

鄂尔多斯盆地陇东地区长9油层组油源分析^①

赵阳^{1,2} 姚泾利³ 段毅^{1,2} 吴应忠^{1,2} 曹喜喜^{1,2} 徐丽⁴ 陈珊珊⁵

(1.甘肃省油气资源研究重点实验室/中国科学院地质与地球物理研究所油气资源研究重点实验室 兰州 730000;

2.中国科学院大学 北京 100049;3.中国石油长庆油田分公司勘探开发研究院 西安 710018;

4.中国石油勘探开发研究院西北分院 兰州 730020;5.中石化华北分公司第二采油厂 宁夏盐池 751500)

摘要 鄂尔多斯盆地陇东地区长9油层组油源问题是制约该地区勘探进程的因素之一。为了解决这一问题,首先依据长9原油地球化学资料对原油成因进行了研究;针对长7烃源岩和长9烃源岩地球化学特征相似性导致难以评价两种烃源岩对长9油层组成藏贡献的问题,本文基于聚类分析理论,利用灵敏的生物标志化合物参数计算、分析了长9原油与长7烃源岩和长9烃源岩间的相关性和类属关系,同时结合陇东地区地质特征探讨了长9原油成藏可能的运移路径。研究表明:长9原油形成于弱氧化—弱还原的淡水湖泊环境,原油母质主要由水生生物和高等植物构成,原油已经成熟;长9原油主要来自长7烃源岩,部分来自长9烃源岩;长7烃源岩和长9烃源岩生成的原油沿北东—南西向运移。烃源岩较强的生排烃能力、良好的疏导体系和有利的砂体展布对长9石油成藏起着至关重要的作用。

关键词 鄂尔多斯盆地 原油 油源分析 聚类分析 运移路径

第一作者简介 赵阳 男 1986年出生 博士 石油地质 E-mail: zhaoyangcdut@163.com

通讯作者 段毅 男 教授 E-mail: duany@lzb.ac.cn

中图分类号 P593 **文献标志码** A

0 引言

随着经济发展对石油需求的提高,勘探更多石油资源成为各国亟待解决的问题^[1]。烃源岩的分布规律,特别是烃源岩和原油的关系作为制约勘探开发的重要因素备受关注,前人对此进行了大量研究。生物标志化合物包含大量指纹信息,可从原油形成环境、母质类型和成熟度方面进行原油成因分析^[2-4],是重要的油源对比方法。原油与烃源岩地球化学特征相似是进行油源对比和分析的基础,然而沉积盆地发育多期性质相似的烃源岩或同期沉积的地层不同区域沉积环境的差异性都增加了油源对比的复杂性,导致油源分析结果常常具有多解性,限制了石油的勘探进程。因此,针对多期烃源岩地球化学特征相似性引起的油源分析问题,笔者以鄂尔多斯盆地陇东地区为例,应用聚类分析理论对这一问题进行研究,厘定油源关系;并且结合本区已有的地质研究结果探讨原油运聚机理,为油源分析和成藏研究提供一种新思路。

鄂尔多斯盆地是在华北克拉通古老基底基础上发展起来的中、新生代沉积盆地^[5]。晚三叠世延长期长7沉积期沉积了一套深湖—半深湖相富含有机

质的暗色泥岩,是鄂尔多斯盆地主力烃源岩^[6]。随着勘探程度的逐步深入,发现延长组还发育一期优质的长9湖相烃源岩^[7]。同时,湖盆内河流三角洲和扇三角洲沉积体系广泛分布^[8]。这些有利的生储组合为形成大型油藏奠定了良好的基础。陇东地区位于鄂尔多斯盆地西南部,区域构造位于伊陕斜坡和天环坳陷^[9]。研究区内长7和长9烃源岩均有发育,但是对于长9油层组原油的油源尚未取得共识。一种观点认为,长9原油主要由长7向下倒灌成藏,局部地区亦有长9烃源岩贡献^[10-11];另一种观点认为,长9原油属于自生自储型^[12]。因此,有必要开展长9油层组油源分析研究。

1 样品分析实验

根据研究需要,分别采集了5口井的原油样品和11口井的泥岩样品。其中,长9油层组原油样品5个(庄75、西62、木61、镇146、镇150);长9油层组的泥岩样品6个(庄81、镇85、西21、庄85、西93、里94);长7油层组的泥岩样品5个(白241、山145、西252、西77、固8)(图1)。原油经沉淀沥青质后,用氧化铝/硅胶柱色谱进行了分离。饱和烃和芳烃馏分分

①国家自然科学基金项目(批准号:41472121,41272125)与甘肃省重点实验室专项(编号:1309RTSA041)联合资助

收稿日期:2014-07-23;收修改稿日期:2014-11-20

别用正己烷和苯冲洗,非烃馏分用乙醇冲洗。泥岩样品粉碎至100目,用索氏抽提法进行抽提。氯仿沥青“A”中的沥青质用正己烷沉淀后,分离出饱和烃。饱和烃馏分用色谱—质谱联用仪(GC-MS)进行分析鉴定。MS为5973 N,离子源温度为250℃,电离电压为70 eV。GC为6890 N,色谱柱为HP-5MS(30 m×0.32 mm),固定相涂层厚度0.25 μm,载气为氦气,起始温度80℃,以4℃/min升温至300℃,然后恒温30 min^[11]。

2 结果与讨论

2.1 原油地球化学特征

2.1.1 原油母质特征

长9油层组原油正构烷烃的碳数范围为 nC_{12} ~

nC_{36} ,峰型相似,均为双峰型(图2)。一般认为,碳数小于 C_{21} 的正构烷烃主要来自水生生物,大于 C_{21} 的高碳数正构烷烃来自陆生高等植物,长9原油 $\Sigma C_{21-}/\Sigma C_{21+}$ 比值多数分布在0.88~5.32(表1),低碳数优势明显。 Pr/nC_{17} 、 Ph/nC_{18} 值与原油母质类型关系密切,可以对其进行较好的指示^[2,4],陇东地区长9原油 Pr/nC_{17} 、 Ph/nC_{18} 值分布较集中(图3),说明长9原油来自相似的母源。

原油中的不同类型的规则甾烷反映不同来源的母质。陇东地区长9原油 C_{27} 、 C_{28} 和 C_{29} 规则甾烷分别分布在33.3%~37.7%、25.7%~28.3%和35.4%~39.1%(表2),样品点在规则甾烷三角图中分布于混合型母质区域内(图4)且原油已经成熟,反映长9原油成烃母质主要来自水生生物和高等植物。三环二

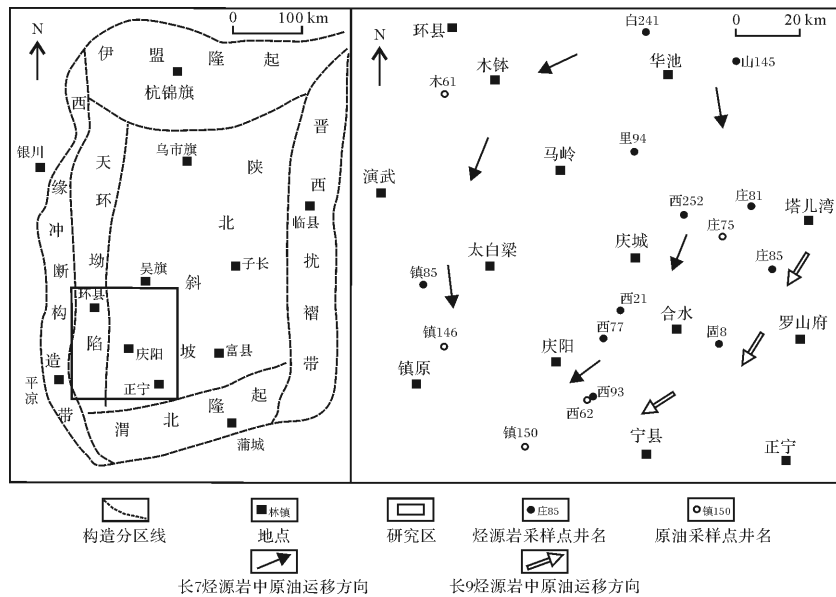


图1 陇东地区位置及采集样品井位示意图

Fig.1 Location of the eastern Gansu and the sampling well

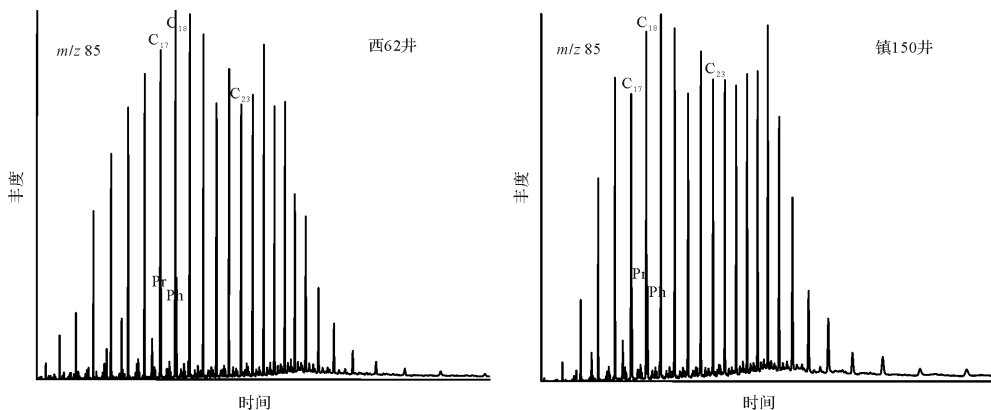


图2 陇东地区原油样品 m/z 85质量色谱图

Fig.2 Representative mass chromatograms of m/z 85 for the crude oils from the eastern Gansu

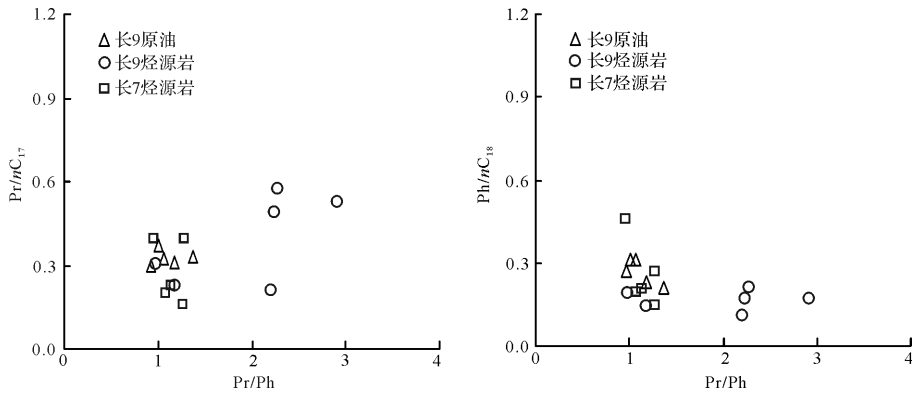


图3 陇东地区原油和烃源岩 Pr/nC₁₇与 Pr/Ph 值相关图以及 Ph/nC₁₈与 Pr/Ph 值相关图

Fig.3 Cross plots of Pr/nC₁₇ vs. Pr/Ph ratios and Ph/nC₁₈ vs. Pr/Ph ratios in the studied crude oils and source rocks from the eastern Gansu

表1 陇东地区原油和烃源岩正构烷烃及
类异戊二烯烷烃分析数据

Table 1 Analytical data of n-alkanes and isoprenoid alkanes in crude oils and source rocks from the eastern Gansu

样品	井号	层位	OEP	$\Sigma C_{21-}/\Sigma C_{21+}$	Pr/Ph	Pr/nC ₁₇	Ph/nC ₁₈
原油	庄75	长9	1.01	1.10	1.01	0.37	0.31
	西62	长9	1.23	2.87	1.18	0.31	0.23
	木61	长9	1.00	5.32	0.84	0.12	0.19
	镇146	长9	1.02	1.49	1.06	0.32	0.31
	镇150	长9	0.98	0.88	0.97	0.30	0.27
	烃源岩	白241	长7	0.99	1.46	1.07	0.20
山145		长7	1.02	1.23	0.95	0.40	0.46
西252		长7	1.02	0.98	1.27	0.40	0.27
西77		长7	1.07	2.72	1.07	0.20	0.20
固8		长7	1.06	1.70	1.13	0.23	0.21
庄81		长9	1.07	1.73	0.98	0.31	0.19
镇85		长9	1.07	3.22	2.27	0.57	0.21
西21		长9	1.03	1.36	2.24	0.49	0.17
庄85		长9	0.98	1.32	1.18	0.22	0.14
西93		长9	1.05	1.38	2.91	0.53	0.17
里94		长9	0.99	1.27	2.20	0.21	0.11

中有高等植物输入。综合这些母质类型判别指标,指示长9原油母质主要由高等植物和水生生物构成。

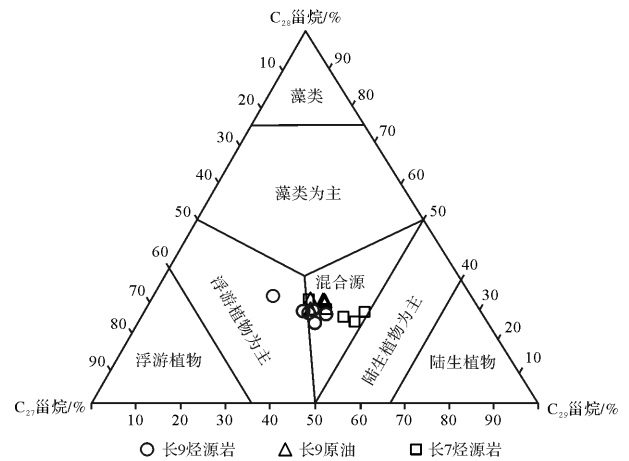


图4 陇东地区原油和烃源岩中不同碳数规则
甾烷分布三角图

Fig.4 Ternary diagram of C₂₇, C₂₈ and C₂₉ sterane compositions in crude oils and source rocks from the eastern Gansu

萜烷在石油和沉积岩中具有较广泛的分布, C₁₉+C₂₀三环萜烷来源于陆相植物, C₂₃三环萜烷来源水生生物, 因此 C₁₉+C₂₀三环萜烷/C₂₃三环萜烷可用来反映原油母质输入情况。长9原油 C₁₉+C₂₀三环萜烷/C₂₃三环萜烷比值介于 0.46~1.03, 说明原油母质中水生生物贡献较大; C₂₃三环萜烷/(C₂₃三环萜烷+C₃₀藿烷)也用来判识原油母质, 它分布在 0.08~0.33, 指示母源中有较多水生生物输入(表3)。陇东地区长9原油中检测到了4-甲基甾烷, 并且Σ规则甾烷/Σ藿烷比值(0.17~0.80)较低(表3), 指示藻类和细菌对原油的形成也有贡献; 同时长9原油还检测到了基峰是 191、分子量分别为 398 和 412 的降羽扇烷和羽扇烷(图5中分别用 Nor-L 和 L 表示), 说明长9原油

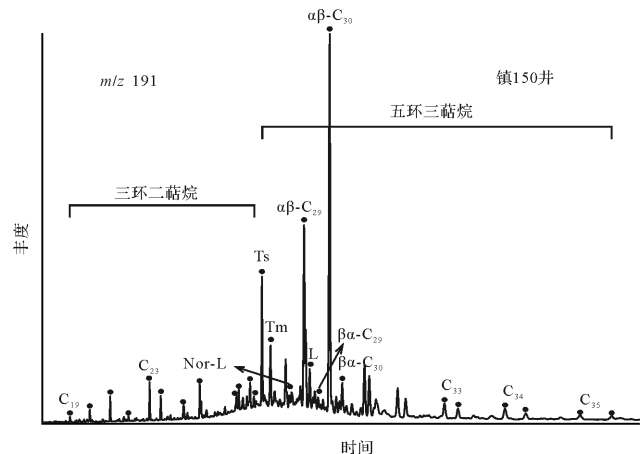


图5 陇东地区原油样品 m/z 191 质量色谱图

Fig.5 Representative mass chromatograms of m/z 191 for the crude oils from the eastern Gansu

表2 陇东地区原油与烃源岩样品甾烷类化合物分析数据

Table 2 Analytical data of steranes in the studied crude oils and source rocks from the eastern Gansu

样品	井名	层位	规则甾烷相对含量/%			I	II	III	IV	V
			C ₂₇	C ₂₈	C ₂₉					
原油	庄75	长9	36.3	28.3	35.4	0.07	0.53	0.60	0.08	0.62
	西62	长9	37.7	25.7	36.6	0.15	0.59	0.58	0.03	0.63
	木61	长9	33.5	28.1	38.5	0.23	0.57	0.53	0.10	0.62
	镇146	长9	33.4	27.5	39.1	0.19	0.59	0.54	0.08	0.60
	镇150	长9	36.3	28.3	35.4	0.22	0.59	0.54	0.10	0.54
烃源岩	白241	长7	36.9	28.3	34.8	0.02	0.48	0.51	0.15	0.71
	山145	长7	38.4	23.7	37.8	0.36	0.52	0.62	0.13	0.63
	西252	长7	28.5	25.0	46.5	0.17	0.50	0.45	0.06	0.78
	西77	长7	30.7	23.2	46.1	0.22	0.54	0.53	0.16	0.50
	固8	长7	26.9	24.9	48.2	0.26	0.55	0.56	0.16	0.60
	庄81	长9	43.1	25.9	30.9	0.06	0.41	0.40	0.05	0.65
	镇85	长9	34.9	24.3	40.7	0.27	0.62	0.50	0.14	0.56
	西21	长9	39.8	25.2	35.0	0.46	0.49	0.46	0.19	0.45
	庄85	长9	37.9	25.1	37.0	0.21	0.48	0.43	0.09	0.41
	西93	长9	38.9	21.8	39.3	0.66	0.49	0.50	0.22	0.43
	里94	长9	38.7	24.7	36.6	0.41	0.44	0.42	0.13	0.55

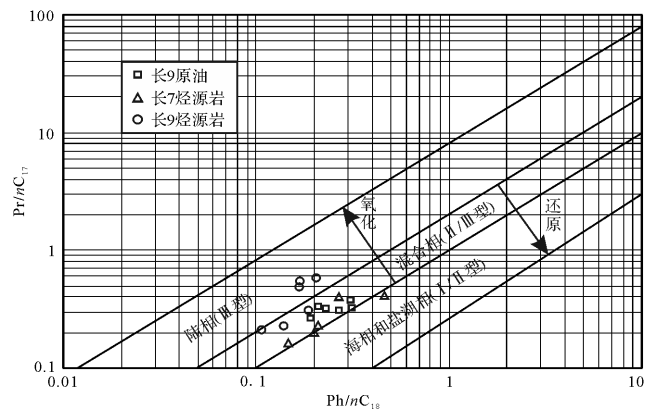
注: I.重排甾烷/规则甾烷; II. C₂₉甾烷 20S/(20S+20R); III. C₂₉甾烷 $\beta\beta/(\beta\beta+\alpha\alpha)$; IV. 4-甲基甾烷/规则甾烷; V. Dia-C₂₉ 20S/(20S+20R)

2.1.2 原油母质形成环境

姥鲨烷(Pr)指示烃源岩形成于氧化环境,植烷(Ph)指示烃源岩形成于还原环境^[3]。因此,姥植比(Pr/Ph)是判识成烃有机质古环境氧化还原程度的重要参数。陇东地区长9原油 Pr/Ph 分布在 0.84~1.22 之间(表1),姥鲨烷和植烷的分布差异较小,根据 ten Haven 等^[13]提出的水介质氧化还原程度指标,指示长9原油形成于弱还原—弱氧化环境。Pr/nC₁₇与 Ph/nC₁₈ 交会图也反映出长9原油形成于氧化环境和还原环境的过渡带(图6)。长9原油中 β -胡萝卜素含量较低,不属于典型的含高 β -胡萝卜素强还原环境^[4],因此长9原油形成于弱还原—弱氧化环境。研究表明,原油低丰度的伽马蜡烷、升霍烷含量降低的特征反映低盐度沉积环境^[14-15]。陇东地区长9原油中伽马蜡烷/ $\alpha\beta$ -C₃₀藿烷分布在 0.02~0.06,表现出典型的淡水环境特征;升霍烷含量 C₃₃>C₃₄>C₃₅,未出现高盐度环境下升霍烷依次升高的现象(图5)。根据水介质氧化还原判别指标以及地质分析结果,认为陇东地区长9原油形成于弱氧化—弱还原的淡水湖泊环境中。

2.1.3 原油的成熟度

生物标志化合物参数可以用来判断原油的热演化阶段,研究原油的成熟度。OEP 值是反映原油成熟度的指标之一,陇东地区长9原油 OEP 值为 0.98~1.23 之间(表1),表明原油已经成熟。C₂₉三环萜

图6 陇东地区原油和烃源岩 Pr/nC₁₇与Ph/nC₁₈ 比值相关图Fig.6 Cross plots of Pr/nC₁₇ vs Ph/nC₁₈ ratios in the studied crude oils and source rocks from the eastern Gansu

烷/(C₂₉三环萜+C₃₀藿烷)可用来研究原油的成熟度^[16],陇东地区长9原油分布在 0.08~0.34(表3),类似于塔里木陆相成熟原油(0.03~0.71)^[17]。研究认为,有机质演化过程中,藿烷类化合物逐渐从生物构型的 $\beta\beta$ -C₃₀藿烷向地质构型 $\alpha\beta$ -C₃₀藿烷转化,22R构型向22S构型转化^[18],因此 $\beta\alpha$ -C₃₀莫烷/ $\alpha\beta$ -C₃₀藿烷和 C₃₁藿烷 22S/(22S+22R)可作为判别原油成熟度的指标。陇东地区长9原油 $\alpha\beta$ -C₃₀藿烷含量明显高于其他萜类化合物(图5), $\beta\alpha$ -C₃₀莫烷/ $\alpha\beta$ -C₃₀藿烷分布在 0.07~0.09; C₃₁藿烷 22S/(22S+22R)分布

在0.46~0.59(表3),均反映了成熟原油的特征。甾族化合物在演化过程中,手性碳原子发生构型的转变,由R生物构型转化为S的地质构型;规则甾烷14,17(H)发生由 $\alpha\alpha$ 位转变为 $\beta\beta$ 位^[18],因此可通过甾族化合物不同构型之间的相对含量来研究原油的成熟度。陇东地区长9原油成熟度指标 C_{29} 甾烷 $20S/(20S+20R)$ 和 C_{29} 甾烷 $\beta\beta/(\alpha\alpha+\beta\beta)$ 比值分布在0.53~0.59和0.54~0.60(图7),两个比值分布都超过0.4,根据原油成熟度判别标准^[19],长9原油均已达到成熟阶段。重排甾烷的热稳定性比规则甾烷好,它与规则甾烷的比值可作为成熟度参数^[20],长9原油重排甾烷/规则甾烷分布在0.07~0.34(表2),与柴达木盆地北部成熟原油(0.28~0.39)相似^[14]。综合正构烷烃、三环萜烷和甾烷成熟度参数分析结果,判断长9原油属于成熟原油。

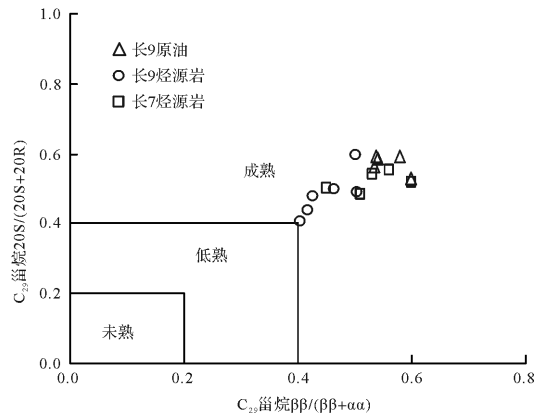


图7 陇东地区原油和烃源岩 C_{29} 甾烷 $20S/(20S+20R)$ 与 C_{29} 甾烷 $\beta\beta/(\alpha\alpha+\beta\beta)$ 比值相关图

Fig.7 Cross plot of C_{29} sterane $20S/(20S+20R)$ vs. $\beta\beta/(\alpha\alpha+\beta\beta)$ ratios in the studied crude oils and source rocks from the eastern Gansu

表3 陇东地区原油和烃源岩中萜类化合物分析数据

Table 3 Analytical data of terpanes in the studied crude oils and source rocks from the eastern Gansu

样品	井名	层位	A	B	C	D	E	F	G	H	I
原油	庄75	长9	1.03	24.00	1.23	0.02	0.54	0.33	0.32	0.80	0.09
	西62	长9	0.47	20.81	1.03	0.03	0.56	0.09	0.08	0.30	0.07
	木61	长9	0.62	21.67	3.36	0.04	0.56	0.22	0.20	0.18	0.07
	镇146	长9	0.45	21.99	2.08	0.02	0.55	0.12	0.08	0.18	0.08
	镇150	长9	0.46	20.50	2.02	0.02	0.56	0.08	0.09	0.31	0.07
烃源岩	白241	长7	1.00	20.00	3.74	0.07	0.58	0.34	0.22	0.38	0.21
	山145	长7	0.72	24.00	7.15	0.12	0.53	0.06	0.20	0.89	0.11
	西252	长7	0.95	26.00	1.71	0.08	0.57	0.12	0.19	0.22	0.08
	西77	长7	1.51	18.40	1.30	0.03	0.57	0.05	0.05	0.18	0.07
	固8	长7	0.78	27.20	0.98	0.04	0.56	0.08	0.06	0.09	0.11
	庄81	长9	0.56	30.21	0.75	0.01	0.57	0.10	0.10	0.07	0.11
	镇85	长9	2.84	31.19	4.80	0.01	0.58	0.08	0.06	0.47	0.15
	西21	长9	1.56	26.47	2.02	0.08	0.58	0.41	0.40	0.15	0.14
	庄85	长9	1.34	26.15	1.02	0.07	0.59	0.26	0.09	0.01	0.10
	西93	长9	1.35	31.45	1.50	0.05	0.59	0.12	0.09	0.21	0.13
	里94	长9	0.88	27.34	1.09	0.13	0.58	0.46	0.33	0.80	0.09

注:A. $(C_{19}+C_{20})/C_{23}$ 三环萜; B. $C_{30}+$ (%); C. Ts/Tm; D. 伽马蜡烷/ $\alpha\beta-C_{30}$ 藿烷; E. $C_{31}22S/(22S+22R)$; F. C_{23} 三环萜烷/ $(C_{23}$ 三环萜烷+ C_{30} 藿烷); G. C_{29} 三环萜烷/ $(C_{29}$ 三环萜烷+ C_{30} 藿烷); H. 规则甾烷/藿烷; I. $\beta\alpha-C_{30}$ 莫烷/ $\alpha\beta-C_{30}$ 藿烷; J. 三环萜烷/ Σ 藿烷。

2.2 油源对比

为了厘定陇东地区长9油层组原油的来源,对长7烃源岩和长9烃源岩地球化学特征做了进一步分析。正构烷烃的Pr/Ph、Pr/nC₁₇、Ph/nC₁₈和规则甾烷中C₂₇、C₂₈和C₂₉相对含量包含丰富的母质类型及形成环境方面的信息,是重要的油源对比指标。研究结果显示,长9原油与长7烃源岩及部分长9烃源岩数据点分布在相对集中的范围内(图3,4,6),表明长9原油与长7烃源岩及部分长9烃源岩在母质类型和

形成环境方面相似,具有一定的对比性。前人研究表明,长7沉积期,烃源岩厚度大^[6],分布范围广,有机碳含量高^[21],Ro值在0.70%~0.95%^[22];陇东塔儿湾—固城地区长9烃源岩沉积厚度大于40m,有机碳含量大于1.0%,Ro分布在0.79%~1.22%,这些数据说明陇东地区长7烃源岩和长9烃源岩都具有较强的生烃潜力,为陇东地区长9油层组原油成藏提供了重要的物质基础。

然而,生物标志化合物参数交汇图上长9原油与

两类烃源岩“相对集中”的描述仍然属于定性范畴,只能从生烃潜力方面推断两种烃源岩均可能对长9油层组原油成藏有贡献,却无法明确两种烃源岩是否对长9油层组原油成藏有贡献。这是因为,长9期对长7期的继承性沉积导致两期烃源岩在部分区域地球化学特征相似^[23]。此外,同一沉积期的长7烃源岩或长9烃源岩沉积亚环境变化引起烃源岩内部地球化学特征的差异,更增加了油源分析的难度。因此,长9油层组油源分析的关键是计算长7烃源岩和长9烃源岩样品与长9原油样品的相关性。烃源岩样品与原油样品的相关性越强,则表示原油最可能来自哪种烃源岩。

为了进行更加精细的油源对比研究,需要使用更灵敏的参数和更准确的计算方法进行分析。研究表明,Pr/Ph值和C₂₉甾烷含量能够代表沉积环境和母源性质,是可靠的油源对比指标^[23]。同时,利用聚类分析理论中的欧氏距离和树状图等方式可以清晰地表示样品间的相关性和属性关系。聚类分析的基本思想是,将统计量的度量值按相似程度逐一归类,根据整个分类系统画出亲疏关系谱系图^[24]。通过聚类分析理论中的系统聚类法对陇东地区长9原油、长7烃源岩和长9烃源岩样品参数进行了计算和分析并且得出以下结论:

(1) 依据样品间的亲缘关系,将原油和烃源岩样品划分为2个主类,其中II主类可划分为2个亚类,II₂亚类可进一步划分为3个基本类(表4、图8)。I主类样品(西93、镇85、西21、里94)均来自长9烃源岩,平面上分布在庆城—太白梁—镇原一带,Pr/Ph分布在2.20~2.91,C₂₉甾烷含量分布在35.0%~40.7%;II主类中的II₁亚类样品(固8、西77、西252)均来自长7烃源岩,平面上分布在庆城—合水一带,Pr/Ph分布在1.07~1.27,C₂₉分布在46.1%~48.2%;II₂亚类有3个基本类,样品包含长9油层组的原油(庄75、西62、木61、镇146、镇150)、长7烃源岩(山145、白241)以及长9烃源岩(庄85、庄81),其均匀分布在研究区内,Pr/Ph分布在0.84~1.18,C₂₉甾烷含量分布在30.9%~39.1%。将这些数据对比研究发现,I主类的长9烃源岩与II₁亚类的长7烃源岩相比,Pr/Ph比值相对较小,C₂₉甾烷含量相对较大,两者地球化学特征差异明显;而同属于III₁基本类的长7烃源岩与长9烃源岩性质相似。这进一步证明,陇东地区的长7烃源岩与长9烃源岩地球化学特征既具有差异性又具有相似性。

(2) 由表4和图8可知,III₁基本类中的长9油层组镇146井、镇150井、西62井原油与长7油层组山145井和长9油层组庄85井的烃源岩亲缘关系较近,它们的Pr/Ph分布在0.95~1.18,C₂₉甾烷含量分布在37.0%~39.1%,表明长9油层组镇146井、镇150井、西62井原油来自长7油层组和长9油层组的烃源岩。进一步计算发现,长7油层组山145井烃源岩与长9油层组镇146井、镇150井的原油亲缘关系较好(平方欧氏距离分别为0.004和0.006),长9油层组庄85井的烃源岩与长9油层组西62井的原油亲缘关系较好(平方欧氏距离为0.010)(表5),说明长9油层组镇146井、镇150井的原油可能主要来自长7烃源岩,长9油层组西62井的原油可能主要来自长9烃源岩。III₂基本类中的长9油层组庄75井和木61井原油与长7油层组白241井烃源岩亲缘关系较近,它们的Pr/Ph分布在0.84~1.07,C₂₉甾烷含量分布在34.8%~36.6%,指示长9油层组庄75井和木61井原油来源于长7油层烃源岩。III₃基本类中的长9油层组庄81井烃源岩与III₁和III₂两个基本类同属于II₂亚类,与长9原油也有较近的亲缘关系,对长9成藏也有贡献。由于II₁亚类中的长7烃源岩样品(固8、西77、西252)与长9原油所属的II₂亚类聚类而不是直接与长9原油聚类,指示其与长9原油亲缘关系较远;I主类中的长9烃源岩样品则与II主类聚类,与长9原油的亲缘关系更远。结合样品点在研究区平面上的分布(图1),认为镇原—庆阳—宁县一带的长9原油主要来自华池一带的长7烃源岩和塔尔湾—罗山府一带的长9烃源岩,环县—木钵一带和塔尔湾—合水一带的长9原油主要来自华池一带的长7烃源岩;庆城—合水一带的长7烃源岩对长9原油贡献较小,庆城—太白梁—镇原一带的长9烃源岩对长9原油基本上没有贡献。这些分析结果表明,同期沉积的长7烃源岩和长9烃源岩在不同区域对长9原油贡献不同。进一步研究发现,与长9原油亲缘关系较远的长7烃源岩样品(固8、西77、西252)Pr/Ph分布在1.07~1.27,C₂₉甾烷含量分布在46.1%~48.2%,与长9原油亲缘关系较近的长7烃源岩样品(山145、白241)Pr/Ph分布在0.95~1.07,C₂₉甾烷含量分布在34.8%~37.8%;与长9原油亲缘关系较远的长9烃源岩样品(西93、镇85、西21、里94)Pr/Ph分布在2.20~2.91,C₂₉甾烷含量分布在35.0%~40.7%,与长9原油亲缘关系较近的长9烃源岩样品(庄81、庄85)Pr/Ph分布在0.98~1.18,C₂₉甾烷含量

表4 陇东地区原油和烃源岩生物标志化合物分布

Table 4 Distribution of biomarker in the studied crude oils and source rocks from the eastern Gansu

主类	亚类	基本类	井名	类型	层位	Pr/Ph	C ₂₉ 甾烷/%
I			西 93、镇 85、西 21、里 94	烃源岩	长 9	2.20~2.91	35.0~40.7
II	II ₁		固 8、西 77、西 252	烃源岩	长 7	1.07~1.27	46.1~48.2
		II ₂	III ₁	镇 146、镇 150、西 62	原油	长 9	0.95~1.18
		III ₂	山 145、庄 85	烃源岩	长 7、长 9		
			庄 75、木 61	原油	长 9	0.84~1.07	34.8~36.6
			白 241	烃源岩	长 7		
			III ₃	庄 81	烃源岩	长 9	0.98

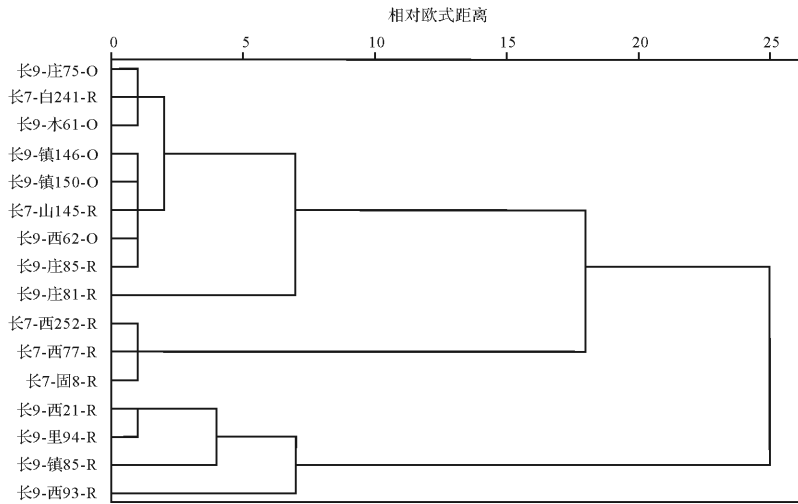


图8 陇东地区原油和烃源岩生物标志化合物参数聚类分析

注:R.烃源岩;O.原油;长9-庄75-O.长9油层组庄75井原油

Fig.8 Cluster analysis of biomarker parameters in the studied crude oils and source rocks from the eastern Gansu

分布在 30.9%~37.0%(表 1,2,4、图 8),证明了同期沉积的烃源岩内部地球化学特征的差异是导致同期沉积的长 7 烃源岩或长 9 烃源岩对长 9 原油成藏贡献不同的根本因素。

以上分析结果可以明确,陇东地区长 7 烃源岩和长 9 烃源岩对长 9 油层组原油成藏均有贡献且长 7 烃源岩对长 9 油层组成藏贡献较多,不同地区两类烃源岩对长 9 原油贡献不同。

表5 陇东地区部分样品间平方欧氏距离

Table 5 Squared Euclidean distance between the studied samples from the eastern Gansu

井名	西 62	镇 146	镇 150	山 145	庄 85
西 62	0.000				
镇 146	0.003	0.000			
镇 150	0.011	0.003	0.000		
山 145	0.015	0.004	0.006	0.000	
庄 85	0.010	0.011	0.025	0.014	0.000

注:平方欧式距离为样品各个变量值之差的平方和。它的值越大,表示亲缘关系越远。

2.3 原油运移路径

前人已经通过呋唑类化合物异构体参数研究了长 9 原油运移方向^[23]。笔者从油源对比结果出发,以源储关系为基础分析原油运移方向。从平面上看,陇东地区长 7 烃源岩生成的原油向长 9 油层组运移有两条路径:第一条为华池—木钵—太白梁—镇原,第二条是华池—合水—庆城—庆阳;长 9 烃源岩生成的原油向长 9 油层组运移有一条路径:塔尔湾—罗山府—宁县(图 1)。从剖面上看,长 7 烃源岩生成的原油通过倒灌的方式进入长 9 油层组;长 9 烃源岩生成的原油通过侧向运移的方式进入长 9 油层组(图 9)。地质研究表明,长 8、长 9 储层属于低渗—特低渗储层^[25-26],长 7 烃源岩和长 9 烃源岩物性更差(属致密级别),如果地层疏导能力太差、没有阻力更小的优势通道,那么长 7 烃源岩和长 9 烃源岩生成的原油很难突破致密储层的阻力进入储层。但是,孔隙型输导体和构造裂隙输导体可以构成石油运移的有效输导体^[23]。陇东地区西峰油田长 8 油层组部分井镜下观

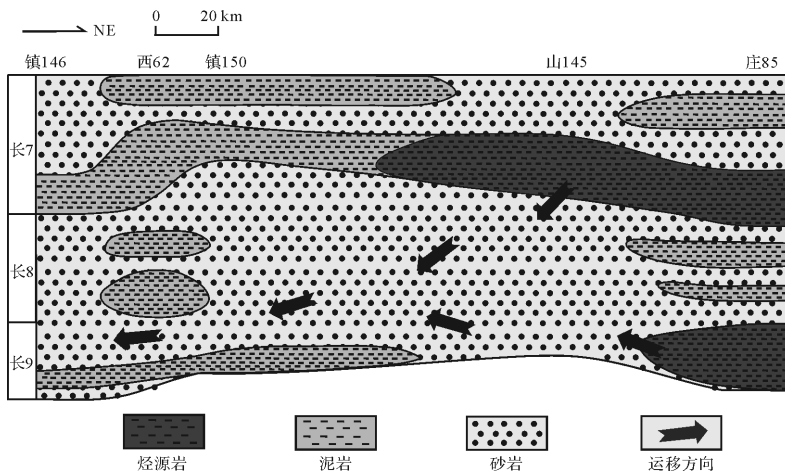


图9 陇东地区长9原油运聚模式

Fig.9 Migration mode of crude oil from Chang 9 subsection in the eastern Gansu

察到高角度缝,岩芯也不同程度发现裂缝^[27],且北东—南西方向最为发育^[28],与笔者提出的运移路径方向基本一致;长7烃源岩中也发育大量“香肠”状的显微裂缝^[29]。微量元素和稳定同位素分析表明,裂缝中充填的方解石形成时期稍早于或同步于烃类流体的大规模活动时期^[30]。这些研究结果较好地证明了所提出的运移路径具有一定的可靠性,并且与油气运移关系密切。

陇东地区紧邻具有较强生烃潜力的长7烃源岩和长9烃源岩生烃中心。长9生、排烃能力较强,平均排烃率为33.17%^[7];长7烃源岩平均排烃率更是高达72%^[31]。同时,长7烃源岩和长9烃源岩的欠压实作用产生较高的异常过剩压力也为石油运移提供了动力^[23]。较强的运移动力和良好的运移通道表明,长7烃源岩和长9烃源岩均具有向长9油层组供油、运移成藏的条件,佐证了油源分析的结果。长9沉积期,研究区主要发育三角洲前缘相,在平行三角洲前缘分流河道方向,砂体规模大、连通性较好,这些条件有利于形成大型油藏^[8]。因此,原油在较强的运移动力和良好的疏导体配合下进行运移,最终在有利的储层中聚集形成长9油藏。

3 结论

(1) 根据陇东地区长9油层组原油生物标志化合物参数,对长9原油的母质类型、形成环境和原油成熟度进行了判识。结果表明,长9原油形成于弱氧化—弱还原淡水环境中;原油母质属于水生生物和高等植物构成的混合型母质;长9原油已经达到成熟阶

段。

(2) 针对烃源岩地球化学特征相似性引起的油源对比问题,基于聚类分析理论,对陇东地区长9原油与长7烃源岩和长9烃源岩的生物标志化合物参数进行了精细对比,分析认为镇原—庆阳—宁县一带的长9原油主要来自华池一带的长7烃源岩和塔尔湾—罗山府一带的长9烃源岩;环县—木钵一带和塔尔湾—合水的长9原油主要来自华池一带的长7烃源岩;两种烃源岩对长9油层组成藏都有贡献且长7烃源岩贡献较多。

(3) 依据油源分析结果,从源储关系出发,提出陇东地区长7烃源岩和长9烃源岩生成的原油向长9油层组运移的三条路径,分别是华池—木钵—太白梁—镇原,华池—合水—庆城—庆阳,塔尔湾—罗山府—宁县。长7烃源岩和长9烃源岩较强的生排烃能力结合良好的疏导体体系及有利的砂体展布是陇东地区长9原油成藏的重要保证。

参考文献 (References)

- 1 段明辰. 我国油气能源消费特征及与国民经济增长关系研究[J]. 天然气地球科学, 2014, 25(增刊1): 156-162. [Duan Mingchen. Research on oil and gas energy consumption characteristics and the relationship between them and economic growth in China [J]. Natural Gas Geoscience, 2014, 25(Suppl.1): 156-162.]
- 2 Connan J, Cassou A M. Properties of gases and petroleum liquids derived from terrestrial kerogen at various maturation levels[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1980, 44(1): 1-23.
- 3 Li Maowen, Lin Renzi, Liao Yongsheng, et al. Organic geochemistry of oils and condensates in the Kekeya field, southwest depression of the Tarim Basin, China[J]. Organic Geochemistry, 1999, 30(1): 15-37.

- 4 段毅,吴保祥,张辉,等. 鄂尔多斯盆地西峰油田原油地球化学特征及其成因[J]. 地质学报,2006,80(2):301-310. [Duan Yi, Wu Baoxiang, Zhang Hui, et al. Geochemistry and genesis of crude oils of the Xifeng oilfield in the Ordos Basin[J]. Acta Geologica Sinica, 2006, 80(2): 301-310.]
- 5 苏复义,周文,金文辉,等. 鄂尔多斯盆地中生界成藏组合划分与分布评价[J]. 石油与天然气地质,2012,33(4):582-590. [Su Fuyi, Zhou Wen, Jin Wenhui, et al. Identification and distribution of the Mesozoic plays in Ordos Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2012, 33(4): 582-590.]
- 6 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-penetrating oil-gas accumulation; geology and geochemistry[J]. Geochimica, 2005, 34(2): 147-154.]
- 7 张文正,杨华,李善鹏. 鄂尔多斯盆地长₇湖相优质烃源岩成藏意义[J]. 石油勘探与开发,2008,35(5):557-562,568. [Zhang Wenzheng, Yang Hua, Li Shanpeng. Hydrocarbon accumulation significance of Chang₇ high-quality lacustrine source rocks of Yanchang Formation, Ordos Basin[J]. Petroleum Exploration and Development, 2008, 35(5): 557-562, 568.]
- 8 喻建,杨亚娟,杜金良. 鄂尔多斯盆地晚三叠世延长组湖侵期沉积特征[J]. 石油勘探与开发,2010,37(2):181-187. [Yu Jian, Yang Yajuan, Du Jinliang. Sedimentation during the transgression period in Late Triassic Yanchang Formation, Ordos Basin[J]. Petroleum Exploration and Development, 2010, 37(2): 181-187.]
- 9 赵雪娇,王震亮,范昌育,等. 鄂尔多斯盆地陇东地区长7段烃源岩排烃机制及成藏意义[J]. 油气地质与采收率,2012,19(1):35-38. [Zhao Xuejiao, Wang Zhenliang, Fan Changyu, et al. Hydrocarbon expulsion dynamic conditions and accumulation significance of petroleum of source rocks in Longdong area, Ordos Basin[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2012, 19(1): 35-38.]
- 10 白玉彬,罗静兰,刘新菊,等. 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[J]. 沉积学报,2013,31(2):374-383. [Bai Yubin, Luo Jinglan, Liu Xinju, et al. Geochemical characteristics of crude oil and oil-source correlation in Yanchang Formation (Upper Triassic) in Wubao area, Ordos Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2013, 31(2): 374-383.]
- 11 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.]
- 12 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.]
- 13 ten Haven H L, De Leeuw J W, Rullkötter J, et al. Restricted utility of the pristane/phytane ratio as a palaeoenvironmental indicator[J]. Nature, 1987, 330(6149): 641-643.
- 14 段毅,王智平,张辉,等. 柴达木盆地原油烃类地球化学特征[J]. 石油实验地质,2004,26(4):359-364. [Duan Yi, Wang Zhiping, Zhang Hui, et al. Geochemical characteristics of Hydrocarbons in crude oils from the Qaidam Basin[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2004, 26(4): 359-364.]
- 15 Philp R P, Fan P, Lewis C A, et al. Geochemical characteristics of oils from the Chaidamu, Shanganning and Jiangnan Basins, China[J]. Journal of Southeast Asian Earth Sciences, 1991, 5(1/2/3/4): 351-358.
- 16 Li Maowen, Yao Huanxin, Fowler M G, et al. Geochemical constraints on models for secondary petroleum migration along the Upper Devonian Rimbey-Meadowbrook reef trend in central Alberta, Canada[J]. Organic Geochemistry, 1998, 29(1/2/3): 163-182.
- 17 Zhang S C, Hanson A D, Moldowan J M, et al. Paleozoic oil-source rock correlations in the Tarim Basin, NW China[J]. Organic Geochemistry, 2000, 31(4): 273-286.
- 18 戴鸿鸣,王顺玉,陈义才. 油气勘探地球化学[M]. 北京:石油工业出版社,2000:160-161. [Dai Hongming, Wang Shunyu, Chen Yicai. Petroleum Exploration Geochemistry[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2000: 160-161.]
- 19 Huang Difan, Li Jinchao, Zhang Dajiang. Maturation sequence of continental crude oils in hydrocarbon basins in China and its significance[J]. Organic Geochemistry, 1990, 16(1/2/3): 521-529.
- 20 Rubinstein I, Sieskind O, Albrecht P. Rearranged sterenes in a shale: occurrence and simulated formation[J]. Journal of Chemical Society Perkin, Perkin Transactions 1, 1975(19): 1833-1836.
- 21 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.]
- 22 付金华,罗安湘,喻建,等. 西峰油田成藏地质特征及勘探方向[J]. 石油学报,2004,25(2):25-29. [Fu Jinhua, Luo Anxiang, Yu Jian, et al. Geological features of reservoir formation and exploration strategy of Xifeng oilfield[J]. Acta Petroleum Sinica, 2004, 25(2): 25-29.]
- 23 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 Wenxiu, 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.]
- 24 朱勇华,邵淑彩,孙韞玉. 应用数理统计[M]. 武汉:武汉水利电力大学出版社,2000:362-366. [Zhu Yonghua, Tai Shucai, Sun Yunyu. Application of Mathematical Statistics [M]. Wuhan: Wuhan University of Hydraulic and Electric Engineering Press, 2000: 362-366.]
- 25 付金华,郭正权,邓秀芹. 鄂尔多斯盆地西南地区上三叠统延长组

- 沉积相及石油地质意义[J]. 古地理学报, 2005, 7(1): 34-44. [Fu Jinhua, Guo Zhengquan, Deng Xiuqin. Sedimentary facies of the Yanchang Formation of Upper Triassic and petroleum geological implication in southwestern Ordos Basin[J]. Journal of Palaeogeography, 2005, 7(1): 34-44.]
- 26 王欣欣, 郑荣才, 牛小兵, 等. 鄂尔多斯盆地陇东地区长9油层组储层沉积学特征[J]. 成都理工大学学报: 自然科学版, 2012, 39(3): 277-284. [Wang Xinxin, Zheng Rongcai, Niu Xiaobing, et al. Characteristics of reservoir sedimentology of Chang 9 oil-bearing layer of Yanchang Formation in Longdong area, Ordos Basin, China[J]. Journal of Chengdu University of Technology: Science & Technology Edition, 2012, 39(3): 277-284.]
- 27 赵文智, 胡素云, 汪泽成, 等. 鄂尔多斯盆地基底断裂在上三叠统延长组石油聚集的控制作用[J]. 石油勘探与开发, 2003, 30(5): 1-5. [Zhao Wenzhi, Hu Suyun, Wang Zecheng, et al. Key role of basement fault control on oil accumulation of Yanchang Formation, Upper Triassic, Ordos Basin[J]. Petroleum Exploration and Development, 2003, 30(5): 1-5.]
- 28 杨伟伟, 柳广弟, 刘显阳, 等. 鄂尔多斯盆地陇东地区延长组低渗透砂岩油藏成藏机理与成藏模式[J]. 地学前缘, 2013, 20(2): 132-139. [Yang Weiwei, Liu Guangdi, Liu Xianyang, et al. The accumulation mechanism and accumulation models of oil in low permeability reservoir of Yanchang Formation in Longdong area, Ordos Basin [J]. Earth Science Frontiers, 2013, 20(2): 132-139.]
- 29 李荣西, 段立志, 张少妮, 等. 鄂尔多斯盆地低渗透油气藏形成研究现状与展望[J]. 地球科学与环境学报, 2011, 33(4): 364-372. [Li Rongxi, Duan Lizhi, Zhang Shaoni, et al. Review on oil/gas accumulation with low permeability in Ordos Basin[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2011, 33(4): 364-372.]
- 30 郭凯, 曾溅辉, 李元昊, 等. 陇东地区延长组构造裂缝方解石脉特征及其与烃类流体活动的关系[J]. 中国石油大学学报: 自然科学版, 2013, 37(2): 36-42, 49. [Guo Kai, Zeng Jianhui, Li Yuanhao, et al. Geochemical characteristics of tectonic fracture-filling calcite in Yanchang Formation of Longdong area and its relationship with hydrocarbon fluid flow[J]. Journal of China University of Petroleum, 2013, 37(2): 36-42, 49.]
- 31 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-Hydrocarbon generation and expulsion mechanism[J]. Petroleum Exploration and Development, 2006, 33(3): 289-293.]

Oil-source Analysis for Chang-9 Subsection (Upper Triassic) of Eastern Gansu Province in Ordos Basin

ZHAO Yang^{1,2} YAO JingLi³ DUAN Yi^{1,2} WU YingZhong^{1,2}
CAO XiXi^{1,2} XU Li⁴ CHEN ShanShan⁵

(1. Key Laboratory of Petroleum Resources Research of Gansu Province/ Key Laboratory of Petroleum Resources Research, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049;

3. Exploration and Development Institute of Changqing Oilfield Company, CNPC, Xian 710018;

4. Northwest Branch, Research Institute of Petroleum Exploration and Development, PetroChina, Lanzhou 730020;

5. The Second Oil Production Plant of SINOPEC North China Company, Yanchi, Ningxia 751500)

Abstract: The problem of oil-source for Chang-9 subsection of eastern Gansu province in Ordos Basin is one of factors which restrict the process of exploration in the area. In order to solve it, the genesis of the crude oil from the Chang-9 is firstly studied by geochemical testing data of the crude oil. The similar geochemical characteristic of Chang-7 source rock and Chang-9 source rock results lead to that it is hard to evaluate the contribution of the two kinds of source rock to the Chang-9 reservoir. So the correlation coefficients and the category relations between the crude oil and the two kinds of source rock are calculated and analyzed by some sensitive biomarker parameters on the basis of Cluster Analysis Theory, at the same time the migration pathways of the crude oil are put forward in combination with geology datas. This study shows that the crude oil is mature and formed under weak oxidation-weak deoxidation environment of freshwater lakes, of which matrixes are mainly from aquatic organisms and higher plant. Furthermore, the crude oil is mostly derived from Chang-7 source rock and from the Chang-9 source rock partially. The crude oil migrates along with directon of NE-SW. It is the great ability of hydrocarbon-generation and hydrocarbon-expulsion, good migration pathway and available sandstones distribution that play a critical role in forming Chang-9 reservoir.

Key words: Ordos Basin; crude oil; oil-source analysis; cluster analysis; migration pathway