

用广义对应分析法筛选生物标志物指标

——兼论济阳坳陷原油的成熟度

周光甲

(胜利油田地质科学研究所)

本文以济阳坳陷39个原油样和29个生油岩样的30项生物标志物指标实测值为基础数据,用广义对应分析法对这些指标进行了筛选。 $5\alpha-C_{27}$ 甾烷的 $\beta\beta/(\alpha\alpha+\beta\beta)$ 和 $5\alpha-C_{29}$ 甾烷的 $20S/(20R+20S)$ 是反映原油成熟度的主要指标,重排甾烷相对丰度、4-甲基甾烷相对丰度和 Tm/Ts 是原油成熟度的辅助指标。

生物标志物指标已被广泛用来确定生油岩与原油或原油与原油的亲缘关系,探索有机质类型和成熟度,判别石油的生物降解程度和油气运移情况。对于常用生物标志物指标进行筛选,是一个急待解决的问题。

众所周知,用一般几何作图法只能分析2—3个指标之间的关系,对筛选大量指标是不适用的。在数学地质研究中,常用因子分析和对应分析等方法探讨多种因素之间的关系,这对于阐明地质上某些随机现象的规律,可以取得比较明显的效果^[1,2,3]。近年来,阎汉杰提出了广义对应分析方法¹⁾,将指标、样品和主因子反映在同一因子空间中,一起进行比较研究,使得它们之间的关系更为明显。本文主要应用R型广义对应分析法,对反映原油和生油岩成熟度的指标进行筛选,并讨论济阳坳陷原油的成熟度。

一、样品和指标

广义对应分析所用的39个原油样品和19个生油岩样品,分别选自济阳坳陷储油层和主要生油岩(表1)。

另外还有一组共10个样品是东营凹陷沙三段未熟生油岩(埋深 $<2200\text{ m}$,镜质体反射率 $<0.44\%$)的热模样品^[4]。这10个样品(包括原样及热模样,干酪根为Ⅱ₁型干酪根,热模温度为 140°C 至 350°C ,釜压80至180 bar)也参加了广义对应分析,作为成熟度的比较标准。

以美国菲尼根-马特公司4021型色质联机分析样品饱和烃馏分的链烷烃及甾、萜类化合物,得到近3000个分析数据,然后按表2的指标逐项计算。表2的指标是有关单位曾经使用的以及本文提出研究的,主要是解释有机质成熟度的指标。表2中30项指标的编号,也是广义对应分析成果图中指标的编号。

本文1986年1月13日收到,1986年11月1日改回。

1) 阎汉杰,1983,广义对应分析的数学探讨及应用。胜利油田地质科学研究所报告集。

表1 原油及生油岩样品统计表

地 层	临 盘	东 营	滨 南	青 东	义和庄-义东-渤南	桩 西	车 西	孤岛-埕东	样品总量
Ng	馆陶组	1						2	3
Ed	东营组	1		1					2
Es ₁	沙一段	1 (1)		1		1 (3)	1		4 (4)
Es ₂	沙二段	1				3			4
Es ₃	沙三段	2 (2)	4 (3)	1	(2)	2 (1)	(2)	(2)	9 (12)
Es ₄	沙四段	1	(2)	2	2	1			6 (2)
Mz	中生界					2	(1)		2 (1)
C-P	石炭二叠系					1			1
O	奥陶系					3	4		7
⌒	寒武系			1					1
总 计		7 (3)	4 (5)	6	2 (2)	13 (4)	4 (3)	1 (2)	39 (19)

括号内数字为生油岩样品数

表2 生物标志物指标

类 别	编 号	指 标	缩 写	意 义
链 烷 烃	1	C ₁₁ —C ₃₄ 正烷烃/C ₁₅ —C ₂₁ 异烷烃	C ₁₁ —C ₃₄ n/i	成 熟 度
	2	正烷烃(C ₂₁ +C ₂₃ +C ₂₅ +C ₂₇ +C ₂₉)/(C ₂₂ +C ₂₄ +C ₂₆ +C ₂₈ +C ₃₀)	CPI	成 熟 度
	3	姥鲛烷(iC ₁₉)/植烷(iC ₂₀)	Pr/Ph	有 机 质 性 质
	4	姥鲛烷/C ₁₇ 正烷烃	Pr/nC ₁₇	成 熟 度
	5	植烷/C ₁₈ 正烷烃	Ph/nC ₁₈	成 熟 度
	6	姥鲛烷占链烷烃百分数	Pr	有 机 质 性 质, 环 境
	7	植烷占链烷烃百分数	Ph	有 机 质 性 质, 环 境
	8	(iC ₁₅ +iC ₁₆ +iC ₁₈)/(姥鲛烷+植烷)	$\frac{iC_{15}+iC_{16}+iC_{18}}{Pr+Ph}$	环 境
甾 烷	9	(C ₂₁ 妊烷+C ₂₂ 高妊烷)/总甾烷(%)	C ₂₁₋₂₂ (妊+高妊)	成熟度, 生物降解
	10	C ₂₁ 妊烷/C ₂₂ 高妊烷	C ₂₁₋₂₂ (妊/高妊)	
	11	(13β17α20S+13β17α20R+13α17β20S+13α17β20R)重排胆甾烷	ΣC ₂₇ 重排	成熟度, 生物降解
	12	(5α14α17α20S+5α14β17β20R+5α14β17β20S+5α14α17α20R)C ₃₀ 4-甲基甾烷	ΣC ₂₉ 4-甲基	
	13	ΣC ₂₇ 重排/(5α14α17α20RC ₂₇ +5α14α17α20RC ₂₈ +5α14α17α20RC ₂₉)	ΣC ₂₇ 重排/(C ₂₇ +C ₂₈ +C ₂₉)	成 熟 度
	14	(5α14β17β20RC ₂₇ +5α14β17β20SC ₂₇)/(5α14α17α20SC ₂₇ +5α14β17β20RC ₂₇ +5α14β17β20SC ₂₇ +5α14α17α20RC ₂₇)	5αC ₂₇ ββ/(αα+ββ)	成 熟 度
	15	5α14α17α20SC ₂₉ /(5α14α17α20SC ₂₉ +5α14α17α20RC ₂₉)	5αC ₂₉ 20S/(20R+20S)	成 熟 度
	16	ΣC ₂₉ 4-甲基/5α14α17α20RC ₂₉	ΣC ₂₉ 4-甲基/C ₂₉ 20R	
	17	5β14α17αC ₂₇ /5α14α17α20RC ₂₇	5βC ₂₇ /5αC ₂₇ 20R	成熟度, 运移
	18	5α14α17α20RC ₂₇ 胆甾烷占总甾烷百分数	甾烷C ₂₇	油 源 对 比
	19	5α14α17α20RC ₂₈ 麦角甾烷占总甾烷百分数	甾烷C ₂₈	油 源 对 比
	20	5α14α17α20RC ₂₉ 谷甾烷占总甾烷百分数	甾烷C ₂₉	油 源 对 比

续表 2

萜	21	$C_{20}-C_{25}$ 三环二萜占总萜烷百分数	二萜	有机质性质
	22	17 α -22, 29, 30三降萜烷/18 α -22, 29, 30三降萜烷	Tm/Ts	成熟度
	23	(17 α 21 β -30降萜烷+17 α 21 β 萜烷)/(Tm+Ts)	萜烷($C_{29}+C_{30}$)/ C_{27}	成熟度
	24	17 β 21 α -30降萜烷/17 α 21 β -30降萜烷	C_{29} 萜烷/萜烷	成熟度
	25	17 β 21 α 萜烷/17 α 21 β 萜烷	C_{30} 萜烷/萜烷	成熟度
	26	17 α 21 β 22S—高萜烷/(17 α 21 β 22S+17 α 21 β 22R)—高萜烷	C_{31} 萜 $\alpha\beta$ S/(S+R)	成熟度, 有机质性质
	27	5 α 14 α 17 α 20R谷甾烷/17 α 21 β 萜烷	甾 C_{29} /萜 C_{30}	成熟度
	28	(Tm+Ts)/总萜烷(%)	萜烷 C_{27}	成熟度
	29	17 α 21 β -30降萜烷占总萜烷百分数	萜烷 C_{29}	成熟度
	30	17 α 21 β 萜烷占总萜烷百分数	萜烷 C_{30}	成熟度

二、计算结果及分析

广义对应分析实际上是因子分析的一种。我们用这种方法筛选生物标志物指标, 就是先计算主因子, 将指标分类, 然后对每类主因子的意义作出解释并确定有代表性的指标, 以达到筛选目的。

首先用 39 个原油样品做 R 型广义对应分析。按照计算程序, 根据原始数据矩阵计算了主因子的特征值和累计贡献率, 并打印出方差最大旋转因子载荷矩阵。由于主要研究指标, 表 3 只列出矩阵的指标部分 (尚有样品及主因子部分)。表 3 中 F_1-F_6 这 6 个主因子的累积贡献率已大于 85%, 表明它们 (尤其是前 4 个) 已集中反映了大部分变量相关情况的信息, 有一定代表性。表 3 中的数值是主因子空间坐标系中, 30 项指标变量分别在各主因子轴上的投影值。可以发现, 某些指标的投影值只在某个主因子轴上比较高 (指绝对值较高), 一个主因子只主要代表同类型的一些指标。为了直观地研究主因子对指标的分类作用, 可将计算结果打印成平面点聚图和枝状图。本文选取了主因子轴平面点聚图, 将指标的点摘出绘成图 1 及图 2, 图中点旁标出的数字是表 2 中指标的代号。表 3 及图 1、2 可以说明以下几点:

1. F_1 主因子轴上展现了不同相关程度的成熟度指标。图 1 中 13、14、15、16 号指标和 18、19、20 号指标位于 F_1 轴的两端, 完全是负相关。它们都是甾烷指标。当沉积有机质成熟作用增加时, 反映构型异构化程度的甾烷指标 (如 14、15 号指标) 和反映重排异构化程度的甾烷指标 (13、16 号指标) 的值亦增加, 且前者成为较稳定值。而此时代表天然甾醇这类前身物的 $\alpha\alpha\alpha$ R 甾烷相对减少, 18、19、20 号指标值相对降低^[6]。因此, 在统计上得到负相关的结果。这些指标在 F_1 主因子轴的投影绝对值较高, 可见 F_1 主因子集中反映了甾烷成熟度的信息, 可称其为甾烷成熟度因子。

2. 在 F_2 主因子轴上, 载荷值较大的是同萜烷有关的指标。 F_2 为萜烷因子。24—30 号与萜烷有关指标点聚在一起 (F_1-F_6 各轴上均相同), 主要是因为所取油样中这些指标数值变化很小, 如一般认为能说明成熟度的 $C_{31}\alpha\beta S/(S+R)$ 为 0.54—0.59, C_{29} 萜烷/萜烷为 0.09—0.21, C_{30} 萜烷/萜烷为 0.10—0.17 (分别是 26、24、25 号指标), 同甾烷相比, 不能很清楚地地区分原油的成熟度。二萜烷总量 (21 号指标) 与它负相关, 很可能是受有机质性质控制, 待进一步研究。Tm/Ts (22 号指标) 和 24—30 号指标负

表3 39个原油样品30项指标R型广义对应分析的因子载荷矩阵

编号	指 标 缩 写	F_1	F_2	F_2	F_4	F_5	F_6
1	$C_{11}-C_{34}$ n/i	0.5009	0.1990	-0.6145	-0.1488	-0.1229	-0.2653
2	CPI	0.1305	0.0157	-0.6029	0.0046	0.1526	-0.2312
3	Pr/Ph	0.7433	-0.1734	-0.0029	-0.3185	0.1007	-0.2376
4	Pr/nC ₁₇	-0.0224	-0.1452	0.8417	-0.3033	-0.2887	-0.1442
5	Ph/nC ₁₈	-0.3607	-0.1309	0.8705	-0.0124	0.0427	-0.0274
6	Pr	-0.0648	-0.2076	0.8827	-0.2407	-0.1264	-0.1386
7	Ph	-0.5756	-0.1069	0.6914	0.2489	0.2447	0.0107
8	$(iC_{15}+iC_{16}+iC_{18})/(Pr+Ph)$	0.1614	0.1221	-0.2767	-0.1727	-0.5418	0.6825
9	$C_{21}-C_{22}$ (妊+高妊)	0.5811	0.0849	0.0233	0.6206	-0.1794	0.2368
10	$C_{21}-C_{22}$ (妊/高妊)	-0.5108	0.2404	-0.0347	-0.0947	-0.2827	0.0750
11	ΣC_{27} 重排	0.6414	-0.1780	0.2422	-0.1205	-0.5692	-0.0427
12	$\Sigma C_{29,4}$ -甲基	0.6896	-0.1208	0.0971	-0.3596	0.3899	0.3398
13	ΣC_{27} 重排/($C_{27}+C_{28}+C_{29}$)	0.8662	-0.2116	0.2132	0.0247	-0.1900	-0.0514
14	$5\alpha C_{27}\beta\beta/(\alpha\alpha+\beta\beta)$	0.9352	-0.0250	0.1023	0.0084	0.0975	0.1390
15	$5\alpha C_{29}20S/(20S+20R)$	0.9082	0.0142	0.0249	0.0790	0.1575	-0.1742
16	$\Sigma-C_{29,4}$ 甲基/ $C_{29}20R$	0.9104	-0.1202	0.0445	-0.0807	0.2361	0.0080
17	$5\beta C_{27}/5\alpha C_{27}20R$	0.8104	-0.3052	0.1278	-0.1051	0.1819	0.0816
18	甾烷C ₂₇	-0.8276	0.1544	-0.2733	-0.1164	-0.2506	-0.2801
19	甾烷C ₂₈	-0.9176	0.0570	-0.1732	0.0326	-0.0745	-0.2081
20	甾烷C ₂₉	-0.9209	0.0135	0.0205	0.0395	0.1598	0.0282
21	二萜	0.2225	-0.2404	0.2251	0.8424	-0.0644	-0.0164
22	Tm/Ts	-0.7459	-0.1981	0.0301	-0.0332	0.2490	0.3294
23	藿烷($C_{29}+C_{30}$)/C ₂₇	-0.6991	0.4023	0.0229	-0.2430	0.1884	0.3150
24	C ₂₉ 藿烷/藿烷	0.1585	0.9759	0.1338	0.0151	0.0206	-0.0168
25	C ₃₀ 藿烷/藿烷	0.1585	0.9759	0.1338	0.0151	0.0206	-0.0168
26	C ₃₁ 藿烷 $\alpha\beta S/(S+R)$	0.1585	0.9759	0.1338	0.0151	0.0206	-0.0168
27	甾C ₂₉ /甾C ₃₀	0.1585	0.9759	0.1338	0.0151	0.0206	-0.0168
28	藿烷C ₂₇	0.1585	0.9759	0.1338	0.0151	0.0206	-0.0168
29	藿烷C ₂₉	0.1585	0.9759	0.1338	0.0151	0.0206	-0.0168
30	藿烷C ₃₀	0.1585	0.9759	0.1338	0.0151	0.0206	-0.0168
累 计 贡 献 率		34.6	59.2	72.5	78.2	83.0	87.2

相关也有矛盾,但从它在 F_1 投影的位置上看,与 $\alpha\alpha R$ 构型甾烷的解释可以一致。所以,Tm/Ts在藿烷中是说明原油成熟度的较好指标。

3. F_3 主因子主要说明链烷烃指标相关情况。但在解释原油成熟度上有矛盾。原油成熟度高,一般CPI值(2号)应降低;原油相对富集正烷烃,Pr/nC₁₇(4号)和Ph/nC₁₈(5号)也应为低值。而表3和图2中CPI却与4、5号指标负相关。根据油样实际情况,很可能是生物降解造成了正烷烃的消耗,致使4、5号指标值增大。 F_3 暂称异烷烃因子。

4. F_4 主因子明显地代表二萜烷的信息(表3),但在成熟度因子轴上它没有较高的投影绝对值(图1)。根据主因子之间相对独立的原理,它可能不主要反映成熟度方面的信息,还可做有机质性质等其他解释。

5. F_5 、 F_6 主因子轴上各指标投影缺少突出的值，在做因子轴旋转前，还不能明确解释。

将上述 F_1 、 F_2 、 F_3 主因子轴投影绝对值较大的以及与成熟度有关的指标选择出16个，并用39个油样、19块岩样及10块热模样品再次做R型广义对应分析，以进一步研究指标的分类。我们重点考察主因子轴平面点聚图，将其分绘于图3及图4。图3中16个指标明显分为三类，分别用虚线圈出。根据热模样品加温顺序所指示的成熟度方向，Ⅰ类和Ⅱ类是负相关的主要和成熟度有关的指标。仍可以看出，处于极端负相关的馏烷18—20

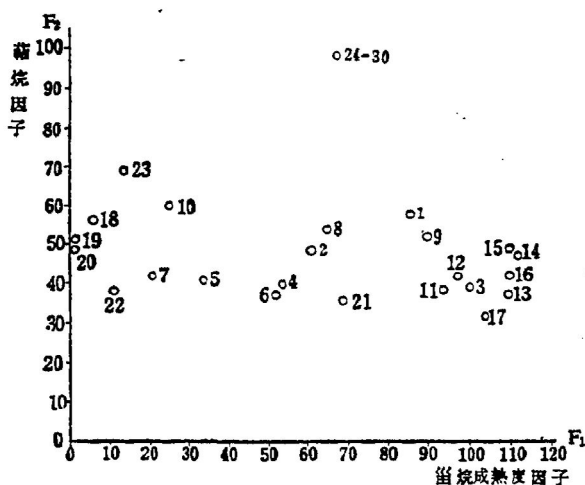


图1 主因子轴 F_1 — F_2 平面点聚图

号及13—16号指标所处的主因子空间位置比萘烷指标好，对说明原油成熟度亦更为有利。18—20号和13—16号指标相比，以14号指标〔即 $5\alpha C_{27}\beta\beta/(\alpha\alpha+\beta\beta)$ 〕和15号指标〔 $5\alpha C_{29}20S/(20S+20R)$ 〕为最好。原因是18、19、20号指标是占总馏烷的百分数，测定较繁琐，且14、15号也包括了18号〔 5α ， 14α ， 17α ， $20RC_{27}$ 〕和19号〔 5α ， 14α ， 17α ， $20RC_{29}$ 〕的信息。另外，在 m/e 217质量色谱图中14和15号指标一般比13、16号指标容易辨认和测定。当然，这样的选择

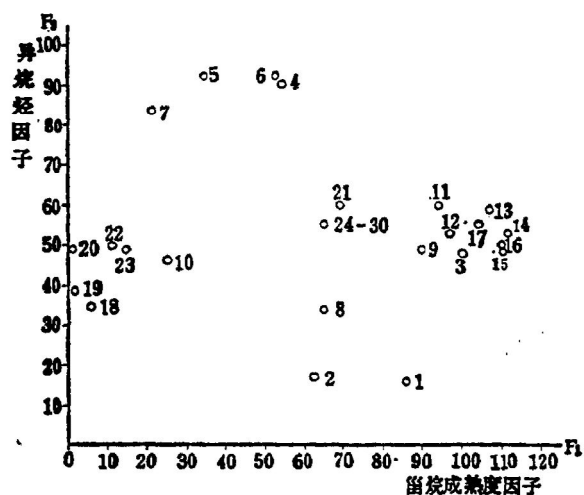


图2 主因子轴 F_1 — F_3 平面点聚图

并不完全否定其他成熟度指标的有效性，只是有主有次，择优先用。

这里应说明的是：一般常用 C_{29} 馏烷的4个峰计算（如15号指标）；本文试用 C_{27} 馏烷，主要是因二者可能都有其他峰干扰（ C_{27} 馏烷的 $\beta\beta$ 两个峰有 C_{28} 重排馏烷相重合， C_{29} 馏烷的 $\beta\beta$ 有 5β 馏烷干扰），而我们所用的30 m SE—54柱， C_{27} 馏烷4个峰分离更好，定量准确，对讨论低成熟度原油可能更为有利。我们还计算了39个油样的 $5\alpha C_{27}\beta\beta/(\alpha\alpha+\beta\beta)$ 及 $5\alpha C_{29}20S/(20S+20R)$ 的相关系数为0.87，回归方程为 $y=1.0155x-0.0307$ ； $5\alpha C_{29}\beta\beta/(\alpha\alpha+\beta\beta)$ 及 $5\alpha C_{29}20S/(20S+20R)$ 的相关系数为0.75，回归方程为 $y=0.5334x+0.1638$ ，可见研究原油的成熟度序列，可能还是以前者为好。

图3和图4相对照，在18—20号指标附近的样品点，如义60井沙一段生油岩（埋

深 2900 m, CPI 为 1.30)、义 51 井沙一段生油岩 (埋深 2400 m, CPI 为 1.56)、青东

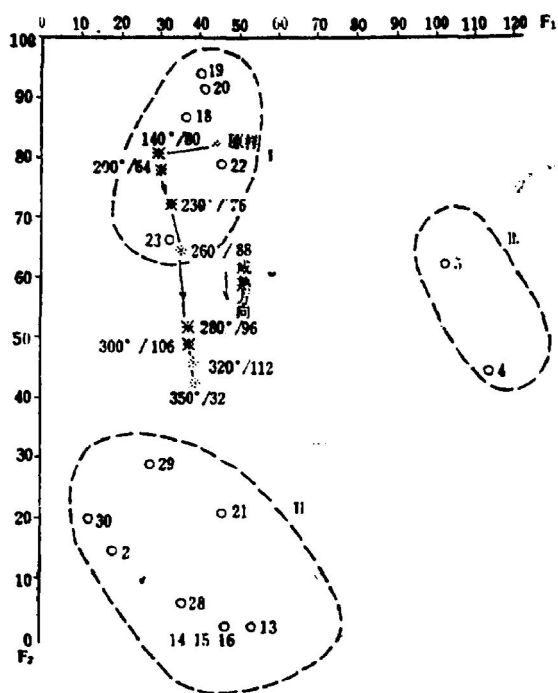


图 3 68个样品, 16个指标主因子轴平面点聚图 (指标部分)

1 井沙三段生油岩 (埋深 1850 m, CPI 为 3.03, R_o 为 0.38%) 等, 都是未熟或低熟生油岩。但车古 9 井沙一段原油样点, 也落在这些点群内, 证实确有未熟或低熟原油存在。而图 4 中 13—16 号指标一端控制的分布区内, 大部是桩西古潜山奥陶系储层原油, 它们的埋深为 3500—5000 m, 油层温度在 150℃ 左右, 饱和烃主峰为 C_{14} — C_{16} , 是比较典型的高成熟原油。至于图 3 中的 II 类指标, 若对照图 4, 可见如肖 4、滨 28、临 25—3 等井原油, 其饱和烃色谱大部已是异构烷烃为主, 有的正烷烃几乎因生物降解已蚀变净尽 (肖 4 井)。这些原油常处于含油凹陷边部地层超覆或断裂发育的浅部 (1500m 左右) 储层中, 正/异链烷烃一般小于 3, 比重在 0.90 以上。

II 类指标的空间位置对我们的启示是, 研究原油的成熟度要注意生物降解作用

对生物标志物指标值的影响。当生物降解作用严重时, 正常甾烷中 $14\alpha(H)$ 、 $17\alpha(H)$ 构型甾烷已被消耗, 有可能使 $14\beta(H)$ 、 $17\beta(H)$ 构型的甾烷突出, 重排甾烷也相对增加, 此时藿烷则可能脱掉甲基或发生 C 环裂开^[5]。我们已发现可列入 II 类原油的金 7 井 (埋深 700m) 有较完整的去甲基藿烷系列¹⁾, 其 14、15 号指标亦是高值, 可以误认为高成熟油。所以在研究原油的成熟度时, 最好将这类样品剔除。按济阳坳陷各时代储层 170 个油样统计, 以 $Ph/nC_{18} < 3$ 、 $nC_{11}-C_{34}/iC_{15}-C_{21} > 3$ 的原油受生物降解作用较小, 可以选样研究成熟度。这可能受区域限制, 不是普遍规律。

经过两次 R 型分析, 说明原油成熟度的较好指标是甾烷 $5\alpha C_{27}\beta\beta / (\alpha\alpha + \beta\beta)$ 、 $5\alpha C_{29}20S / (20S + 20R)$, 其次如重排甾烷、4-甲基甾烷及藿烷 Tm/Ts 等可作为辅助指标。对于济阳坳陷原油来说, Pr/C_1 及 Ph/C_{18} 除用于解释成熟度外, 要特别注意生物降解作用带来的异常信息。

三、济阳坳陷原油的成熟度

原油成熟度这个概念, 世界上的学者对它还有不同的认识。西德 D. H. Welte 教授在临邑盆地与我们合作研究时, 认为储层中原油的成熟度反映烃类生成和运移时的成熟情况; 由于一般储层温度比生油层低, 原油在储层中不可能再增大成熟度。这种认识正是

1) 李辉祥, 1986, 济阳坳陷重质油的地球化学特征及成因。

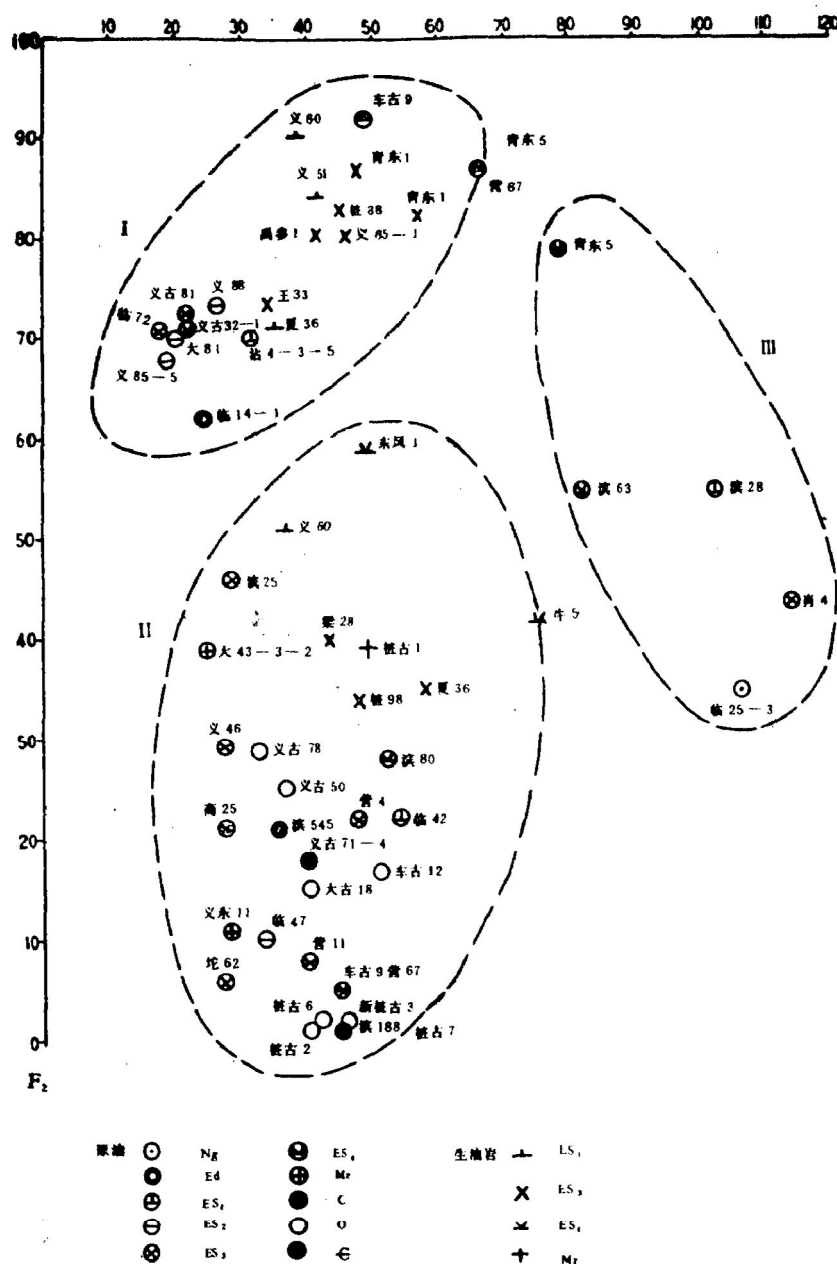


图4 68个样品、16个指标主因子轴平面点聚图(样品部分)

油源对比的依据。美国 J.M.Hunt 博士则认为：“在漫长的地质经历中，地温使储层中烃类的分子结构连续地向着稳定平衡状态变化”^[6]，原油在储层中尚有热成熟作用。我们的看法是：在陆相块断盆地中，由于持续沉降和块断活动频繁所形成的复式构造格局，油气生成、运移、聚集以及在储层中的后期改造，可能更为复杂。纵观现在各储层中的原油，有的可能保持着其生成、运移时的本来面目；有的在储层中持续了烃类的加热史；有的受到后期改造而面目全非。总之，原油的物理、化学特征受有机质类型、成熟度、氧化降解、运移时的逸失等几个因素的控制，可以认为，任何一个原油样品都

是多维因素空间坐标系中的一个点。这样,我们要专一研究原油的成熟度序列,一定要选择样品,尽量缩小其他因素的干扰。

根据广义对应分析对原油成熟度指标的选择,对济阳坳陷10个储层170个原油样品,首先采用甾烷构型异构化的两个指标做出图5,展现出原油成熟度序列总的特征。图中 $5\alpha C_{27}\beta\beta/(\alpha\alpha+\beta\beta)$ 分布在0.06至0.6之间,而 $5\alpha C_{29}20S/(20S+20R)$ 为0.1—0.7,有较好的线性关系。沾化-车镇凹陷的原油样点,从低成熟至高成熟都有,比东营凹陷样品分布更为广泛。考虑不同凹陷有机质性质的差异,仅取沾-车凹陷大都以沙三段及沙一段为油源岩的72个样品做回归分析,进一步研究两个指标的相关关系。用PC-1500计算机计算,打印出表4中7个回归方程。回归式 $y=1.0221x-0.0486$ (式中 $x=5\alpha C_{29}20S/(20S+20R)$, $y=5\alpha C_{27}\beta\beta/(\alpha\alpha+\beta\beta)$)的相关系数最大(为0.85),回归曲线基本上是一条过原点的直线。这说明这些油样代表着一个统一的成熟度序列。

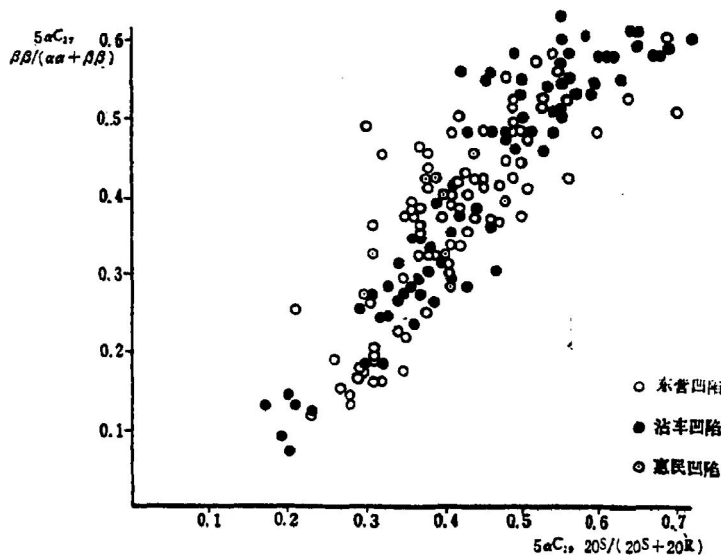


图5 济阳坳陷原油的成熟度序列

然而,具体表征成熟度需要用镜质体反射率(R_o)值。原油中不可能含有镜质体,但可用生物标志物指标为中介,以生油岩的 R_o 值标定原油的成熟度。我们选取沾车凹陷沙三段和沙一段深灰色泥岩,推定了 R_o 值并分析了生物标志物,然后做生油岩样品两个生标物指标的回归计算,其回归式为 $y=0.9147x-0.0620$,相关系数为0.93。从图6可见原油和生油岩的回归直线很接近,表现出密切的亲缘关系。从图6右下侧小图还可以看出,生油岩的 R_o 值同 $5\alpha C_{27}\beta\beta/(\alpha\alpha+\beta\beta)$ 及 $5\alpha C_{29}20S/(20S+20R)$ 都是直线相关,相关系数分别为93%及92%,证明可以用这两个指标为中介以确定原油的成熟度。沾车凹陷生油岩成熟门限的 R_o 值为0.44%(相当于2400m, 93℃),据图6中生油岩样点旁标出的 R_o 值,这个界限大体上相当于 $5\alpha C_{27}\beta\beta/(\alpha\alpha+\beta\beta)=0.25$, $5\alpha C_{29}20S/(20S+20R)=0.35$ 。低于这个界限(在图6中以点划线框出)的原油为低成熟油。同时在成熟度序列的另一端,参照古潜山原油样点的分布,暂定高成熟油的界限为 $5\alpha C_{27}\beta\beta/(\alpha\alpha+\beta\beta)>0.5$, $5\alpha C_{29}20S/(20S+20R)>0.55$ 。图6的资料也说明了,除去高成

表4 72个原油样品的回归方程

编号	方程式名称及通式	系数a	系数b	相关系数
1	直线 $y=a+bx$	-0.048582	1.022139	84.5269%
2	双曲线 $\frac{1}{y}=a+\frac{b}{x}$	-1.060833	1.684240	71.4022%
3	幂函数 $y=ax^b$	1.070993	1.245566	82.0248%
4	指数函数 $y=ae^{bx}$	0.096481	3.015055	80.5123%
5	指数函数 $y=ae^{b/x}$	1.049491	-0.419165	70.7266%
6	对数函数 $y=a+b\lg x$	0.756677	0.942395	83.4660%
7	S曲线 $y=1/a+be^{-x}$	-0.191553	17.526433	60.1882%

熟油，生油岩和原油可以基于相似成熟度进行油源对比，而高成熟油的甾烷构型异构化已达到终点值（相当于 R_o 值为0.55—0.70%），其油源岩对比应考虑其他指标。

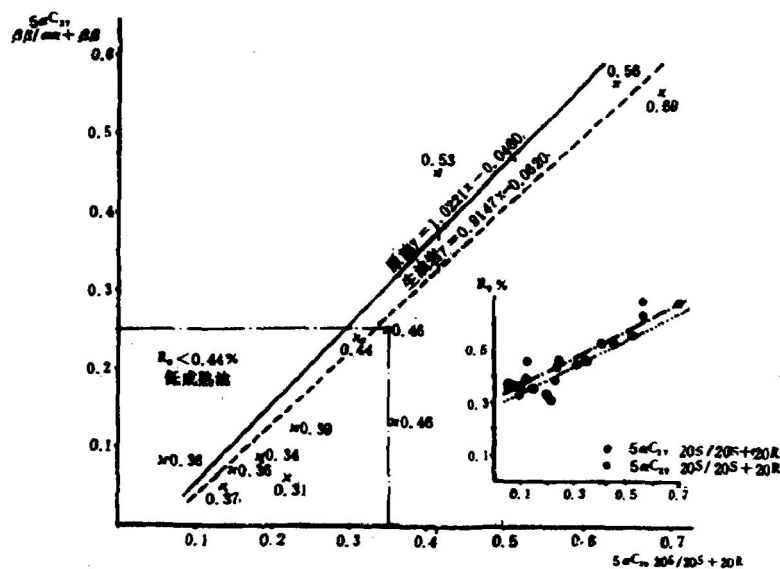


图6 沾-车凹陷原油和生油岩成熟度比较

低成熟油和高成熟油，地质-地球化学特征明显不同。位于低成熟区的原油，剔除一些生物降解油，有16个样品，分布在济阳拗陷埋深1100—3100m沙三、沙一、东营及馆陶组中。储层多在凹陷边缘、凸起上的超覆、潜山上的披覆地层内，也有个别在凹陷中的隆起带边缘。原油比重0.87—0.91，其族组成特征是芳烃组分偏高，占总烃25%左右，饱和烃/芳烃平均为3.2。芳烃红外光谱证实常带有长侧链烷基，是非特征性芳烃。低熟油甾烷具低异构化特征，重排甾烷及4-甲基甾烷均不发育，甾烷中以 $17\alpha 21\beta C_{30}$ 甾烷为主， $Tm/Ts > 1$ 。沾化凹陷沙一段低熟油的甾烷还发现 $5\alpha C_{26}$ — $5\alpha C_{29}$ 系列和 $5\beta C_{27}$ — $5\beta C_{29}$ 系列并存，在东营凹陷低熟油中则未见。低熟油的甾、萜烷指纹图和低熟生油岩很相似。高成熟油有20几个样品，均采自古潜山油藏、基岩油藏以及埋深在

3000m以下的沙三、沙四段构造、岩性油藏中的储层。储层最深达 5000m, 处于高地温梯度地带。原油比重为 0.84—0.86。饱和烃含量高, 据 20 几个样品统计, 饱/芳平均为 5.6, 芳烃只占总烃的 16%。高熟油的甾、萜烷指纹图比较复杂, 重排和 4-甲基构型异构化都很发育, 有的可以和成熟度较高的生油岩相比较。

研究原油的成熟度序列, 确认低熟油的存在对陆相油气生成及勘探可能有重要意义。低熟油有可能是某些生物体中烃类或是微生物转化烃类的早期富集, 也可能是富氢干酪根在一般确认的成油门限之上所形成的烃类聚集。在评价烃类生成门限之上的浅层泥岩的资源时, 决不能忽视其油气潜力。低成熟原油也是早期油气运移的证据。在陆相块断盆地中, 油气的生、排、运、聚不是同期或一次完成的, 很可能是以多类油源、多次运移、多断裂通道、多种圈闭形式, 形成多种类型的油气藏。

本文承蒙阎汉杰、鄢华荣、曹爱娟等同志帮助, 杨文宽等同志提了不少改进意见, 在此一并致谢!

参 考 文 献

- [1] 余金生、李裕伟, 1985, 地质因子分析, 地质出版社。
- [2] 周光甲等, 1984, 石油与天然气地质, 第5卷, 第2期。
- [3] 杨文宽, 1986, 石油与天然气地质, 第7卷, 第2期。
- [4] 王新洲, 1983, 沉积学报, 第1期。
- [5] Seifert, W. K. and Moldowan, J. M., 1979, *Geochim. Cosmochim. Acta*, 43(1), P.111—126.
- [6] Hunt, J. M., 1979, *Petroleum Geochemistry and Geology*. The Maple-Vail Book Manufacturing Group.

SCREENING OF BIOMARKER INDICES BY GENERALIZED CORRESPONDENCE ANALYSIS

—DISCUSSION ON CRUDE OIL MATURITY OF JIYANG DEPRESSION

Zhou Guangjia

(Geological Research Institute, Shenli Oilfield)

Abstract

Based on the data of 30 biomarker indices of 39 crude oil samples and 29 source rock samples collected in the Jiyang Depression, Huabei Basin, the author screened these indices by generalized correspondence analysis. It is suggested that the $5\alpha\text{-C}_{27}$ Sterane $\beta\beta/(\alpha\alpha+\beta\beta)$ and $5\alpha\text{-C}_{29}$ Sterane $20S/(20R+20S)$ are the main indices of crude oil maturity, while the relative abundance of rearranged Sterane, 4-methylsterane and Tm/Ts are of secondary importance.