

文章编号: 1000-0550(2004)增刊-0050-06

东濮凹陷白庙地区天然气及凝析油地球化学特征及成因

罗小平^{1,2} 沈忠民¹ 彭渤莹² 王又杰² 林壬子³

1(成都理工大学“油气藏地质及开发工程”国家重点实验室 成都 610059)

2(中原油田分公司勘探开发科学研究院 河南濮阳 457001)

3(石油大学地球科学系 北京昌平 102200)

摘要 白庙构造是东濮凹陷南部地区的一个含凝析油的富气构造。在研究油藏基本地质特征的基础上,应用多种地球化学手段研究了气藏中天然气组分、甲烷同位素及惰性气体同位素变化规律、凝析油族组成、饱和烃色谱、色质生物标志物特征,进行了油气源分析,探讨了气藏的形成时间与次序,白庙气藏具有多源、多期、复合成藏的特点。

关键词 天然气 凝析油 地球化学特征 东濮凹陷

第一作者简介 罗小平 男 1965年生 博士研究生 高级工程师 石油地质及地球化学

中图分类号 P593 文献标识码 A

东濮凹陷是渤海湾盆地临清坳陷最西端的一个凹陷,面积约 300 km²,具有两洼一隆一斜坡的构造格局,分别为东部洼陷带与西部洼陷带,中央隆起带、与西部斜坡带^[1]。纵向上有石炭一二叠系与下第三系两套烃源岩,石炭一二叠系是以煤系地层为主的海陆交互沉积,煤系地层主要为二次生烃的气源岩,下第三系为湖相沉积,凹陷南北为沉积环境差异明显的两种沉积体系,北部地区为盐湖相沉积、南部为淡水—微咸水沉积。油气藏主要分布在中央隆起带与西部斜坡带,北部油气十分富集,南部油气资源丰度较低。

白庙构造位于东濮凹陷南北过渡带,构造面积约 120 km²,它依附于南聊断层向西倾斜的一个被断层复杂化的半背斜构造,南北紧临东濮凹陷两大主力生油洼陷葛岗集洼陷和前梨园洼陷,既可以接受北部前梨园洼陷盐湖相泥岩生成的油气也可以接受南部葛岗集的淡水湖相泥岩生成的油气,同时石炭一二叠系的煤系地层的二次生烃也是十分重要的气源岩(图1)。

1 天然气藏基本地质特征

1.1 天然气的分布特征

白庙构造主要为含气构造,天然气中含有凝析油,在构造高部位浅层富集纯气藏,构造腰部为油气共同产出处,构造翼部深层杜寨断层的下降盘为含气的油环还。纵向上具有 E₂^F、E₃¹、E₃²、E₃³⁺⁴ 四套含气层系,各层段含气面积上小下大,呈“宝塔”形分布。

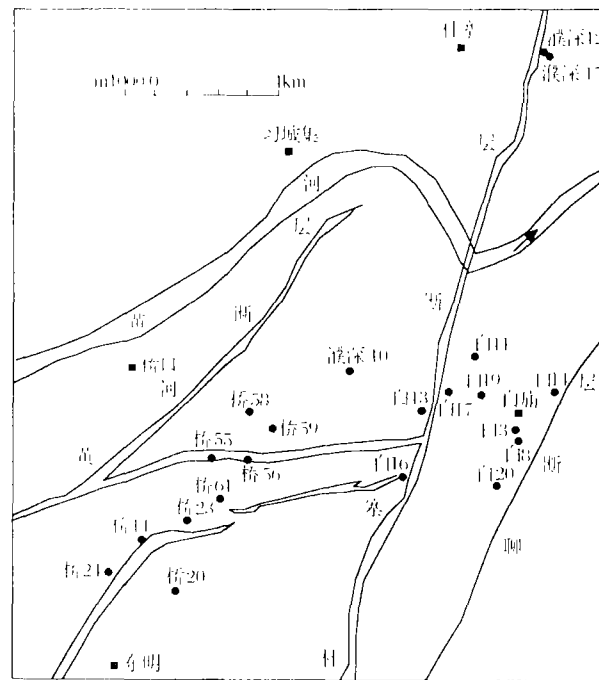


图1 白庙构造井位

Fig. 1 Location of wells in Baimiao structure

1.2 构造和圈闭特征

白庙构造是受杜寨、兰聊和白庙断裂系控制的基底隆起背景上继承性发育的半背斜,发生于沙三4亚段沉积时期,结束于东营组时期,由于南北构造活动的差异,受压扭作用形成多条北北西断裂,使白庙形成断阶式构造,形成杜寨断层下降盘断鼻构造与二台构造带,具有三鼻一垒的构造格局。

1.3 储集层特征

本区沙三4~沙三1下部为湖底扇沉积,沙三1中上部为滨湖相滩坝沉积,沙二下为冲积扇—幔湖沉积。其中湖底扇中扇辫状水道,中扇前缘和滨浅湖滩坝、洪水水道等砂体厚度较大,分选好,杂基质含量低,物性好,是主要含油砂体,它们与构造圈闭结合,控制了油气富集。储层物性在纵向上亦受控于成岩压实作

用,剖面上分布着3~4个次生空隙发育带(图2),以埋深小于3300m的沙二下和沙三1最好,属于渗透储层,发育的次生孔隙。3300m以下,随着白云石胶结物的增多,孔隙体积大量减少,3300~3700m的沙三2是过渡段,以低渗透储层为主,3700m以下,沙三3+4亚段,孔隙度小于15%,渗透率小于 $0.2 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 属致密型II类储层。

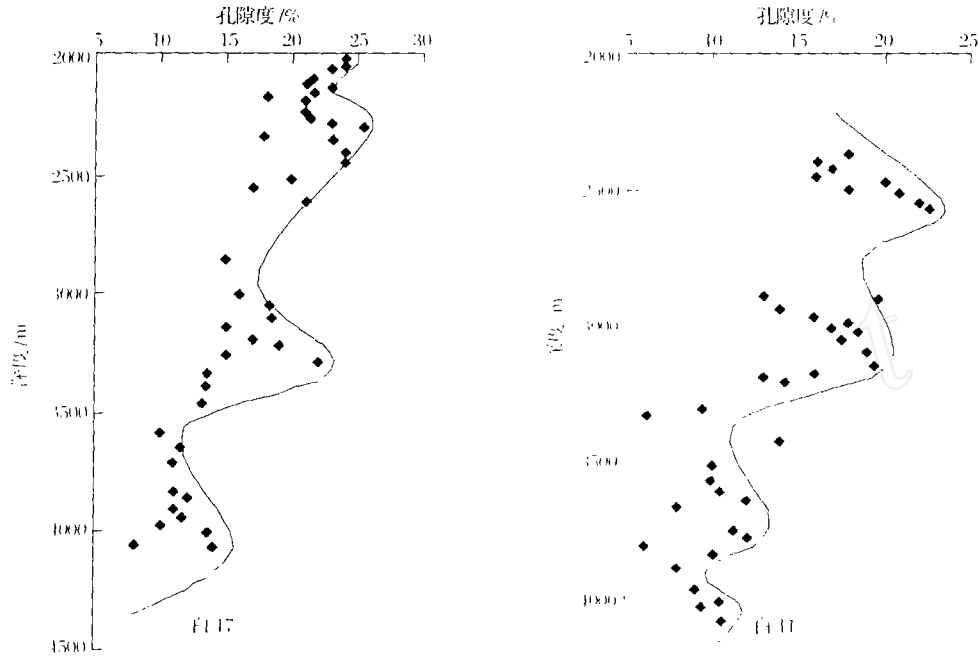


图2 次生孔隙与深度的关系

Fig. 2 Relationship between secondary porosity and depth

1.4 气藏流体特征

白庙地区油气藏以气为主,天然气中含有凝析油,凝析油一般呈桔黄色、浅黄色、乳白色,半透明状,具有密度低、粘度低、凝固点低气油比高的特点,气层中往往无底水。尤其是浅层 $E_{s2}^F \sim E_{s3}^F$ 的气层,气层的甲烷

含量高,在90%左右,凝析油密度低,气油比高。在构造南翼白16为含气油层,原油密度大于 0.80 g/cm^3 ,所含天然气甲烷含量较低,气油比低。白庙深层凝析气藏具有高压气藏的特征, $E_{s3}^F \sim E_{s2}^F$ 为常压,压力系数为1.0左右, E_{s3}^F 为过渡带,3400m以下逐渐变为高

表1 气藏流体性质

Table 1 The fluid characteristics of gas reservoir

井号	层位	井段/m	产层性质	甲烷含量/%	气相对密度	原油密度/ $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	粘度/ $\text{mPa} \cdot \text{s}^{-1}$	气油比
白8	E_{s3}^F	3 133~3 157	气层	92.10	0.620 6	0.794	1.07	
白9	E_{s3}^F	3 906.2~3 913.4	气层	85.66	0.657 4	0.792	1.63	
白11	E_{s3}^F	3 990~4 005.5	油气层	84.20	0.691 2	0.823	2.63	814
白10	E_{s3}^F	3 064~3 077.6	气层		0.604 6	0.747	0.80	86 585
白3	E_{s2}^F	2 690~2 701.2	气层	88.24	0.626 4	0.800	1.21	
白16	E_{s3}^F	3 888~3 959.2	油层	62.10	0.936 0	0.806	2.66	337
白17	E_{s3}^F	4 010~4 032	气层	87.60	0.652 6	0.791	1.17	2 300
白18	E_{s3}^F	3 557~3 645	气层	90.60	0.638 9	0.743	0.72	5 114
白19	E_{s3}^F	3 894~3 909.2	气层	90.30	0.637 1	0.805	2.35	1 245
白20	E_{s2}^F	2 705~2 706.8	气层	90.68	0.640 7	0.727	0.51	46 140
白27	E_{s3}^F	2 964~2 952	气层	89.3	0.650 2	0.736	0.73	11 284
白29	E_{s3}^F	2 086~3 108	气层	92.3	0.619 0	0.754	0.83	23 318

压层,一般压力系数为 1.5,最大达 2.0(图 3)。

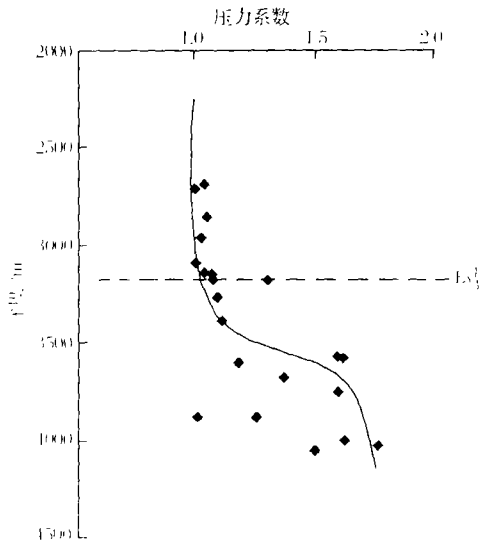


图 3 白庙构造流体压力与深度的关系

Fig 3 Relationship between fluid pressure and depth in Baimiao structure

2 油气地球化学特征及油气源分析

2.1 天然气地球化学特征

白庙地区天然气分布从 $E_{s_2}^F \sim E_{s_3}^{3+4}$ 四套地层均有分布,一般浅层天然气($E_{s_2}^F \sim E_{s_3}^1$)具有甲烷含量

高,重烃含量低, $C_1/C_1 \sim C_4$ 一般大于 0.90, $E_{s_3}^2$ 以下的地层天然气组分中甲烷含量一般小于 90%,乙烷相对含量较高, $C_1/C_1 \sim C_4$ 在 0.90 左右(表 2);天然气甲烷碳同位素一般大于 -40% ,在 $-36.1\% \sim -39.9\%$ 之间,各个重烃碳同位素分馏效应极小,尤其是 C_4 的同位素值还出现“反转”现象,从构造顶部浅层到翼部深层甲烷碳同位素有变轻的趋势,反映了从气源岩从煤型到油型的变化过程(表 3)。

惰性气体同位素 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 与 R_a/R 也明显分为高、中、低值三组,高的一组分布在兰聊断层附近 $E_{s_2}^F \sim E_{s_3}^1$ 地层所含天然气,中值组一般为构造中部 $E_{s_3}^2$ 以下地层,低值组为杜寨断层下降盘、以产油为主的油层伴生。 $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 的变化也有较大的差别,兰聊断层附近浅层 $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 气含量高,构造中部及翼部含量低(表 4),白庙地区 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 、 R_a/R 及 $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 的含量变化可能兰聊断层的性质和天然气的成因等因素的控制。

兰聊断层为东濮凹陷深大断裂,活动时间早,下切地层深,为石炭一二叠系煤成气向上运移通道,使得兰聊断层附近浅层的天然气以煤成气为主,距兰聊断层越远,天然气中煤成气的比例越少,虽然兰聊断层附近浅层主要富集煤成气,但有少量第三系天然气混入,使

表 2 天然气组分地球化学特征参数

Table 2 Typical geochemical parameters of natural gas

构造部位	井号	层位	井深/m	天然气组份				$C_1/C_1 \sim C_4$	湿度指数/%
				C_1	C_2	C_3	C_4		
顶部	白 3	$E_{s_2}^F$	2 690.4~2 701.2	88.24	6.65	1.48	0.77	0.91	9
	白 8	$E_{s_3}^1$	3 133.4~3 137.4	93.74	2.32	1.49	1.04	0.95	5
	白 20	$E_{s_2}^F$	2 705.0~2 706.8	90.68	4.11	3.32	0.5	0.92	8
中部	白 28	$E_{s_3}^2$	3 108.1~3 210.1	87.15	7.21	1.35	0.80	0.90	10
	白 52	$E_{s_3}^2$	3 137.8~3 208.0	89.02	5.96	0.95	0.52	0.92	8
	白 9	$E_{s_3}^3$	3 906.2~3 913.4	85.66	9.61	1.11	0.53	0.88	12
翼部	白 11	$E_{s_3}^4$	3 990.0~4 005.5	86.82	8.78	1.14	0.44	0.89	11
	白 13	$E_{s_3}^4$	3 779.2~3 886.8	87.40	7.67	1.15	0.62	0.90	10
	白 55	$E_{s_3}^5$	3 824.4~3 995.6	87.50	7.82	1.08	0.59	0.90	10

表 3 白庙地区天然气同位素数据(‰)

Table 3 Carbon isotopic composition of natural gas(‰)

构造部位	井号	地层	C_1	C_2	C_3	C_4
顶部	白 3	$E_{s_2}^F$	-34.10	-26.65	-24.08	
	白 8	$E_{s_3}^1$	-34.90			
白 7	$E_{s_3}^1$	-32.10				
中部	白 20	$E_{s_3}^2$	-37.90	-24.90	-25.50	-26.60
	白 28	$E_{s_3}^2$	-37.60	-25.10	-23.40	-25.20
	白 52	$E_{s_3}^2$	-38.70	-26.20	-26.00	-26.30
	白 9	$E_{s_3}^3$	-39.90	-29.70	-25.40	-27.10
	白 11	$E_{s_3}^3$	-39.20	-27.40	-27.80	-29.60
翼部	白 13	$E_{s_3}^4$	-36.10	-30.70	-29.30	-28.00
	白 55	$E_{s_3}^5$	-38.20	-27.40	-25.80	-26.60

表 4 天然气中惰性气体同位素

Table 4 Noble gas isotope of natural gas

构造部位	井号	地层	$^3\text{He}/^4\text{He}(\times 10^{-8})$	R_a/R	$^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$
顶部	白 3	$E_{s_2}^F$	110	0.78	1 396
	白 8	$E_{s_3}^1$	109	0.78	1 270
	白 20	$E_{s_2}^F$	112	0.80	1 140
中	白 28	$E_{s_3}^2$	70.1	0.5	394.4
部	白 9	$E_{s_3}^3$	70.1		562
翼部	白 11	$E_{s_3}^3$	8.65	0.06	
	白 13	$E_{s_3}^4$	8.07	0.06	

得天然气甲烷碳同位素值比标准的煤成气甲烷同位素轻。同时兰聊断层的活动也可能有少量地幔气混入,使得构造顶部浅层天然气中³He/⁴He、R_a/R 及⁴⁰Ar/³⁶Ar比构造翼部大。通过天然气地球化学特征分析认为,白庙地区天然气的来源既有煤成气也有油型气,构造顶部浅层以煤成气为主混有少量的油型气,构造中部为油型气与煤型气的混合气,构造翼部杜寨断层下降盘为油型气,离兰聊断层越远,煤成气所占比例越小^[2~5]。

2.2 伴生凝析油地球化学特征

除构造顶部兰聊断层附近的井为纯气层外,在构造中部及翼部,杜寨断层的下降盘的气层中均含有凝析油,凝析油饱和烃含量较高,达70%以上,总烃含量达95%,饱芳比值较低,含极少量的沥青质或不含沥青质。饱和烃色谱曲线主要呈“前峰形”主峰碳数较小(图4),CPI和OEP均接近于1,原油为成熟原油,∑nC₂₁/∑nC₂₂₊均大于1,白54井达6.8,说明形成原油的母质较好,Pr/nC₁₇、Ph/nC₁₈小于0.8,除白16井具有较强姥姣优势,其它井均具有弱的植烷优势(表5)。

生物标志化合物,m/z191系列中,具有较高的三环、四环萜烷,Ts>Tm,较高的C₂₉藿烷,奥利烷含量高,奥利烷指数在0.44~0.62,藿烷系列中C₃₃以后组份含量较少(图5)。γ-蜡烷指数几口井有显著的差异,白16井γ-蜡烷指数为0.18,白11、白17、白54井在0.84~1.07之间,表明白16井油源与白11、白17、白54有一定差异。C₃₁藿烷22S/22R+22S比值,白16井较高为0.51,其它三口较低为0.38~0.39,可能受γ-蜡烷含量的影响,白11、白17、白54γ-蜡烷含量高,使C₃₁藿烷22R构型化合物与γ-蜡烷没有完全分开,一部分γ-蜡烷峰面积记入C₃₁藿烷22R构型峰中(表6),因此,使得C₃₁藿烷22R构型偏大,C₃₂藿烷

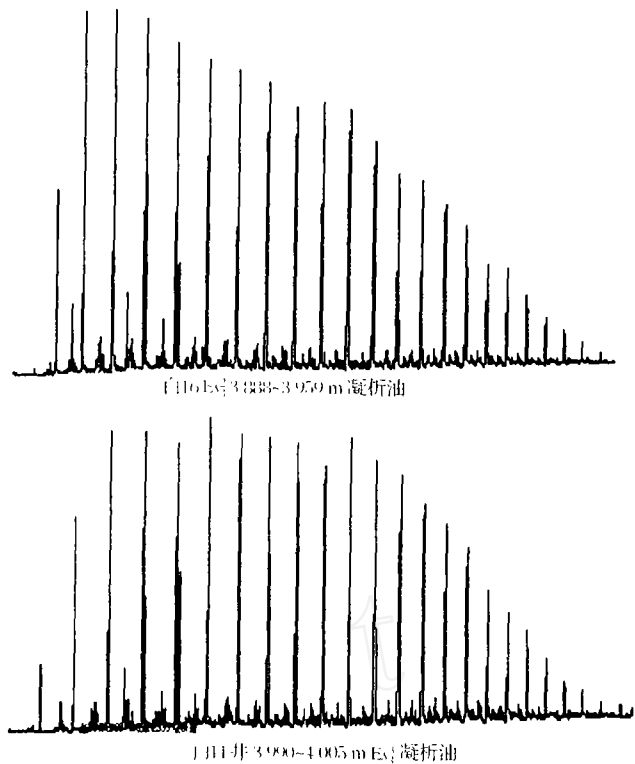


图4 白庙凝析油饱和烃色谱图

Fig. 4 The chromatograph of saturation hydrocarbon in condensate oil

22S/22R+22S 比值就较正常。而两个油砂样品均具有较低的奥利烷和γ-蜡烷,可能是因为奥利烷与γ-蜡烷易于流动在原油中的分布要远大于在岩石中的分布。甾烷系列中均具有较高的重排甾烷,重排甾烷/规则甾烷比值达0.65~0.69,C₂₉规则甾烷中异胆甾烷含量高,四个异构体呈现“凸形”分布,表明原油为成熟度较高的原油,C₂₇:C₂₈:C₂₉呈“V”字形分布^[6]。

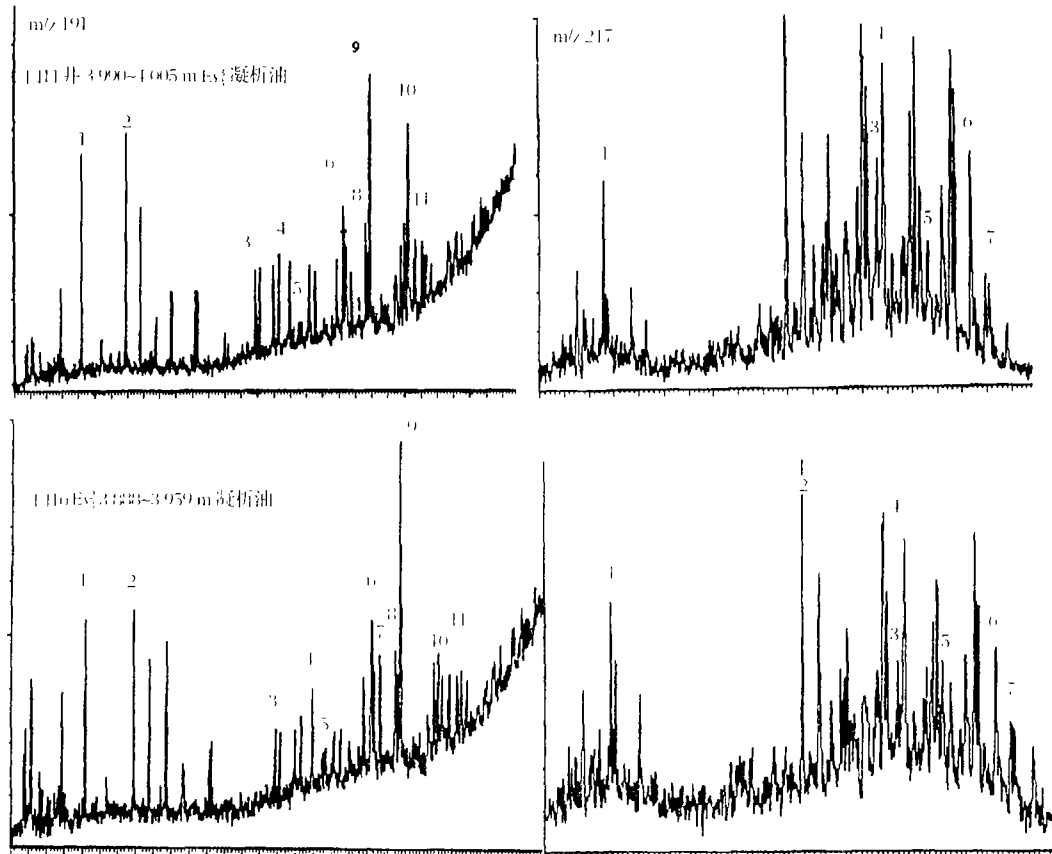
2.3 油气源分析

白庙地区紧临的两大生油洼陷,由于沉积物源和沉积环境的差异,葛岗集洼陷沉积有机质主要以Ⅱ₂~Ⅲ型有机质为主,有机质生油潜力较小为生气母质,沉

表5 凝析油油砂地球化学特征参数

Table 5 Geochemical characteristic parameter of condensate oil sands

井号	层位	井深/m	样品性质	凝析油族组份/%				饱和烃色谱			
				饱	芳	非	沥	CPI	OEP	Pr/Ph	主峰碳
白9	Es ₃	3 441	油砂	72.66	7.94	16.82	2.57	1.06	1.04	0.79	nC ₁₃
白11	Es ₃	3 990~4 005	原油	74.00	18.67	7.33	0	1.12	1.09	0.73	nC ₁₆
白12	Es ₃	3 936.6~6 164.4	原油	86.04	10.26	3.70	0	1.08	1.03	0.84	nC ₁₇
白17	Es ₃	4 010~4 032	原油	71.31	18.14	10.55	0	1.03	1.02	0.72	nC ₁₇
白18	Es ₃	3 395	油砂	38.98	5.57	45.71	9.74	1.01	0.53	0.53	nC ₁₈
白25	Es ₃	3 674.5~3 685.3	原油	75.21	15.29	7.23	2.27	1.05	1.02	0.79	nC ₁₇
白54	Es ₃	3 738	原油	95.35	4.12	0.53	0	1.10	0.86	0.93	nC ₁₄
白16	Es ₃	3 888~3 959	原油	87.23	9.31	3.46	0	1.06	1.14	1.56	nC ₁₉



m/z191:1. C₂₁三环萜;2. C₂₃三环萜;3. C₂₅三环萜 22S;4. Ts;5. Tm;6. C₂₉-降藿烷;7. C₃₀重排藿烷 8. 奥利烷;9. C₃₀-藿烷;
10. γ -蜡烷;11. C₃₂-升藿烷 22S m/z217:1. 孕甾烷;2. $\alpha\alpha$ C₂₇重排甾烷 20S;3. $\alpha\alpha$ C₂₇甾烷 20R;4. $\alpha\alpha$ C₂₉重排甾烷 20S;
5. $\alpha\alpha$ C₂₈甾烷 20R;6. $\alpha\alpha$ C₂₅甾烷 20R;7. C₃₀4-甲基甾烷

图5 白庙凝析油 m/z191、217 特征图

Fig. 5 The typical chart m/z191, 217 of condensate

表6 凝析油油砂甾萜烷地球化学特征参数

Table 6 Geochemical characteristic parameters of condensate oil in oil sands

井号	层位	井深/m	样品性质	饱和烃色-质分析参数							R _c /%
				1	2	3	4	5	6	7	
白9	E ₅ ³	3 441	油砂	0.12	0.28	0.76	0.33	0.37	0.38		0.80
白11	E ₅ ³	3 990~4 005	原油	0.51	0.80	0.39	0.66	0.55	0.56		1.20
白12	E ₅ ³	3 936.6~6 164.4	原油							1.35	1.18
白17	E ₅ ³	4 010~4 032	原油	0.46	0.82	0.59	0.69	0.54	0.50		1.20
白18	E ₅ ³	3 395	油砂	0.05	0.26	0.55	0.13	0.42	0.31		0.80
白54	E ₅ ³	3 738	原油	0.62	1.07	0.38	0.65	0.46	0.64		0.80
白16	E ₅ ³	3 888~3 959	原油	0.44	0.18	0.51	0.68	0.56	0.53	1.50	1.27

注:1. 奥利烷指数;2. γ 蜡烷指数;3. 22S/22(R+S)C₂₉藿烷;4. 重排甾烷/规则甾烷;5. C₂₆22S/22(R+S);6. $\beta\beta/\alpha\alpha+\beta\beta$ C₂₉甾烷;7. 甲基菲指数;R_c 计算的原油成熟度

积水体的咸度较小水体偏淡,无盐岩分布,产生的原油就具有较低的 γ -蜡烷值和呈较强姥烷优势,而前犁园洼陷生烃的物质基础较好,有机质含量高,类型好,主要为I~II型有机质,沉积水体为盐湖相沉积,分布着盐岩层,该套地层生成的油气具有较高的 γ -蜡烷值和弱的植烷优势。

通过天然气及凝析油地球化学特征分析,结合生

油洼陷沉积特征,白16井的原油主要来源于葛岗集洼陷源岩,而白11、白17、白54等井的凝析油则来源于前犁园洼陷的第三系高成熟生油岩;白庙地区的天然气以煤型和油型混合成因气为主,在兰聊断层互近,构造高部位浅层E₅³~E₅¹亦可能存在纯煤型气层^[7],构造中部主要为混合气,杜寨断层的下降盘的油层含气为油型气。特别是构造中部的气藏,天然气所含凝析油

的成因是下第三系泥岩,而天然气为石炭—二迭系的煤系与第三系泥岩混合生成的,具有不同的来源。

3 油气成藏史分析

白庙构造的油气藏是受构造因素,储集体的性质以及油气充注等多种因素控制。从构造顶到中部二台阶以及翼部杜寨断层下降盘油气分布呈“阶梯状”,各台阶的油气产状和成因以及形成的时间又各不相同,因此,造成了白庙地区油气分布的复杂性。天然气成因上具有多源、多阶多次充注的特点,早期形成的气藏具有煤型气的特点,由于携带了成熟度不高的第三系的原油和伴生的天然气,因此,天然气气藏地球化学特征表现为混合气型,但实际上是以煤型气为主。构造中部 $E_{s_3}^2 \sim E_{s_3}^3$ 地层主要为成熟度不高的原油,因为煤型气携带进入白庙构造,因为压力降低,重力分异与煤型气分开,加之运移距离较远,所以凝析油表现为较高的饱和烃和较轻的组份,较低的芳烃非烃含量。杜寨断层的下降盘聚集的油气为晚期生的原油,原油成熟度较高,但运移距离短,所以原油密度值较高,饱和烃含量较低。

4 结论

白庙构造油气分布十分复杂,具有分层和分带性,

浅层 $E_{s_2}^1 \sim E_{s_2}^2$ 以气为主,中部油气共产,深层以油为主;油气在构造形态分布为:构造顶部为气顶、中部油气共产,翼部杜寨断层下降盘为油层含气。天然气成熟度较高,为烃源岩晚期生成的。

原油成熟度在构造中部成熟度较低,油进入圈闭的时间较早,在构造翼部杜寨断层下降盘原油为高成熟油,油气注入时间较晚。总之,白庙构造油气藏为较典型的多源、多期、多次充注复合成藏的特征。

参考文献

- 1 田克勤,于志海,冯明,等.渤海湾盆地第三系深层油气地质与勘探.北京:石油工业出版社,2000
- 2 徐永昌,沈平.中原、华北油气区煤型气地化特征初探.沉积学报,1985,7(4):37~46
- 3 陈文义,朱家蔚,许化政.东濮凹陷不同成因类型天然气,凝析油地球化学特征及鉴别标志.《煤成气地质研究》编委主编.煤成气地质研究.北京:石油工业出版社,1987.118~130
- 4 朱家蔚,徐永昌.东濮凹陷天然气氦同位素特征及煤层气的判识.科学通报,1984,(1):75~79
- 5 朱家蔚,许化政.东濮凹陷煤层气地化指标及其与油气的对比.石油与天然气地质,1985,6(3):272~279
- 6 沈平,徐永昌,王先彬,等.气源岩和天然气地球化学特征及成气机理研究.兰州:甘肃科学技术出版社,1991
- 7 沈平,徐永昌.气态烃同位素组成特征及煤型气的判别.中国科学(B)辑,1987,(6):647~657

Geochemistry and Origin of Oil and Natural Gas in Baimiao Area of Dongpu Depression

LUO Xiao-ping^{1,2} SHENG Zhong-min¹ PENG Bo-ying² WANG You-jie² LIN Ren-zi³

¹(Department of Petroleum, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059)

²(Zhangyuan Oil Field Company, SINOPEC, Puyang Henan 457001)

³(University of Petroleum, Beijing 102200)

Abstract Baimiao structure in the south of Dongpu depression is a trap with rich natural gas and condensate. The reservoir has some characters of many source rocks and many periods of formation and interruption. Based on the study of primarily geological characters, this paper investigates the variation law of carbon isotope of methane in natural gas and density of condensate as well as the character of biomarkers in condensate, which helps discussion on origin of oil and gas and their migration direction and time to the whole reservoir, together with applying of more geochemical methods in authigenic minerals.

Key words gas, condensate oil, geochemistry characteristic, Dongpu depression