

文章编号: 1001-6112(2007)05-0516-06

成熟凝析油色—质谱分析及在石油地质中的应用

张云献^{1,2}, 沈忠民¹, 王 英², 刘海燕²

(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. 中国石油化工股份有限公司 中原油田分公司, 河南 濮阳 457001)

摘要:色—质谱分析技术已发展成为发现油气层的实用技术,在石油地质勘探领域占据着重要地位,并在勘探和寻找油气层等方面做出了重要贡献。根据渤海湾盆地东濮凹陷文 23 气田、白庙、桥口深层以及塔里木盆地中 1 井共 11 个凝析油样品轻烃组分色谱—质谱分析资料,进行了异构烷烃的定性定量研究,并应用一些新的轻烃地球化学指标,准确地判定了油气特征。结果表明:东濮凹陷文 23 气田主要为煤型凝析气藏,其凝析油为高成熟—过成熟阶段生成的煤型凝析油;白庙凝析气藏所含的凝析油主要为泥岩地层在生油高峰—高成熟阶段生成的凝析油;塔里木盆地中 1 井 2 个样品所含凝析油为高成熟—过成熟阶段海相碳酸盐岩地层生成的凝析油,与东濮凹陷文 23 气田以及白庙地区的凝析油存在显著差别。

关键词:色谱—质谱分析;成熟度;轻烃指标;凝析油;油气地球化学;东濮凹陷;渤海湾盆地;塔里木盆地

中图分类号: TE133.1

文献标识码: A

GC—MS ANALYSIS OF MATURE CONDENSATE OIL AND ITS APPLICATION IN PETROLEUM GEOLOGY

Zhang Yunxian^{1,2}, Shen Zhongmin¹, Wang Ying², Liu Haiyan²

(1. State Key Lab of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation, Chengdu University of Technology, Chengdu, Sichuan 610059, China; 2. Zhongyuan Oilfield Company, SINOPEC, Puyang, Henan 457001, China)

Abstract: GC—MS analysis has become an applied technique in seeking oil- and gas- layers. With its great contributions to oil and gas discoveries, this technique has played an important role in petroleum exploration. 11 condensate oil samples from Wen 23 gasfield, Baimiao gas pool and Qiaokou area in Puyang Sag, Bohai Bay Basin as well as Well Zhong-1 in Tarim Basin have been analyzed by GC—MS technique. The qualitative and quantitative analyses of the isomeric alkanes have been made, some new light hydrocarbon geochemical parameters have been determined, and the oil and gas signatures have been identified. The results show that Wen 23 gasfield generally belongs to coal condensate gas reservoir, and its condensate oil is generated during the high to ripen mature stages; the condensate oil in Baimiao gas pool is the product of the mudstone strata during their high mature stage; whereas the condensate oil in Well Zhong-1 in Tarim Basin is the product of the marine carbonate strata in their high to ripen mature stages, different distinctively from the condensate oil of Wen 23 gasfield and Baimiao area, Dongpu Sag.

Key words: GC—MS analysis; maturity; light hydrocarbon index; condensate oil; oil and gas geochemistry; Dongpu Sag; Bohai Bay Basin; Tarim Basin

高成熟凝析油的组分主要为 C₁₀ 之前的低分子量烃类,其生物标志化合物含量少,定量分析各生物标志物误差较大,据此得出的结论与实际地质情况大相径庭,给应用资料带来很大困惑。对于叠合型盆地或经历了多次构造运动的改造型盆地,其油气为多期充注、多期成藏,情况尤其如此。

随着色谱—质谱分析技术的发展,实现了对正构烷烃之间的异构烷烃的定性定量分析。通过异构烷烃与低分子量芳烃化合物分析,可以获得一些新的地球化学指标,如芒果(Mango)系数、庚烷值、石蜡烃指数、金刚烷指标、芳烷指数等。根据上述轻烃地球化学指标能可靠地研究油气的成熟度、母

收稿日期: 2006-05-13; 修订日期: 2007-08-01。

作者简介: 张云献(1965—),男(汉族),河南濮阳人,博士生,高级工程师,主要从事油气藏地球化学与成藏动力学研究工作。

质类型、来源、沉积环境以及油气成藏注入史等^[1,2]。因此,这些指标可为油气勘探提供重要信息,在石油地质勘探领域发挥重要作用。

1 样品与实验

本次研究分析了渤海湾盆地东濮凹陷文23气田、白庙和桥口地区凝析油样品9个,塔里木盆地中1井凝析油样品2个。

1.1 实验条件

仪器为PE公司TurboMass气相色谱—质谱联用仪,Version 4.1色谱—质谱工作站,带Nist, Wiley, Nbs等质谱谱库。色谱柱长度为100 m,膜厚0.25 μm, HP-1弹性石英毛细柱,进样量为1 μL,分流比为100:1。

程序升温:初温35℃,恒温13 min;以1.0℃/min升温至45℃,恒温15 min;以1.0℃/min升温至60℃,恒温15 min;再以1.9℃/min升温至280℃,恒温15 min。整个程序升温时间为199 min。载气流速为1.0 mL/min;进样口温度为300℃恒温。

质谱条件:离子扫描范围为 m/z 10~400,能量为70 eV,发射电流为200 μA,离子源温度为200℃,光电倍增器电压为360 V,传输线温度为300℃^[3~5]。

1.2 定性与定量

1.2.1 定性方法

地层中的凝析油是有机质在漫长的地质历史时期及较高温度下长期热演化的产物^[6]。因此,凝析油组分中80%以上为正构烷烃,10%为异构烷烃和环烷烃,大约有10%芳烃组分,不含不饱和烯烃和炔烃组分^[7,8]。异构烷烃的支链主要为甲基和乙基,有少量的正丙基和异丙基,极少量的丁基等短侧链取代基,长侧链基团较少,仅环己烷系列有较长的侧链取代基。

用色谱—质谱仪工作站软件自带的Nist, Nbs, Wiley谱库,可以对化合物进行自动检索定性,如出现多种检索结果,则可根据出峰顺序、出峰位置、可能的碳数、化合物的沸点以及该化合物在地质体中的分布特征等多种参数进行综合分析,确定一个较可靠的定性结果^[9]。

1.2.2 定量方法

因为所分析异构烷烃在凝析油中所占比例较小,而异构烷烃的数目又多,所以单一的异构烷烃分子所占比例更小,碳数的范围跨度较大。因此,只通过一次分析对所有分子进行准确绝对定量是

难以实现的,而且也没有多大的必要性。石油地球化学研究中传统的处理方法,一般采用碳数相近分子的相对比值来确定原油的地球化学参数,分子量相近的分子,面积比就代表绝对含量比,因此地球化学参数就采用峰面积来计算。

2 结果与讨论

通过东濮凹陷文23气田、白庙、桥口深层以及塔里木盆地中1井共11个凝析油样品的轻烃组分分析,检测出凝析油中丙烷至正二十一烷共150个组分(表1),其中正构烷烃组分19个,异构烷烃组分80个,环烷烃组分26个,单环—二环芳烃组分13个,未定性组分12个。未定性化合物含量极少,一般低于0.1%,不影响轻烃参数的应用。轻烃指数如甲基环己烷指数、石蜡烃指数、庚烷值、芳烷指数、芒果(Mango)系数等可用来计算凝析油的成熟度,判断其母质类型,确定油气来源。

上述轻烃指数可分别通过各自的公式进行计算。

甲基环己烷指数计算公式:

$$\text{甲基环己烷指数}(\%) = \frac{[\text{MCYC}_6 / (nC_7 + \sum \text{RCPC}_7 + \text{MCYC}_6)] \times 100}{1}$$

式中:MCYC₆为甲基环己烷;nC₇为正庚烷;∑RCPC₇为1反3-二甲基环戊烷、1顺3-二甲基环戊烷、1反2-二甲基环戊烷、1,1-二甲基环戊烷以及乙基环戊烷之和。

石蜡烃指数(PI₁)计算公式:

$$PI_1 = (2 - \text{MC}_6 + 3 - \text{MC}_6) / \text{DMCYC}_5$$

式中:2-MC₆为2-甲基己烷;3-MC₆为3-甲基己烷;DMCYC₅为二甲基环戊烷。

庚烷值计算公式:

$$\text{庚烷值}(\%) = nC_7 \times 100 /$$

$$[\sum (\text{CYC}_6 - \text{MCYC}_6)]$$

式中:nC₇为正庚烷;∑(CYC₆-MCYC₆)为环己烷与甲基环己烷之间所有流出物之和。

芳烷指数(K_{烷-芳})计算公式:

$$K_{\text{烷-芳}} = (\text{Bz} + \text{Tol}) / (\sum iC_{4-8} + \sum \text{CC}_{4-8})$$

式中:Bz为苯;Tol为甲苯;∑iC₄₋₈为C₄-C₈异构烷烃之和;∑CC₄₋₈为C₄-C₈环烷烃之和。

芒果(Mango)系数(K)计算公式:

$$K = (2 - \text{MC}_6 + 2,3 - \text{DMC}_5) / (3 - \text{MC}_6 + 2,4 - \text{DMC}_5) \approx 1$$

式中:2-MC₆为2-甲基己烷;2,3-DMC₅为2,3-二甲基戊烷;3-MC₆为3-甲基己烷;2,4-DMC₅为2,4-二甲基戊烷。

表 1 渤海湾盆地东濮凹陷和塔里木盆地凝析油定性表

Table 1 Qualitative analysis results of the condensate oil samples from the Dongpu Sag, the Bohai Bay Basin and the Tarim Basin

峰号	名称	峰号	名称	峰号	名称	峰号	名称
1	丙烷	37	2,3,4-三甲基戊烷	75	2-甲基 3-乙基庚烷	113	正十二烷
2	异丁烷	38	2,3,3-三甲基戊烷	76	1,1,2,3-四甲基己烷	114	2,6-二甲基十一烷
3	正丁烷	39	未知	77	未知	115	1,1,3-三甲基 2-丁基环己烷
4	2,2-二甲基丁烷	40	4-甲基庚烷	78	未知	116	庚基环己烷
5	异戊烷	41	3-甲基庚烷	79	4-甲基壬烷	117	2,7-二甲基十一烷
6	正戊烷	42	1,3-二甲基环己烷	80	未知	118	5,7-二甲基十一烷
7	2,2-二甲基丁烷	43	1,4-二甲基环己烷	81	3-甲基壬烷	119	4-甲基十二烷
8	环戊烷	44	1,1-二甲基环己烷	82	异丁基苯	120	2-甲基十二烷
9	2,3-二甲基丁烷	45	2,2,4-三甲基己烷	83	未知	121	未知
10	2-甲基戊烷	46	2-甲基乙基环戊烷	84	未知	122	7-甲基十三烷
11	3-甲基戊烷	47	3-甲基乙基环戊烷	85	正癸烷	123	未知
12	正己烷	48	1,2-二甲基环己烷	86	1,2,4-三甲基苯	124	2-甲基萘
13	2,2-二甲基戊烷	49	正辛烷	87	4-甲基癸烷	125	正十三烷
14	甲基环戊烷	50	2,2-二甲基庚烷	88	环十一烷	126	联苯
15	2,4-二甲基戊烷	51	2,4-二甲基庚烷	89	未知	127	2-甲基十三烷
16	2,2,3-三甲基丁烷	52	4,4-二甲基庚烷	90	3-甲基癸烷	128	3-甲基十三烷
17	苯	53	乙基环己烷	91	1,1-二甲基 2-丙基环己烷	129	2,6,10-三甲基十一烷
18	3,3-二甲基戊烷	54	2,6-二甲基庚烷	92	对甲基丙基苯	130	正十四烷
19	环己烷	55	1,1,3-三甲基环己烷	93	5-甲基癸烷	131	未知
20	2-甲基己烷	56	2,5-二甲基庚烷	94	2,6-二甲基壬烷	132	3-甲基十四烷
21	2,3-二甲基戊烷	57	3,3-二甲基庚烷	95	2-甲基癸烷	133	正十五烷
22	1,1-二甲基环戊烷	58	乙基苯	96	3,7-二甲基壬烷	134	2-甲基十五烷
23	3-甲基己烷	59	1,2,4-三甲基己烷	97	未知	135	3-甲基十五烷
23-2	1 反 3-二甲基环戊烷	60	1,2-二甲基苯	98	未知	136	正十六烷
23-3	1 顺 3-二甲基环戊烷	61	2,3-二甲基庚烷	99	未知	137	4-甲基十五烷
24	3-乙基戊烷	62	4-甲基辛烷	100	正十一烷	138	2,6,10-三甲基十五烷
25	1 反 2-二甲基环戊烷	63	2-甲基辛烷	101	5-甲基十一烷	139	2-甲基十六烷
26	2,2,4-三甲基戊烷	64	未知	102	3,7-二甲基癸烷	140	3-甲基十六烷
27	正庚烷	65	3-甲基辛烷	103	庚基环己烷	141	正十七烷
28	甲基环己烷	66	1,3-二甲基苯	104	2,3-二甲基 1-乙基苯	142	姥鲛烷
29	2,2,3,3-四甲基丁烷	67	1,1,3,5-四甲基环己烷	105	未知	143	2,6,10,14-四甲基十五烷
30	乙基环戊烷	68	对-甲基乙基环戊烷	106	2,3-二甲基十一烷	144	2-甲基十七烷
31	2,5-二甲基己烷	69	间-甲基乙基环戊烷	107	6-甲基十一烷	145	正十八烷
32	2,4-二甲基己烷	70	正壬烷	108	5-甲基十一烷	146	植烷
33	3,3-二甲基己烷	71	异丙基苯	109	4-甲基十一烷	147	2-甲基十八烷
34	1,2,3-三甲基环戊烷	72	2,2,3,3-四甲基己烷	110	2,4-二甲基十一烷	148	正十九烷
35	2,3,4-三甲基戊烷	73	正丙基环己烷	111	3-甲基十一烷	149	正二十烷
36	甲苯	74	2,6-二甲基辛烷	112	对异丙基苯	150	正二十一烷

2.1 甲基环己烷指数、庚烷值、石蜡烃指数

从表 2 数据可以看出,不同类型烃源岩所产凝

析油的各种参数存在较大的差异。甲基环己烷指数主要受凝析油成熟度控制,成熟度越高甲基环己

表 2 渤海湾盆地东濮凹陷和塔里木盆地凝析油轻烃数据表

Table 2 Light hydrocarbon data of the condensate oil samples from the Dongpu Sag, the Bohai Bay Basin and the Tarim Basin

指标	白 54	白 9	白 17	白 33	白 45	桥 73	中 1 油 1	中 1 油 2	文 108-7	文 23-6	文 23
甲基环己烷指数, %	41.01	41.17	45.19	65.03	38.17	56.82	26.87	19.90	23.34	20.89	25.40
庚烷值, %	31.63	28.47	31.12	21.71	31.48	19.82	44.06	52.04	51.75	53.79	46.46
石蜡烃指数	4.55	3.50	3.45	2.50	4.88	2.64	3.92	3.65	12.52	11.59	10.38
芳烷指数	0.36	0.59	0.73	0.53	0.39	0.34	0.16	0.02	0.99	0.99	0.69
芒果系数 K 值	1.09	1.10	1.05	1.22	1.12	1.08	1.03	1.04	1.08	1.09	1.10
C ₆ —C ₉ 组分相对含量											
异构烷烃, %	34	27	28	27	28	24	51	61	36	36	41
环烷烃, %	35	27	25	45	30	36	30	35	23	22	24
芳烃, %	31	46	47	28	42	40	19	4	41	42	35
C ₆ 相对含量											
正己烷, %	27.8	18.8	22.2	8.5	26.7	19.7	37.4	53.5	16.6	17.2	17.7
异己烷+环己烷, %	41.1	33.8	43.1	28.1	39.0	53.6	47.0	44.4	17.1	15.9	21.6
苯, %	31.0	47.4	34.7	63.4	34.4	26.8	15.6	2.1	66.3	66.8	60.7
苯/(正己烷+异己烷+环己烷)	0.45	0.90	0.53	1.73	0.52	0.37	0.19	0.02	1.97	2.01	1.55
甲苯/(异庚烷+环庚烷)	0.21	0.34	0.87	0.44	0.28	0.40	0.16	0.02	0.48	0.40	0.34
甲苯/环庚烷	0.59	0.92	2.12	0.74	0.86	0.77	0.61	0.09	2.42	2.21	1.64
甲苯/(异庚烷+正庚烷)	0.43	0.78	2.01	1.44	0.57	1.25	0.29	0.03	0.74	0.61	0.57
(甲苯+环庚烷)/(异庚烷+正庚烷)	1.16	1.59	2.93	3.35	1.22	2.83	0.75	0.38	1.05	0.89	0.91
环庚烷/(异庚烷+正庚烷)	0.73	0.81	0.92	1.92	0.65	1.58	0.46	0.35	0.31	0.28	0.35

烷的含量就越低, 甲基环己烷指数就越小。随着成熟度增加, 甲基环己烷的环链首先被打开, 然后生成正庚烷或甲基己烷; 二甲基环戊烷的热稳定性比甲基环己烷要高, 在热演化过程中较稳定, 环不易被打开形成异构烷烃。庚烷值也是热成熟度的标志, 随着成熟度增加, 庚烷值有增大的趋势。石蜡烃指数也是成熟度指标, 随着热演化程度增加, 石蜡烃指数增加^[10]。

东濮凹陷文 23 气田和白庙气藏的凝析油庚烷值与石蜡烃指数呈线性相关关系, 基本在同一直线上(图 1)。文留气田凝析油比白庙气藏凝析油成熟度要高, 文 23 井主要是煤成凝析油^[11], 成熟度已达到过成熟状态, 而白庙白 9、白 17、白 45、白 54 等井为正常成熟—高成熟早期阶段的凝析油, 白 33、桥 73 两口井的凝析油为正常成熟度凝析油。

甲基环己烷指数随着原油的成熟度增加而降低, 与庚烷值呈负相关关系(图 2)。塔里木盆地中 1 井 2 个样品所含凝析油为来源于海相碳酸盐岩的高成熟度油气, 其生物标志化合物含量极低, 饱和烃的生标分析效果差, 很难获得油气源对比及成藏史研究方面的信息。与东濮凹陷陆相盆地凝析

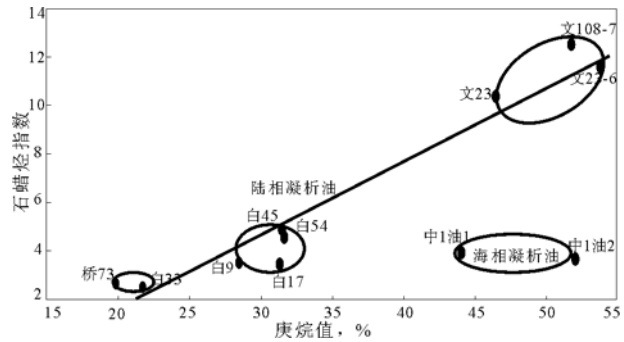


图 1 渤海湾盆地东濮凹陷和塔里木盆地凝析油中石蜡烃指数与庚烷值关系

Fig. 1 Relationship between the paraffin indexes and the heptane values of the condensate oil samples from the Dongpu Sag, the Bohai Bay Basin and the Tarim Basin

油样品对比分析结果说明, 中 1 井原油为高熟凝析油, 与东濮凹陷文 23 井凝析油的成熟度相当。中 1 井海相凝析油的甲基环己烷指数与庚烷值同东濮凹陷陆相盆地的凝析油具有一致性, 但石蜡烃指数随着成熟度增加变化缓慢。中 1 井凝析油石蜡烃指数远远偏离东濮凹陷的趋势线, 原因是海相有机质母质中石蜡烃含量低, 使得高成熟度凝析油的石蜡烃指数较小, 据此可区分原油是来源于海相有机质还是陆源有机质。

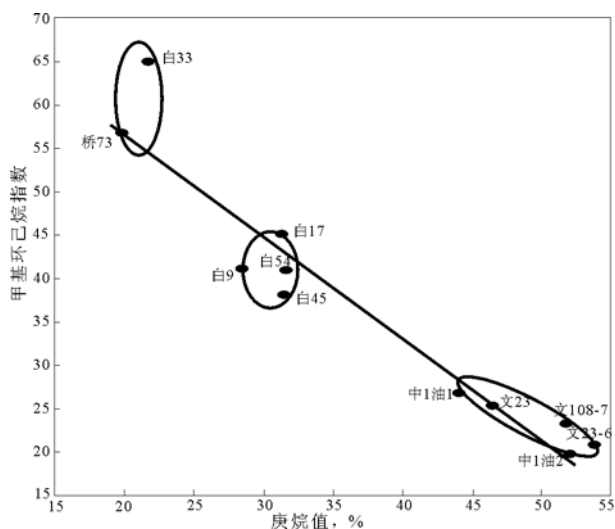


图 2 渤海湾盆地东濮凹陷和塔里木盆地凝析油中庚烷值与甲基环己烷指数关系

Fig. 2 Relationship between the heptane values and the methylcyclohexane indexes of the condensate oil samples from the Dongpu Sag, the Bohai Bay Basin and the Tarim Basin

2.2 芒果(Mango)系数 K 值

Mango 提出了轻烃稳定动力学理论,认为原油轻烃组分中几个 C_7 异构烷烃之和的比值为—常数,即 2—甲基己烷与 2,3—二甲基戊烷之和与 3—甲基己烷与 2,4—二甲基戊烷之和的比值约为 1,不受油气母质与成熟度的影响^[12]。东濮凹陷文 23 气田、白庙地区以及中 1 井 11 个凝析油样品的计算结果揭示, K 值都介于 1.03~1.22 之间,完全符合这一规律,说明这些地区凝析油成藏后没有受到生物降解作用的影响,油藏保存较好。

2.3 芳烷指数

凝析油芳烷指数是指苯、甲苯含量之和与 C_4 — C_8 异构烷烃、 C_4 — C_8 环烷烃含量之和的比值,表现了芳烃在凝析油中相对含量的大小。凝析油中的芳烃含量不仅与生油母质有关,还与凝析油的成熟度相关。在沉积环境相似条件下,凝析油的成熟度增加,芳烷指数就会增大。文 23 气田的 3 个凝析油样品的芳烷指数较大,为 0.69~0.99;白庙气藏 6 个样品的芳烷指数较小,为 0.34~0.73。导致文 23 气田与白庙气藏芳烷指数存在较大差异的因素有二:一是成熟度差异,白庙气藏凝析油的成熟度低于文 23 气田凝析油;二是成油母质有一定的差异,文留气田凝析油来源于石炭—二叠系煤系地层,白庙气藏凝析油来源于煤系地层与第三系,为混合成因。塔里木盆地中 1 井奥陶系 2 个样品中的凝析油油源为海相碳酸盐岩地层,虽然成熟度较高,但芳烷指数仅为 0.02~0.16,主要是由于有机母质中芳

香结构烃类含量极低,导致原油中芳烃含量较低而造成的。因此,芳烷指数也可用来区分生油母质类型。陆相有机质生成的原油芳烷指数较大,煤成油的芳烷指数大于泥岩层生成的油,海相有机质生成的原油芳烷指数较小。

2.4 C_6 — C_9 组分相对含量变化特征

C_6 — C_9 系列化合物是凝析油组分中最重要的部分。这类化合物在凝析油中相对含量高,化合物的类型多,既有正构烷烃、异构烷烃也有环烷烃和芳烃,每种类型的化合物又具有较多的异构体,因此 C_6 — C_9 系列凝析油组分含有较多的地球化学信息。中 1 井海相凝析油芳烃含量小,一般小于 20%,异构烷烃含量高,介于 50%~60%之间;东濮凹陷陆相凝析油芳烃含量较高,为 30%~50%,异构烷烃含量较低,为 20%~40%(表 2)。 C_6 — C_9 异构烷烃、环烷烃、芳烃三角图较好地地区分了陆相和海相凝析油(图 3)。

凝析油中 C_6 各组分含量变化更具有专属的指向意义,根据正己烷、异己烷+环己烷和苯 3 类化合物的相对组成变化,可以较好地地区分不同沉积环境生油母质生成的凝析油。海相有机质生成的凝析油苯含量较低,正己烷和异己烷+环己烷组分含量较高;煤成凝析油 3 种组分变化刚好与海相油分布特征相反,苯含量较高,正己烷和异己烷+环己烷组分含量较低;油型凝析油 3 类化合物含量变化波动较大,其含量可能受成熟度的影响,油型凝析油的最大特征为苯含量介于海相油与煤成油之间(图 4)。

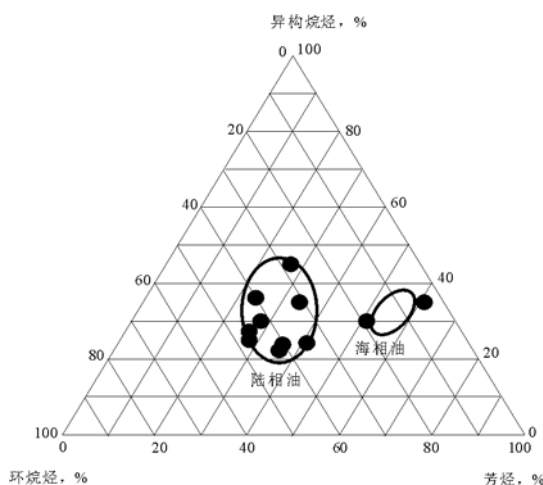


图 3 渤海湾盆地东濮凹陷塔里木盆地凝析油轻烃中 C_6 — C_9 各类组分关系

Fig. 3 Relationship of different types of C_6 — C_9 components of the condensate oil samples from the Dongpu Sag, the Bohai Bay Basin and the Tarim Basin

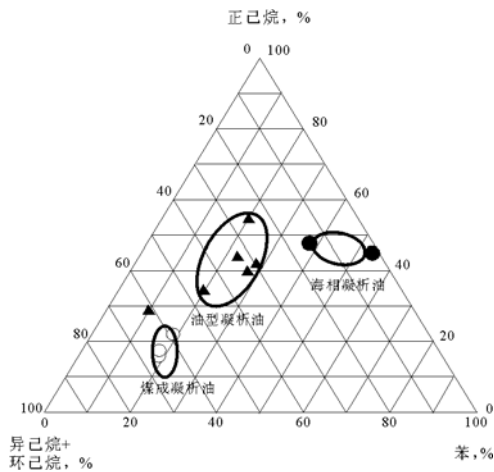


图4 渤海湾盆地东濮凹陷和塔里木盆地凝析油中 C_6 各类化合物组成关系

Fig. 4 Relationship of different types of C_6 components of the condensate oil samples from the Dongpu Sag, the Bohai Bay Basin and the Tarim Basin

3 结论

通过凝析油轻烃组分分析,解决了东濮凹陷深层凝析油研究难题。从甲基环己烷指数、庚烷值、石蜡烃指数、芳烷指数以及 C_6 、 C_6-C_9 各类组分的分布研究可知,东濮凹陷文23气田主要为煤型凝析气藏,其凝析油为煤成凝析油,为高成熟—过成熟阶段的产物;白庙凝析气藏所含的凝析油主要为泥岩层在生油高峰—高成熟阶段生成的凝析油,桥73井与白33井为成熟阶段的凝析油;塔里木盆地中1井2个样品所含凝析油为高成熟—过成熟阶段海相碳酸盐岩地层生成的凝析油,与东濮凹陷文23气田和白庙地区的凝析油存在显著差别。

凝析油的庚烷值、石蜡烃指数随其成熟度增加而增加,甲基环己烷指数则随凝析油成熟度增加而

减小。不同成因的凝析油中正烷烃、异构烷烃、环烷烃、芳烃的相对组成是不同的。海相凝析油芳烃含量较低,陆相凝析油芳烃含量较高,可以通过 C_6-C_9 的异构烷烃、环烷烃和芳烃相对组成特征来区分海相凝析油与陆相凝析油。 C_6 各组分正己烷、异己烷+环己烷以及苯等指标可较好地地区分海相凝析油、陆相煤型凝析油与油型凝析油。

参考文献:

- 1 王津义,高林,姚俊祥等. 遵义后坝奥陶系红花园组油苗岩石轻烃特征分析[J]. 石油实验地质,2006,28(6):581~585
- 2 林壬子. 油气勘探与油藏地球化学[M]. 北京:石油工业出版社,1998. 25~38
- 3 彼得斯 K E,莫尔多万 J M. 生物标记化合物指南:古代沉积物和石油中分子化石的解释[M]. 姜乃煌,张水昌,林永汉等译. 北京:石油工业出版社,1995. 41~56
- 4 菲尔普 R P. 化石燃料生物标志物:应用与谱图[M]. 傅家谟,盛国英译. 北京:科学技术出版社,1987. 3~10
- 5 许怀先,陈丽华. 石油地质实验测试技术与应用[M]. 北京:石油工业出版社,2001. 43~62
- 6 王铁冠,张枝焕. 油藏地球化学的理论与实践[J]. 科学通报,1997,42(14):73~78
- 7 王东良,李勇,敬兵等. 塔里木盆地柯克亚地区原油差异与成因分析[J]. 石油实验地质,2007,29(2):192~198
- 8 严永新,袁光喜,马蓉芳等. 焉耆盆地原油物理化学特征及油源对比研究[J]. 石油实验地质,2006,28(5):467~470
- 9 王铁冠. 生物标志物地球化学研究[M]. 武汉:中国地质大学出版社,1990. 1~154
- 10 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[A]. 见:《煤成气地质研究》编委会. 煤成气地质研究[C],北京:石油工业出版社,1987. 118~130
- 11 朱家蔚,许化政. 东濮凹陷煤成气地化指标及其与油气的对比[J]. 石油与天然气地质,1985,6(3):272~279
- 12 林壬子. 轻烃技术在油气勘探中的应用[M]. 武汉:中国地质大学出版社,1992. 91~110

(上接第515页)

参考文献:

- 1 林壬子. 罐装岩屑轻烃分析技术的应用研究[J]. 江汉石油学院学报,1990,12(4):1~7
- 2 王海清. 石油 C_1-C_7 蒸发烃分离器的研制与实践[J]. 西南石油学院学报,1999,21(4):95~98
- 3 蒋启贵,熊良华,唐少凡等. 酸解剂的 Al_2O_3 填充毛细柱分离分析技术[J]. 石油与天然气地质,1996,17(2):167~168
- 4 武杰,张以珈. 岩石中微量轻烃(C_1-C_9)的分析方法[J]. 石油实验地质,1985,7(1):20~24
- 5 《石油工业技术监督丛书》编审委员会. 原油、轻烃、液化石油气质量检验[M]. 北京:石油工业出版社,2001. 135~142
- 6 Canipa-Morales N K, Galan-Vidal C A, Guzman-Vega M A, et al. Effect of evaporation on C_7 light hydrocarbon parameters

[J]. Organic Geochemistry, 2003,34(6):813~826

- 7 赵政璋,李永铁,叶和飞等. 青藏高原海相烃源层的油气生成[M]. 北京:科学出版社,2000. 107~110
- 8 熊永强,耿安松,王云鹏等. 干酪根二次生烃动力学模拟实验[J]. 中国科学(D),2001,31(4):315~320
- 9 钱志浩,曹玉兰,荣正光. 热蒸发法测定轻烃[J]. 石油实验地质,1982,4(4):280~284
- 10 钱志浩,荣正光,王兴国. 岩石氟里昂抽提物(C_6-C_{32})的测定及意义[A]. 见:中国地质学会石油地质专业委员会. 有机地球化学论文集[C],北京:地质出版社,1987. 120~128
- 11 蒋启贵,陈伟钧,金聚畅等. 岩石低沸点轻烃指纹分析方法研究[J]. 石油实验地质,2004,26(5):492~495
- 12 张美珍,承秋泉,蒋启贵等. 原油轻烃反吹色谱分析[J]. 石油实验地质,2007,29(2):212~216
- 13 李浩春. 分析化学手册 第五分册[M]. 北京:化学工业出版社,1999. 703~705