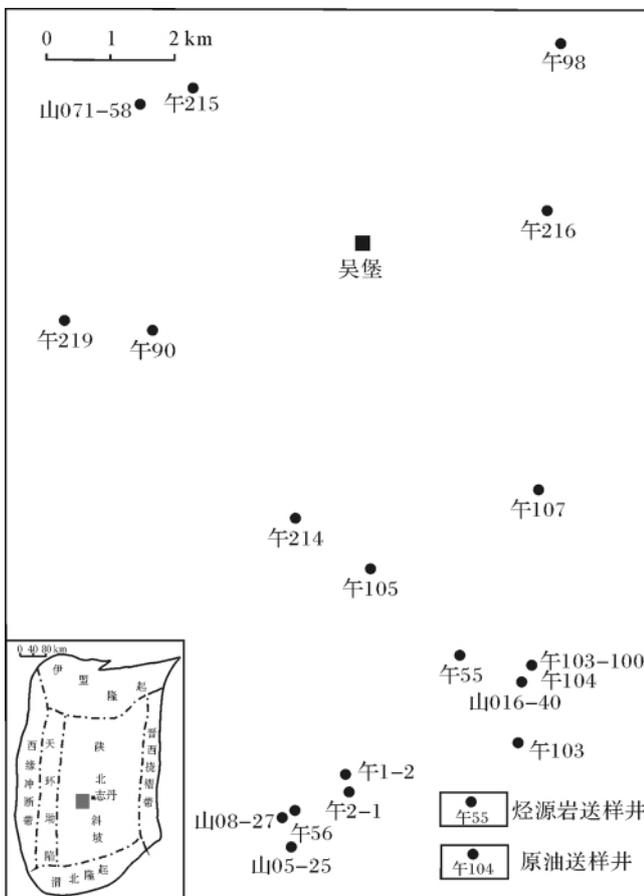


图1 鄂尔多斯盆地吴堡地区位置图及取样分布图

Fig. 1 The location map and sampling distribution in Wubao area, Ordos Basin

发现零星分布的产油井,预示着良好的石油勘探开发前景。由于该区是长庆油田新建产能区块,石油地质基础研究薄弱,对该区石油的来源问题没有开展过系统研究,从而制约了更深层次的勘探工作。本文以吴堡地区为例,通过对该区延长组原油物理性质、族组成和生物标志化合物特征及烃源岩地球化学特征的综合分析,结合区域地质背景资料,探究延长组石油来源,以期为该区下一步油气勘探,特别是延长组深层石油勘探提供地质依据。原油及烃源岩地球化学分析委托中国石油勘探开发研究院石油地质实验研究中心测试完成,分析数据可靠。

1 原油物理性质及族组成特征

吴堡地区延长组长6~长10原油颜色差异较大。长6原油颜色呈深褐色,相对较稠,反映原油中胶质和沥青质较多;长7原油为黄绿色或黄棕色,较稀;长8原油为黄绿色,非常稀;长9原油为黄棕色,较稀;长10原油颜色呈深棕色,较稀。邻区志丹地区长6原油密度平均为0.848 g/cm³,长7原油密度平均为0.833 g/cm³,长8原油密度平均为0.836 g/cm³,长9原油密度平均为0.849 g/cm³,长10原油密度平均为0.828 g/cm³。总体来看,随着埋藏深度的增加,原油密度具有先减小、后增加、再减小的趋势。纵向层位上距长7生油层越近,原油越稀,密度越小,颜色越浅;远离长7生油层原油变稠,密度增加,颜色变深,但长10原油密度较低。

来自不同类型源岩的石油具有不同的族组成,石油的族组成与原始成因有关^[19]。吴堡地区延长组原油饱和烃含量最高(55.79%~73.62%,平均66.60%),芳香烃含量较低(18.98%~26.82%,平均22.81%),非烃和沥青质含量最低(5.47%~18.17%,平均10.59%)(表1)。总体上,延长组原油具有饱和烃含量高,饱/芳比值较高,芳香烃、非烃和沥青质含量低的特征,说明原油已普遍达到成熟阶段。不同油层组的原油族组成特征具有较明显的差别,长6原油烃类含量平均为83.34%,长7~长10原油烃类含量均在90%以上。烃类中饱和烃含量显示出7>长8、长9、长10>长6,芳香烃含量长6最高,长8、长9和长10次之,长7最低。非烃和沥青质含量具有长6最高、长9和长10次之、长7较低、长8最低的特征。由于长6和长7原油主要为本区长7段底部张家滩页岩贡献,具有相同的物质来源,同时石油在运移过程中主要以层析作用为主,因此长6和

表1 延长组原油和烃源岩族组分

Table 1 The crude oil and hydrocarbon source rocks components in Yanchang Formation

样品	井名	层位	有机碳/%	氯仿沥青"A"/%	饱和烃/%	芳香烃/%	非烃/%	沥青质/%	饱/芳比	
原油	山071-58	长61	\	\	63.27	22.30	11.76	2.67	2.84	
	山05-25	长61	\	\	55.79	26.82	12.15	5.25	2.08	
	山08-27	长61	\	\	57.50	24.33	13.99	4.18	2.36	
	午1-2	长72	\	\	73.24	21.30	5.16	0.31	3.44	
	午2-4	长72	\	\	73.62	18.98	6.33	1.08	3.88	
	午104	长81	\	\	69.73	24.14	5.93	0.20	2.89	
	午214	长91	\	\	69.85	22.34	6.01	1.80	3.13	
	山016-40	长101	\	\	69.78	22.28	7.16	0.78	3.13	
	烃源岩	午98	长61	1.24	0.211	50.57	30.83	16.68	1.92	1.64
		午107	长61	3.64	0.340	27.94	40.28	23.50	8.29	0.69
午107		长71	1.40	0.228	42.41	30.96	21.74	4.90	1.37	
午219		长72	10.63	0.488	11.73	58.05	22.52	7.71	0.20	
午98		长72	4.84	0.420	42.85	34.80	18.56	3.80	1.23	
午216		长73	5.09	0.269	20.01	50.33	23.83	5.84	0.40	
午103-100		长73	9.13	0.467	22.80	49.85	22.24	5.12	0.46	
午103		长91	5.67	0.581	6.86	24.72	27.54	40.87	0.28	
午105		长91	5.55	0.519	8.47	49.37	24.27	17.89	0.17	
午216		长92	11.76	0.311	12.01	53.19	22.00	12.80	0.23	

长7原油族组成差异主要反映原油成熟度的不同。长8~长10原油族组成特征相似,但与长6原油差异明显,说明二者可能具有不同的物质来源。

2 原油生物标志化合物特征

2.1 饱和烃色谱特征

一般认为,强还原水介质条件形成的原油为植烷优势型,其Pr/Ph值小于0.8;还原条件形成的原油为姥植均势型,其Pr/Ph值分布于0.8~2.8,弱还原-弱氧化水介质条件形成的原油为姥藓烷优势型,其Pr/Ph值分布于2.8~4.0^[19]。吴堡地区延长组长6原油的Pr/Ph值为0.84;长7原油的Pr/Ph值为0.94;长8原油的Pr/Ph值为1.04;长9和长10原油的Pr/Ph值为0.97(图2)。总体来说,Pr/Ph比值分布在一个较窄的范围内,均在1附近波动,反映它们可能来源于一个类似的生物源,母质以混合型为主。长6~长10原油饱和烃色谱均呈单峰偏态分布,峰型完整,主峰碳位置偏低分子量烷烃,分布于C₁₇~C₁₉,说明有机质母质类型以低等水生生物为主。长6~长10原油性质好,均处于成熟演化阶段(图2)。

2.2 萜类化合物特征

吴堡地区长6~长10原油萜类化合物的共同特征为以细菌和蓝绿藻为主要烃源母质的各类五环三萜烷含量较高,其中以C₃₀-藿烷和C₂₉-降藿烷峰型最为突出,其次含有较多的C₂₇-三降藿烷,而来源于原

生动物的伽马蜡烷值较低(图3)。长6~长10原油差异性主要体现在:以菌藻类为主要烃源母质的三环萜烷含量长6原油较少,长8和长10原油较高,长7和长9原油最高;长6原油的Ts/Tm比值最低(分布区间为0.55~0.90,平均为0.67),说明原油成熟度较低;长7~长10原油Ts/Tm值均较高(分布区间为2.04~4.11,平均为3.47),其中以午2-4井长7原油为最高,其次为长9原油和长8原油,长10原油相对较低(表2,图3),说明长7~长10原油成熟度均很高。C₃₁升藿烷22S/22R+22S异构化参数对于评估从未成熟到生油早期阶段的成熟度具有很高的专属性,其平衡值为0.57~0.62^[20]。研究区长6原油C₃₁升藿烷22S/22R+22S值平均为0.54,说明已经进入生油阶段,长7~长10原油由于已达生油高峰阶段,C₃₁升藿烷22S/22R+22S值失去指示成熟度意义。

2.3 甾类化合物特征

$\alpha\alpha\alpha C_{29} 20S / (20S + 20R)$ 和 $C_{29} \beta\beta / (\beta\beta + \alpha\alpha)$ 两项指标随成熟度增加均增大,反应平衡值分别为0.52~0.55和0.67~0.71^[21]。这两项指标与成熟度的关系为:未成熟原油: $\alpha\alpha\alpha C_{29} 20S / (20S + 20R) < 0.20$; $C_{29} \beta\beta / (\beta\beta + \alpha\alpha) < 0.25$;低成熟原油: $\alpha\alpha\alpha C_{29} 20S / (20S + 20R) 0.20 \sim 0.35$; $C_{29} \beta\beta / (\beta\beta + \alpha\alpha) 0.25 \sim 0.42$;成熟原油: $\alpha\alpha\alpha C_{29} 20S / (20S + 20R) 0.35 \sim 0.50$; $C_{29} \beta\beta / (\beta\beta + \alpha\alpha) > 0.42$ ^[22-23]。吴堡地区延

长组原油的 $\alpha\alpha C_{29}20S/(20S + 20R)$ 值介于 0.52 ~ 0.64 之间, 除山 05-25 井和山 08-27 井长 6 原油以及午 2-1 井长 7 原油达到平衡点外, 其余长 6 ~ 长 10 原

油该值已超过平衡点, 失去指示成熟度意义。 $C_{29}\beta\beta/(\beta\beta + \alpha\alpha)$ 值介于 0.61 ~ 0.68 之间, 均指示成熟原油特征(见表 2)。

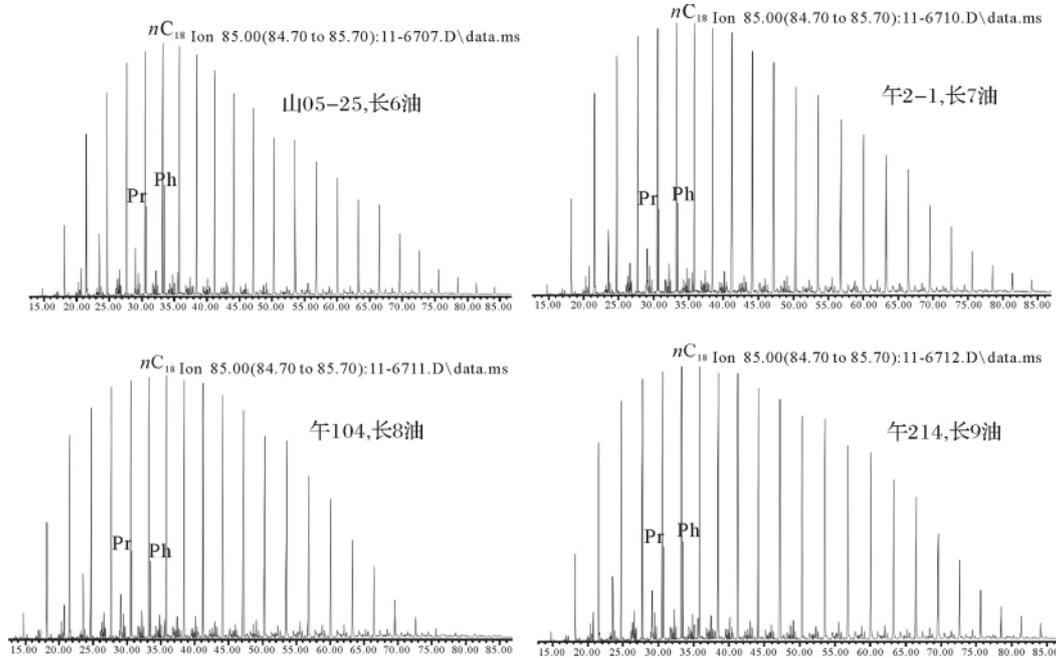


图 2 延长组长 6 ~ 长 9 原油饱和烃 $m/z85$ 质量色谱图

Fig. 2 Oil saturated hydrocarbon $m/z85$ mass chromatogram of Chang-6 ~ Chang-9 in Yanchang Formation

表 2 延长组原油和烃源岩生物标志物参数

Table 2 The parameters of crude oil and source rocks in Yanchang Formation

样品	井名	层位	Ts /Tm	C_{31} 升藿烷 22S/22R + 22S	$C_{29}\beta\beta/(\beta\beta + \alpha\alpha)$	$\alpha\alpha C_{29}20S/(20S + 20R)$	$C_{27}/\%$	$C_{28}/\%$	$C_{29}/\%$
原油	山 071-58	长 61	0.90	0.53	0.61	0.57	27.48	34.70	37.82
	山 05-25	长 61	0.56	0.54	0.59	0.54	25.33	36.03	38.64
	山 08-27	长 61	0.55	0.54	0.58	0.54	25.92	33.03	41.05
	午 1-2	长 72	3.38	0.44	0.65	0.60	30.71	36.45	32.85
	午 2-1	长 72	4.11	0.44	0.58	0.52	26.17	33.89	39.94
	午 104	长 81	3.80	0.44	0.65	0.61	29.59	35.58	34.83
	午 214	长 91	4.03	0.42	0.65	0.60	27.76	37.98	34.26
	山 016-40	长 101	2.04	0.47	0.68	0.64	30.58	39.99	29.44
烃源岩	午 107	长 61	1.61	0.54	0.54	0.53	32.52	31.73	35.76
	午 98	长 61	1.51	0.54	0.61	0.52	27.99	39.29	32.72
	午 107	长 71	3.56	0.50	0.65	0.62	37.60	28.71	33.69
	午 219	长 72	1.98	0.52	0.59	0.58	26.95	38.63	34.42
	午 216	长 72	2.42	0.49	0.61	0.59	31.07	35.21	33.72
	午 98	长 73	3.55	0.50	0.66	0.62	31.42	35.42	33.17
	午 103-100	长 73	3.83	0.46	0.51	0.45	29.16	26.12	44.72
	午 103	长 91	2.31	0.53	0.54	0.53	15.87	33.86	50.27
	午 105	长 91	3.25	0.48	0.60	0.57	20.98	32.98	46.03
	丹 48	长 91	4.14	0.53	\	0.51	27.91	32.96	39.13
	丹 48	长 91	3.97	0.52	\	0.51	28.88	27.87	43.25
	丹 48	长 91	3.54	0.48	\	0.50	28.63	28.92	42.45
	午 216	长 92	2.25	0.49	0.58	0.57	32.46	32.56	34.98

备注: 丹 48 井数据引自张文正等 2008。

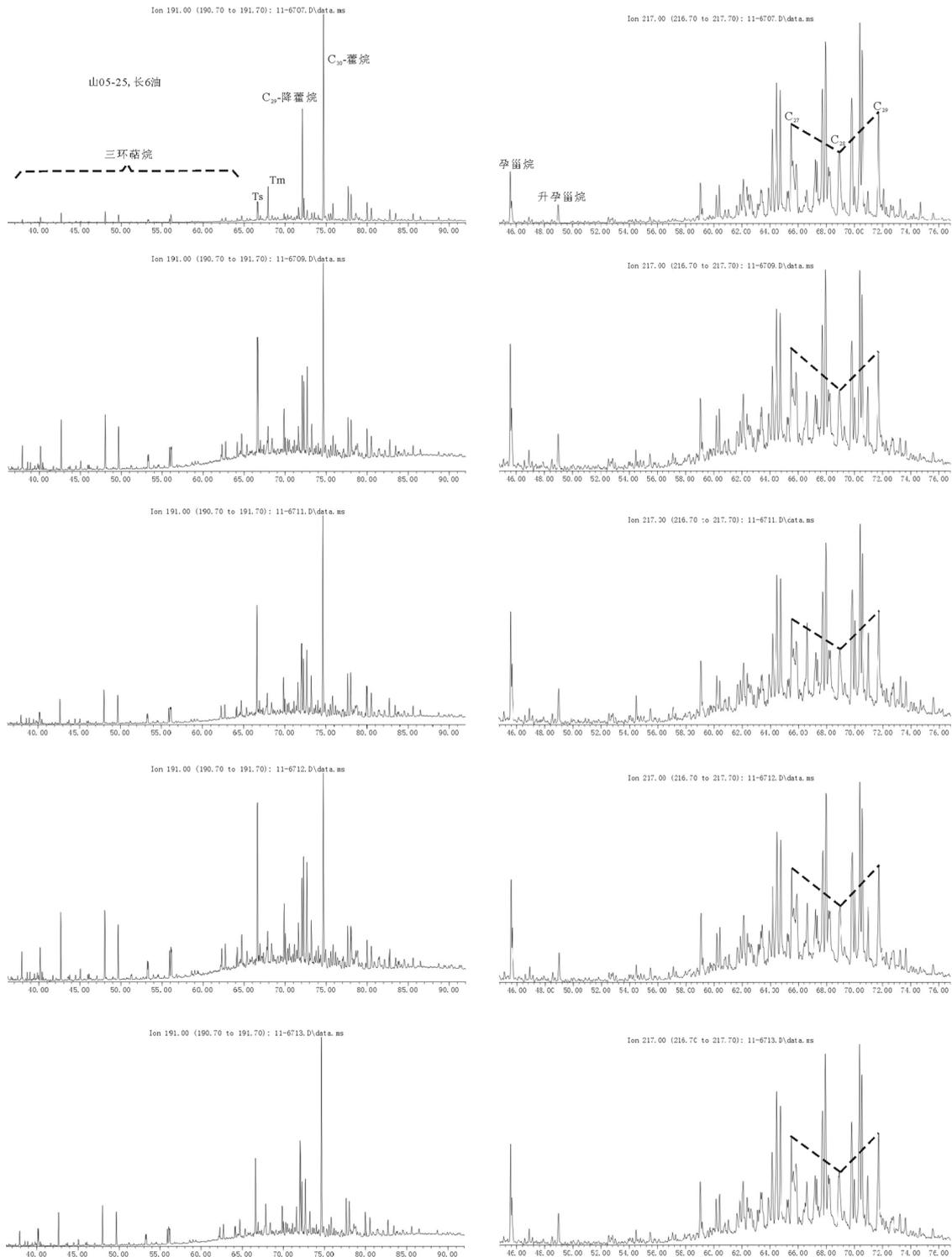


图3 延长组长6~长10原油甾萜烷质量色谱图

Fig. 3 Curde oil sterols terpane mass chromatogram of Chang-6 ~ Chang-9 in Yanchang Formation

延长组长6~长10原油规则甾萜烷均呈V字形分布(图3),总体上以 C_{28} 和 C_{29} 略占优势为特征, C_{27} 百分含量相对较少,反映了原油主要为低等水生生物和高等植物混合成因。不同层位原油,规则甾萜烷相对含

量有差异,长6原油和午2-1井长7原油具有 $C_{29} > C_{28} > C_{27}$ 特征;午1-2井长7原油、长8和长9原油具有 $C_{28} > C_{29} > C_{27}$ 特征;山016-40井长10原油具有 $C_{28} > C_{27} > C_{29}$ 特征。甾萜类化合物中孕甾烷和升孕甾

烷含量与原油成熟度关系密切,随成熟程度而增大^[24]。研究区长6原油孕甾烷和升孕甾烷含量较低,说明原油成熟度低;长7~长10原油孕甾烷和升孕甾烷含量较高,反映原油成熟度较高。

3 油源对比

3.1 地质综合分析

前人研究表明,鄂尔多斯盆地长7及其以上层位原油主要为长7烃源岩贡献。一般认为,随着运移距离的增加,若以层析作用为主,则原油密度、粘度等沿运移方向逐渐变小,若运移过程中氧化作用占主导,则出现相反的变化规律^[25]。前述原油物理性质和地球化学特征表明,在长6~长10原油中,长6原油颜色深、密度大、族组分中饱和烃含量最低,非烃和沥青质含量高,饱/芳比最低;而长7原油颜色浅、密度小、族组分中饱和烃含量最高,非烃和沥青质含量低,饱/芳比最高。长6和长7原油在物理性质及化学性质方面的差异主要和原油的成熟过程有关。鄂尔多斯盆地延长组长7生油岩在早白垩世中期进入生油窗,早白垩世末期达到生烃高峰,白垩纪末期生烃中止,具有持续成烃、连续成藏的特征^[26]。现今长6相对较重的原油来自长7和长6烃源岩生油过程中成熟早中期混合的产物,其成熟度相对较低,由于此时期油气运移动力相对较弱,石油生成量首先要满足烃源岩自身吸附后才可以排出,而近距离运移聚集于长7₂和长7₁储层中,后期随着长7生油岩埋深的加大,温度升高,所生成油气的成熟度增高,密度变小,由于生烃作用产生的异常压力油气运移动力增强,并继续向上部运移过程中,导致原来聚集在长7₂和长7₁中早期相对较重的原油被“驱赶”向上转移至长6储层中,由于油气主充注时期长6储层已经比较致密,原油不能进行有效的混合作用,从而形成现今原油下轻上重的分布格局;同时由于原油成熟阶段油气运移动力较强,长7烃源岩生成的油气除向上部储层运移外,部分还可以向其下部储层进行运移,从而形成长8成熟度较高的原油。本次虽没有获取长9段李家畔页岩样品进行分析,但从前人研究成果来看,李家畔页岩为一套重要的区带性优质油源岩,志丹地区丹48井长9¹黑色泥页岩有机碳平均为4.95%,有机质类型为腐泥型,镜质体反射率(R_o)平均为0.855%^[8]。吴堡地区长9段李家畔页岩厚度分布于0~13.2m,平均为6.5m,李家畔页岩可以为长9₁油藏和长8油藏提供油源。长9₁两块暗色泥岩(非李

家畔页岩)样品甾烷特征显示以C₂₉占绝对优势为特征,为以生气为主的气源岩,生油潜力有限。长9₂样品甾烷特征显示以低等水生生物为主要母质来源,因此,长10原油推测可能主要来自于长9₂有效烃源岩贡献,这与周进高等^[9]研究结论一致,但由于只有一个分析样品,还需做进一步的地化工作来加以求证。从烃源岩成熟度来看,本区长6、长7和长8暗色泥岩样品最高热解峰温(T_{max})比较接近,平均值为450℃;长9暗色泥岩 T_{max} 值较高,平均为457℃;烃源岩热演化程度的差异也是造成本区长6~长10原油成熟度差异的一个重要原因。地质分析认为长7生油层中的原油之所以未能向下倒灌入长9和长10储层(图4),一方面是因为长7₃生油层与下伏长9油层组顶部相隔60~70m的长8地层厚度(砂岩占56%,泥岩占44%),研究区内未发现断层和宏观裂缝等运移通道,且本区长9顶部李家畔页岩分布较稳定,既是良好的生油层也是优质的盖层,该区已发现的长8油藏主要分布在长8₁中,长8₂未有油藏发现,说明长7₃生油岩生成的油气可以向下运移至长8₁储层中,但不能通过长8₂地层和长9顶部李家畔页岩运移至长9油层组中;另一方面,现今储层物性数据显示,长7₃孔隙度平均为6.1%,渗透率平均为 $0.032 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$;上覆长7₂储层孔隙度平均为8.4%,渗透率平均为 $0.584 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$;下伏长8₁储层孔隙度平均为7.0%,渗透率平均为 $0.156 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。由此可见,长7₂储层物性好于长8₁,长7₃储层物性差于长8₁和长7₂。因此,总体上长7₃烃源岩生成的油气可以向上、下部储层进行运移,但主要以向上运移为主。油气运移是否可以倒灌还存在争议,李传亮^[27,28]认为油气倒灌不可能发生;付广等^[29,30]认为松辽盆地扶余油层油藏为上覆青一段烃源岩通过断裂向下运移至扶杨油层后聚集成藏。笔者认为,油气能否向下进行运移的最主要因素是上覆烃源岩和下伏储层之间是否有足够大的压力差,如果源储压差能够克服油气运移的主要阻力(储层毛细管力),油气即可以排出烃源岩。至于运移距离的远近主要与源储压差的大小、运移通道和储层性质以及三者有效配置关系有关,在适宜的地质条件下,油气倒灌是可以发生的。

3.2 生物标志化合物综合对比

烃类运移贯穿于油气生成的整个过程,在不同阶段生成了不同的化合物。因此,油藏内的原油与某一地质时期烃源岩生成的烃类在组成上可能不一致。例如,Mackenzie等^[31]认为聚集成藏的油气是不同成

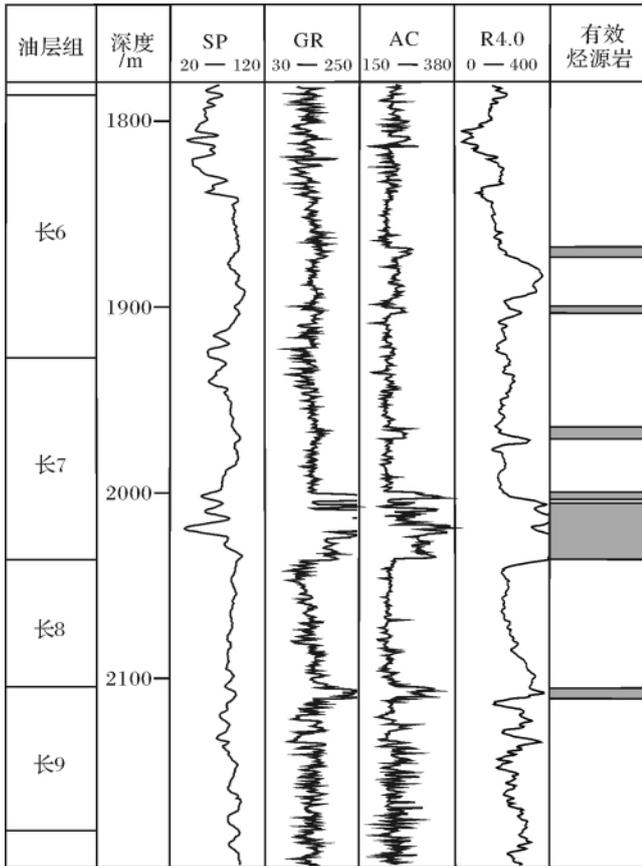


图4 烃源岩典型电测曲线响应特征

Fig. 4 The response characteristics of typical electric log in hydrocarbon source rocks

熟度有机流体的混合物。正相关不是样品有联系的必要证据,因为不同烃源岩可以表现出相似的地球化学特征;另一方面,负相关却是样品之间没有成因联系的有效证据^[32]。

吴堡地区长6原油和午2-1井长7原油 C_{27} - C_{28} - C_{29} 规则甾烷分布基本一致,与长8、长9和长10原油相比具有明显的区别,暗示长6和长7原油具有相同的母源属性。午1-2井长7原油 C_{29} 甾烷含量较低, C_{27} 含量较高,与长6原油具有明显区别(成熟度不同),但和长8原油具有很好的一致性,说明可能具有相同的母质来源;长9、长10原油规则甾烷含量具有很大的差异,且与长6、长7和长8原油的区别也很大,表明其可能各有不同的母质来源(图5)。

在 T_s/T_m 与 $\alpha\alpha C_{29}S/(S+R)$ 的交汇图上(图6),长6原油与长6、长7烃源岩分布区域较一致;长7原油与长7烃源岩分布区域接近;长8原油与长7₃烃源岩区域一致;长9原油与长9₁烃源岩区域较接近;长10原油与长9₂烃源岩具有很好的一致性,同时

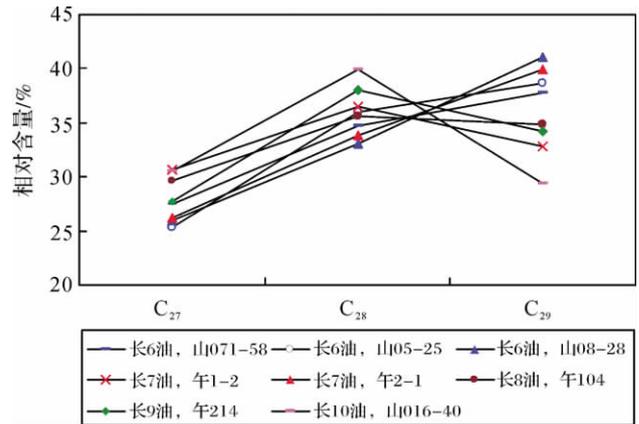


图5 延长组原油规则甾烷含量分布图

Fig. 5 The map of oil regular steranes content distribution in Yanchang Formation

与午219和午216井长7₂烃源岩分布区域亦较接近,但长7₂烃源岩生成的原油是不可能越过长7₃、长8和长9地层运移至长10储层中的,因此长10原油应为长9₂烃源岩贡献。

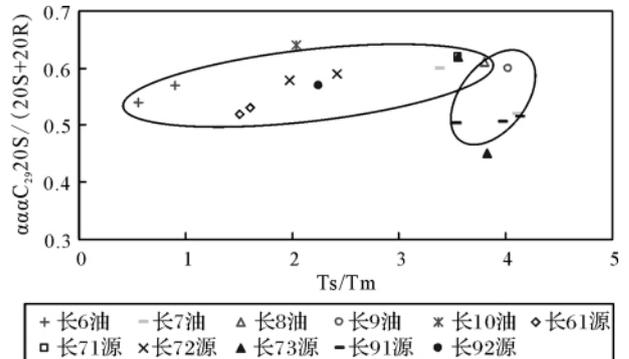


图6 延长组原油和烃源岩 T_s/T_m 与 $\alpha\alpha C_{29} 20S/(20S+20R)$ 相关图

Fig. 6 The correlation diagram T_s/T_m and $\alpha\alpha C_{29} 20S/(20S+20R)$ of oil and source rock in Yanchang Formation

大量资料表明,有机质在地质演化过程中,随演化程度增加,甾烷、萜烷的生物构型(R构型)向地质构型(S构型)转化^[19]。能够反映有机质热演化程度的甾烷异构化参数较多,常用的主要有 $C_{29} \beta\beta/(\beta\beta + \alpha\alpha)$ 、 $\alpha\alpha C_{29} 20S/(20S + 20R)$ 等。其生烃门限和演化平衡终点 $C_{29} \beta\beta/(\beta\beta + \alpha\alpha)$ 的平衡点为0.5^[33],也有人认为是0.67~0.71^[21],相当于 R_o 为0.9%左右; $\alpha\alpha C_{29} 20S/(20S + 20R)$ 的演化平衡终点为0.5^[33]。吴堡地区延长组各层系原油均已达到或接近平衡点。长6和长7源岩与长6、长7原油分布区域

一致;长7₃源岩与长7、长8原油分布区域一致;长10原油成熟度较高,与长9₂源岩可比性较差(图7)。

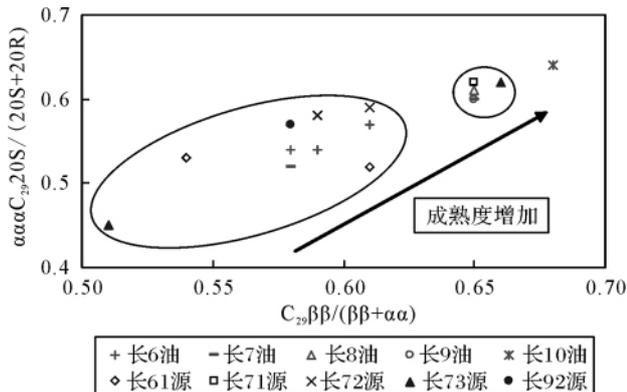


图7 长6~长10原油 $C_{29}\beta\beta/(\beta\beta+\alpha\alpha)$ 与 $\alpha\alpha C_{29}20S/(20S+20R)$ 关系图

Fig. 7 The correlation diagram $C_{29}\beta\beta/(\beta\beta+\alpha\alpha)$ and $\alpha\alpha C_{29}20S/(20S+20R)$ of Chang-6 ~ Chang-10 crude oil

综合地质背景、原油和烃源岩生物标志化合物特征以及成熟度的差异,认为吴堡地区延长组原油除主要为长7烃源岩贡献外,长9有效烃源岩对长9和长10油藏的形成具有重要作用。其中,长6和长7原油主要为长7烃源岩贡献,对长7中上部和长6地层中发育的有效烃源岩也有一定贡献;长8原油主要为长7烃源岩贡献,长9顶部李家畔页岩可能也有一定的作用;长9原油主要为长9顶部李家畔页岩贡献,安塞地区发现的长9油藏经油源对比证实亦为李家畔页岩贡献^[10];长10原油可能主要为长9²有效烃源岩贡献,还需做进一步的研究。

4 结论

(1) 吴堡地区延长组原油物理性质和族组成特征具有明显的区别:长7原油密度较低,长6与长8原油密度较高,反映在原油运移过程中,早期成熟度较低的原油被后期成熟度较高的原油驱替,并使前者继续运移,结果导致远离生油层的原油密度增大。长9和长10原油密度的差异主要与油源条件和运移分馏效应有关。

(2) 原油族组成以长7饱和烃含量最高,非烃和沥青质含量最低;长6原油饱和烃含量最低,非烃和沥青质含量最高;长8、长9和长10原油饱和烃含量一致。沥青质含量以长8最低、长10次之、长9最小,其与原油密度的差异具有一致性。

(3) 生标化合物萘烷 T_s/T_m 和 C_{31} 升藿烷 $22S/$

$22R+22S$ 值,甾烷 $\alpha\alpha C_{29}20S/(20S+20R)$ 和 $C_{29}\beta\beta/(\beta\beta+\alpha\alpha)$ 指标表明,延长组长6原油为成熟原油,但其成熟度相对较低;长7~长10原油的成熟度较高。长6~长10原油规则甾烷均呈V字形分布,总体上以 C_{28} 和 C_{29} 略占优势为特征, C_{27} 百分含量相对较少,反映了原油主要为藻类源或混合源有机质特征。

(4) 烃源岩和原油的族组成特征、生物标志化合物特征以及地质特征综合分析认为,长6和长7原油主要为长7烃源岩贡献,长6烃源岩也具有一定的辅助作用。长8原油主要为长7烃源岩向下运聚成藏。长9原油主要为长9¹烃源岩向下运聚成藏。长10原油可能主要为长9²有效烃源岩向下运聚成藏,但仍需做进一步的地质及地化研究。

参考文献 (References)

- 何自新,等著. 鄂尔多斯盆地演化与油气[M]. 北京: 石油工业出版社, 2003 [He Zixin, et al. Tectonic-thermal Evolution History and Hydrocarbon Accumulation in the Ordos Basin [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2003]
- 杨华, 张文正. 论鄂尔多斯盆地长7段优质油源岩在低渗透油气成藏富集中的主导作用: 地质地球化学特征[J]. 地球化学, 2005, 34(2): 147-154 [Yang Hua, Zhang Wenzheng. Leading effect of the Seventh Member high-quality source rock of Yanchang Formation in Ordos Basin during the enrichment of low-permeability oil-gas accumulation: Geology and geochemistry [J]. Geochimica, 2005, 34(2): 147-154]
- 张文正, 杨华, 李剑锋, 等. 论鄂尔多斯盆地长7段优质油源岩在低渗透油气成藏富集中的主导作用—强生排烃特征及机理分析[J]. 石油勘探与开发, 2006, 33(3): 289-293 [Zhang Wenzheng, Yang Hua, Li Jianfeng, et al. Leading effect of high-class source rock of Chang 7 in Ordos Basin on enrichment of low permeability oil-gas accumulation [J]. Petroleum Exploration and Development, 2006, 33(3): 289-293]
- 白玉彬, 赵靖舟, 罗静兰, 等. 陕北斜坡东部蟠龙油田长6油藏形成条件及勘探方向[J]. 新疆石油地质, 2011, 32(6): 594-596 [Bai Yubin, Zhao Jingzhou, Luo Jinglan, et al. Forming conditions and explorative targets of Chang-6 reservoir in Panlong oilfield in eastern north Shaanxi slope, Ordos Basin [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2011, 32(6): 594-596]
- 长庆油田石油地质志编写组. 中国石油地质志(卷十二): 长庆油田[M]. 北京: 石油工业出版社, 1992 [Petroleum Geological Annals Compile Group of Changqing Oil Field. Petroleum Geological Annals (Vol. 12): Changqing Oil Field [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1992]
- 党犇, 赵虹, 李文厚, 等. 鄂尔多斯盆地陕北地区上三叠统延长组不同级次层序界面的识别[J]. 中国地质, 2007, 34(3): 414-421

- [Dang Ben, Zhao Hong, Li Wenhui, *et al.* Identification of sequence boundaries of different orders in the Upper Triassic Yanchang Formation in northern Shaanxi, Ordos Basin [J]. *Geology in China*, 2007, 34 (3): 414-421]
- 7 张文正, 杨华, 傅锁堂, 等. 鄂尔多斯盆地长9₁湖相优质烃源岩的发育机制探讨[J]. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2007, 37(Supl): 33-38 [Zhang Wenzheng, Yang Hua, Fu Suotang, *et al.* On the development mechanism of the lacustrine high-grade hydrocarbon source rocks of Chang 9¹ member in Ordos Basin [J]. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 2007, 37(Suppl): 33-38]
 - 8 张文正, 杨华, 李善鹏. 鄂尔多斯盆地长9₁湖相优质烃源岩成藏意义[J]. *石油勘探与开发*, 2008, 35(3): 557-562 [Zhang Wenzheng, Yang Hua, Li Shanpeng. Hydrocarbon accumulation significance of Chang 9¹ high-quality lacustrine source rocks of Yanchang Formation, Ordos Basin [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2008, 35(3): 557-562]
 - 9 周进高, 姚根顺, 邓红婴, 等. 鄂尔多斯盆地延长组长9油层组勘探潜力分析[J]. *石油勘探与开发*, 2008, 35(3): 289-293 [Zhou Jingao, Yao Genshun, Deng Hongying, *et al.* Exploration potential of Chang 9 member, Yanchang Formation, Ordos Basin [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2008, 35(3): 289-293]
 - 10 赵靖舟, 白玉彬, 刘鹏, 等. 坪北探区延长组长8、长9石油地质综合研究[R]. 西安: 西安石油大学油气资源学院, 2011 [Zhao Jingzhou, Bai Yubin, Liu Peng, *et al.* An integrated study of petroleum geology in Chang 8, Chang 9 of Yanchang Formation, Pingbei area [R]. Xi'an: School of Petroleum Resources, Xi'an Petroleum University, 2011]
 - 11 罗晓容, 张刘平, 杨华, 等. 鄂尔多斯盆地陇东地区长8¹段低渗油藏成藏过程[J]. *石油与天然气地质*, 2010, 31(6): 770-778 [Luo Xiaorong, Zhang Liuping, Yang Hua, *et al.* Oil accumulation process in the low-permeability Chang-8¹ member of Longdong area, Ordos Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2010, 31(6): 770-778]
 - 12 张晓丽, 段毅, 何金先, 等. 鄂尔多斯盆地华庆地区延长组下油层组原油地球化学特征及油源对比[J]. *天然气地球科学*, 2011, 22(5): 866-873 [Zhang Xiaoli, Duan Yi, He Jinxian, *et al.* Geochemical characteristics of crude oil in lower part of Yanchang Formation and correlation of oil source in Huaqing area of Ordos Basin [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2011, 22(5): 866-873]
 - 13 吴保祥, 段毅, 郑朝阳, 等. 鄂尔多斯盆地古峰庄—王洼子地区长9油层组流体过剩压力与油气运移研究[J]. *地质学报*, 2008, 82(6): 844-849 [Wu Baoxiang, Duan Yi, Zheng Zhaoyang, *et al.* Fluid overpressure and migration of oil and gas from Chang 9 member in Gufengzhuang-Wangwazi area, Ordos Basin [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2008, 82(6): 844-849]
 - 14 段毅, 于文修, 刘显阳, 等. 鄂尔多斯盆地长9油层组石油运聚规律研究[J]. *地质学报*, 2009, 83(6): 855-860 [Duan Yi, Yu Xiwen, Liu Xianyang, *et al.* Oil migration and accumulation rules of Chang-9 oil-bearing Formation in the Ordos Basin [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2009, 83(6): 855-860]
 - 15 王传远, 段毅, 车桂美, 等. 鄂尔多斯盆地上三叠统延长组原油地球化学特征及油源分析[J]. *高校地质学报*, 2009, 15(3): 380-386 [Wang Chuanyuan, Duan Yi, Che Guimei, *et al.* Geochemical characteristics and oil-source analysis of crude oils in the Yanchang Formation of Upper Triassic from Ordos Basin [J]. *Geological Journal of China Universities*, 2009, 15(3): 380-386]
 - 16 王传远, 段毅, 杜建国, 等. 鄂尔多斯盆地三叠系延长组原油中性含氮化合物的分布特征及油气运移[J]. *油气地质与采收率*, 2009, 16(3): 7-10 [Wang Chuanyuan, Duan Yi, Du Jianguo, *et al.* Neutral nitrogen compounds distribution and petroleum migration of Yanchang formation, Triassic system, Ordos Basin [J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2009b, 16(3): 7-10]
 - 17 杨华, 张文正, 蔺宏斌, 等. 鄂尔多斯盆地陕北地区长10油源及成藏条件分析[J]. *地球化学*, 2010, 39(3): 274-279 [Yang Hua, Zhang Wenzheng, Lin Hongbin, *et al.* Origin of Chang 10 oil reservoir in Northern Shaanxi region of Ordos Basin [J]. *Geochimica*, 2010, 39(3): 274-279]
 - 18 胡友洲, 何奉朋, 张龙, 等. 安塞地区长10段原油地球化学特征及油源探讨[J]. *西安石油大学学报: 自然科学版*, 2010, 25(3): 15-18 [Hu Youzhou, He Fengpeng, Zhang Long, *et al.* Study on the geo-chemical characteristics and the oil source of Chang 10 member oil in Ansai oilfield [J]. *Journal of Xi'an Shiyou University: Natural Science Edition*, 2010, 25(3): 15-18]
 - 19 梅博文, 刘希江. 我国原油中异戊间二烯烷烃的分布及其与地质环境的关系[J]. *石油与天然气地质*, 1980, 1(2): 99-115 [Mei Bowen, Liu Xijiang. The distribution of isoprenoid alkanes in China's crude oil and its relation with the geologic environment [J]. *Oil & Gas Geology*, 1980, 1(2): 99-115]
 - 20 Seifert W K, Moldowan J M. The effect of thermal stress on source-rock quality as measured by hopane stereochemistry [J]. *Physics and Chemistry of the Earth*, 1980, 12: 229-237
 - 21 Seifert W K, Moldowan J M. Use of biological markers in petroleum exploration [C] // *Methods in Geochemistry and Geophysics*. Elsevier, Amsterdam, 1986, 24: 261-290
 - 22 陈建渝, 刘从印, 张树林, 等. 原油中生物标志物的组成是成藏史的反应[J]. *地球科学—中国地质大学学报*, 1997, 22(6): 97-102 [Chen Jianyu, Liu Congyin, Zhang Shulin, *et al.* Composition of the biomarkers in crude oil is the reflection of pool-forming history [J]. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 1997, 22(6): 97-102]
 - 23 赵东升, 张敏, 张道伟, 等. 柴达木盆地西部地区古、新近系油源成熟度[J]. *沉积学报*, 2007, 25(2): 319-324 [Zhao Dongsheng, Zhang Min, Zhang Daowei, *et al.* Maturity of Tertiary oil-source in West Qaidam Basin [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2007, 25(2): 319-324]
 - 24 黄第藩, 张大江, 李晋超. 论4-甲基甾烷和孕甾烷的成因[J]. *石油勘探与开发*, 1989, (3): 8-15 [Huang Difan, Zhang Dajiang, Li Jinchao. On origin of 4-methyl steranes and pregnanes [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 1989, (3): 8-15]
 - 25 李明诚. 石油与天然气运移 [M]. 北京: 石油工业出版社, 2004 [Li Mingcheng. *Oil and Gas Migration* [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2004]
 - 26 邹才能, 陶士振, 侯连华, 等. 非常规油气地质 [M]. 北京: 地质

- 出版社, 2011 [Zou Caineng, Tao Shizhen, Hou Lianhua, *et al.* Unconventional Petroleum Geology [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2011]
- 27 李传亮, 张景廉, 杜志敏. 油气初次运移理论新探[J]. 地学前缘, 2007, 14(4): 132-142 [Li Chuanliang, Zhang Jinglian, Du Zhimin. New viewpoints of the primary migration of oil and gas [J]. Earth Science Frontiers, 2007, 14(4): 132-142]
- 28 李传亮. 油气倒灌不可能发生[J]. 岩性油气藏, 2009, 21(1): 6-10 [Li Chuanliang. Downward migration of oil and gas can not occur [J]. Lithologic Reservoirs, 2009, 21(1): 6-10]
- 29 付广, 刘美薇. 松辽盆地长10区块扶余油层运移通道及对油成藏的控制[J]. 沉积学报, 2010, 28(1): 201-207 [Fu Guang, Liu Meiwei. Migration pathways of Fuyu oil layer in Chang 10 block in Songliao Basin and its control on oil accumulation [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2010, 28(1): 201-207]
- 30 付广, 王有功, 袁大伟. 三肇凹陷扶余油层源断裂的再认识及其对成藏的控制作用[J]. 石油学报, 2010, 31(5): 762-766 [Fu Guang, Wang Yougong, Yuan Dawei. Source faults of F, Y oil layer in Sanzhao Depression and its control to oil accumulation [J]. Acta Petrolei Sinica, 2010, 31(5): 762-766]
- 31 Mackenzie A S, Rullkotter J, Welte D H, *et al.* Reconstruction of oil formation and accumulation in North Slope, Alaska, using quantitative gas chromatography-mass spectrometry [C]. Alaska North Slope Oil/Source Rock Correlation Study, Tulsa, 1985: 319-77
- 32 Peters K E, Walters C C, Moldowan J M. The Biomarker Guide (Volume 2): Biomarkers and Isotopes in Petroleum Exploration and Earth History [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2005
- 33 Mackenzie A S, Patience R L, Maxwell J R, *et al.* Molecular parameters of maturation in the Toarcian shales, Paris Basin, France [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1980, 44: 1709-1721

Geochemical Characteristics of Crude Oil and Oil-Source Correlation in Yanchang Formation(Upper Triassic) in Wubao Area, Ordos Basin

BAI Yu-bin^{1,2} LUO Jing-lan² LIU Xin-ju³ JIN Wen-qi³ WANG Xiao-jun³

(1. School of Earth Sciences and Engineering, Xi'an Petroleum University, Xi'an 710065;

2. Geological Department, State Key Laboratory of Continental Dynamics, Northwest University, Xi'an 710069;

3. The First Oil Production Factory, Changqing Oilfield Branch Company, PetroChina, Yan'an, Shaanxi 716000)

Abstract: The oil sources in the Yanchang Formation of the Ordos Basin has always been controversial, especially in the reservoir Chang-8 to Chang-10. According to the crude oil of Chang-6 to Chang-10 of Yanchang Formation in Wubao area, the article discusses the physical properties, the group composition, the biomarkers, and the oil-oil and oil-source correlation in terms of their geneses and the origin of petroleum in respective reservoirs so as to provide the geological basis for the area's petroleum exploration and prediction. The result shows that the group composition of Chang-6 to Chang-10 is characterized by the highest content of the saturated hydrocarbon, which follows the aromatics, and non-hydrocarbons are the lowest. Chang-6 to Chang-10 are all mature crude oil, revealing the hybrid origin of the lower hydrobionts and the higher plants, however, the crude oil in Chang-6 is distinctively different from that in Chang-7 to Chang-10 in terms of its group composition. The crude oil in Chang-6 is the early migration result of hydrocarbons in the source rock of Chang-7 to Chang-10, whose maturity is the lowest, while the crude oil in Chang-7 to Chang-10 is migration result of hydrocarbon-generating peaks, whose maturity is superior. And the oil and source correlation demonstrates that Zhangjiatan shale, at the bottom of the Chang-7, contribute to the oil pools in Chang-6 and Chang-7, in addition, the effective source rocks on the top and middle of Chang-7 and Chang-6 make difference. The oil pools in Chang-8, mixed geneses crude oil, are mainly the down migration result of the lower source rocks in Chang-7, secondly Chang-8 and Lijiapan source rocks on the top of Chang-9 do. The oil pools in Chang-9 are formed by the downward flow of Lijiapan shale, but the petroleum in Chang-10 is accumulated may by the downward migration of the effective source rocks of Chang-9₂. The thermal maturity should be the most responsible for the differences between crude oil group compositions which are far away from the dominant source rocks.

Key words: oil geochemistry; oil-source correlation; Yanchang Formation; Wubao area; Ordos Basin