

源岩吸附烃和天然气轻烃指纹 参数的开发和应用

胡惕麟 戈葆雄 张义纲 刘 斌

(地质矿产部石油地质中心实验室, 无锡)

通过源岩吸附烃和天然气轻烃指纹特征的研究, 开发并筛选出甲基环己烷指数 (MCH) 和环烷指数 I (CA₁), 分别作为轻烃指纹中最佳的母质类型参数和成熟度参数。运用轻烃指纹参数指标, 可以识别天然气和源岩的母质类型、成熟度等特征; 进行气/气、气/源岩直接对比, 追索气源岩, 为天然气成因分类和气源岩评价提供一种快速有效、简便经济的新方法。

源岩吸附烃和天然气均是源岩中有机质在不同演化阶段生成的烃类气体, 由于源岩中有机质本身和矿物基质对烃气的吸附作用, 因而在源岩中滞留有部分的烃类气体, 用机械方法 (快速切削搅拌脱气装置) 使之脱附的烃类气体称为源岩吸附烃。不言而喻, 天然气和源岩吸附烃均与源岩有机质有密切的成生亲缘关系, 它们在轻烃指纹组成上具有十分相似的特征, 为同源成生的异地物。

关于源岩吸附烃的分析, 过去由于受技术条件所限, 脱气效率低, 分辨率差, 对天然气和源岩吸附烃C₁—C₆指纹信息, 尤其是烃C₅及其后组成的指纹信息, 因其浓度太低而难于检出, 因此对源岩吸附烃和天然气轻烃指纹参数的开发和应用受到了一定程度的限制。近年来, 我室对岩样脱气技术和色谱分析测试技术进行了研究, 并不断改进、完善和提高。目前对源岩和天然气中含量在ppb级的烃气C₁—C₆组份的分析测试^①, 可鉴定出烃化合物达百种以上 (图1-1、2, 表1), 获得了较满意的有效的色谱指纹信息。

研究的气、岩样品采自四川、华北和东北等地区, 共计200余件 (气样108件、岩心样112件), 均由我室詹智玉分析测试和鉴定。

一、轻烃指纹的母质属性——母质类型参数的开发和应用

Leythaeuser (1979) 指出来源于腐泥型母质的轻烃组成中富含正构烷烃, 而来源于腐殖型母质的轻烃组成中则富含异构烷烃和芳烃; Snowdon (1982) 认为富含环烷烃的凝析物也是陆源母质的重要特征; Thompson (1979、1983、1987) 曾分别提出苯/正己烷、庚烷值、甲苯/正庚烷等参数与源岩干酪根类型有关。

①章复康, 1988, 气源岩中C₁—C₆轻烃同位素及C₁—C₆轻烃指纹分析方法, 75-54-01成果交流会论文摘要汇编。

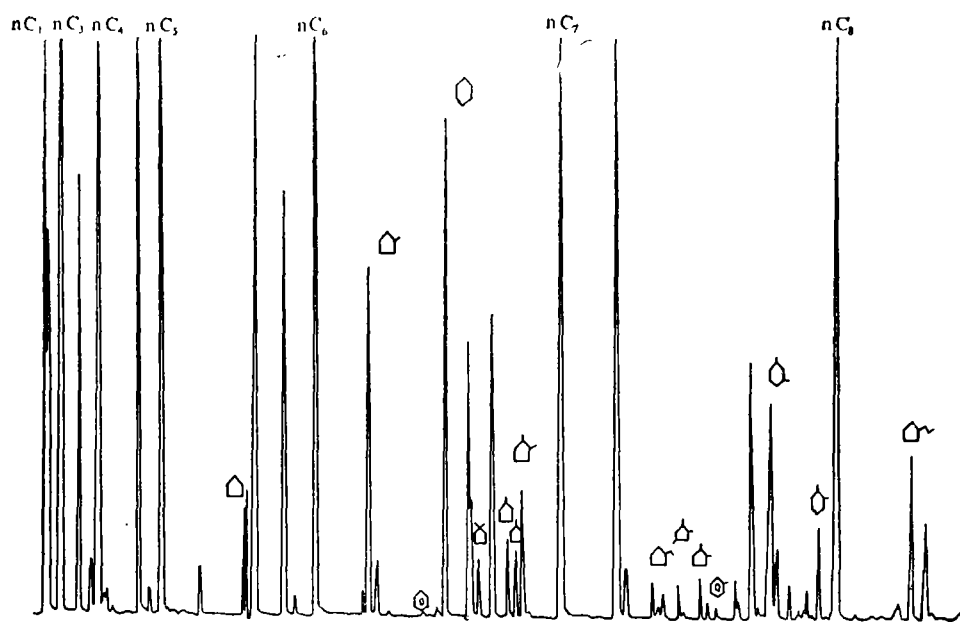
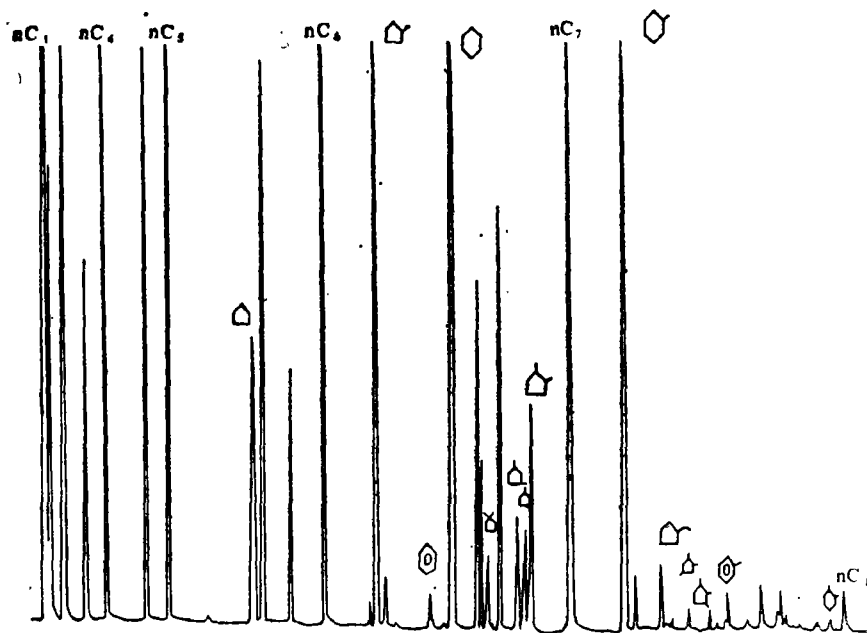
图1-1 南松辽红16井K₂qn岩样吸附烃谱图(腐泥型)图1-2 南松辽乾安4-7井K₂qn天然气烃指纹(腐泥型气)

表 1 烃指纹可鉴定的单烃化合物名称表

碳数	烃化物	脂 族 烃		芳香烃
		正 构 烃	异 构 烷 烃	
C ₁	甲 烷			
C ₂	乙 烷			
C ₃	丙 烷			
C ₄	正丁烷	2-甲基丙烷		
C ₅	正戊烷	2-甲基丁烷 2,2-二甲基丙烷 (偕二甲基)	环戊烷	
C ₆	正己烷	2-甲基戊烷 3-甲基戊烷 2,2-二甲基丁烷 (偕二甲基) 2,3-二甲基丁烷	环己烷 甲基环戊烷	苯
C ₇	正庚烷	2-甲基己烷 3-甲基己烷 2,4-二甲基戊烷 2,3-二甲基戊烷 3-乙基戊烷 2,2-二甲基戊烷 (偕二甲基) 3,3-二甲基戊烷 (偕二甲基) 2,2,3-三甲基丁烷 (偕二甲基)	甲基环己烷 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 (偕二甲基) 乙基环戊烷	甲苯
C ₈	正辛烷	2-甲基庚烷 3-甲基庚烷 4-甲基庚烷 2,5-二甲基己烷 2,4-二甲基己烷 2,3-二甲基己烷 2-甲基3-乙基戊烷 2,2-二甲基己烷 (偕二甲基) 3,3-二甲基己烷 (偕二甲基) 2,2,4-三甲基己烷 (偕二甲基)	1顺3-二甲基环己烷 1反4-二甲基环己烷 1反2-二甲基环己烷 1反3-二甲基环己烷 1顺2-二甲基环己烷 1,1-二甲基环己烷 (偕二甲基) 乙基环己烷 1-甲基顺3-乙基环戊烷 1-甲基反3-乙基环戊烷 1-甲基反2-乙基环戊烷 三甲基环己烷 (各构型的)	乙基苯 邻二甲苯 对二甲苯 间二甲苯
C ₉	正壬烷	略	略	

研究发现, 源岩吸附烃和天然气 (C₁—C₉) 中烃C₅及其后的烃类化合物, 它们在浓度上仅为全烃组成的1%左右。但由于其具有不同结构和各种构型的单烃化合物较多, 地质、地化内涵十分丰富, 尤其是烃C₆和C₇组成中各个单体烃浓度相对较高, 并在一定的演化阶段中, 显示了较好的热力学稳定性。它们经适当的优化组合或聚类分析及筛选, 发现六员环烃 (环己烷、或甲基环己烷) 在不同母质类型的源岩和天然气中有较明显的差异, 同时还发现不同碳数 (C₅、C₆和C₇) 的脂烃族组成 (正、异和环烷烃) 受生源母质类型的影响而存在一定的差异。因此提出甲基环己烷指数● (MCH指数)、环

●胡锡麟等, 1988, 应用天然气和源岩吸附烃指纹特征直接对比识别气源岩研究, 75-54-01成果交流会论文摘要汇编。

己烷指数 (CH指数) 和脂烃族组成均可作为烃指纹母质类型参数, 以区分不同类型的源岩和天然气。

(一) 甲基环己烷指数 (MCH指数)

1. 甲基环己烷指数及其地化意义

甲基环己烷指数系指烃 C_7 中六员环烃 (甲基环己烷)、五员环烃 (各构型的二甲基环戊烷和乙基环戊烷) 和直链烃 (正庚烷) 三端元组成的三元图。六员环烃 (甲基环己烷) 归一百分含量, 计算公式为:

甲基环己烷指数 (MCH指数)

$$= \frac{\text{六员环烃 (MCH)} \times 100\%}{\text{六员环烃 (MCH)} + \text{五员环烃 (RCPC}_7\text{)} + \text{直链烃 (nC}_7\text{)}}$$

式中: MCH为甲基环己烷; RCPC $_7$ 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、乙基环戊烷; nC $_7$ 为正庚烷。

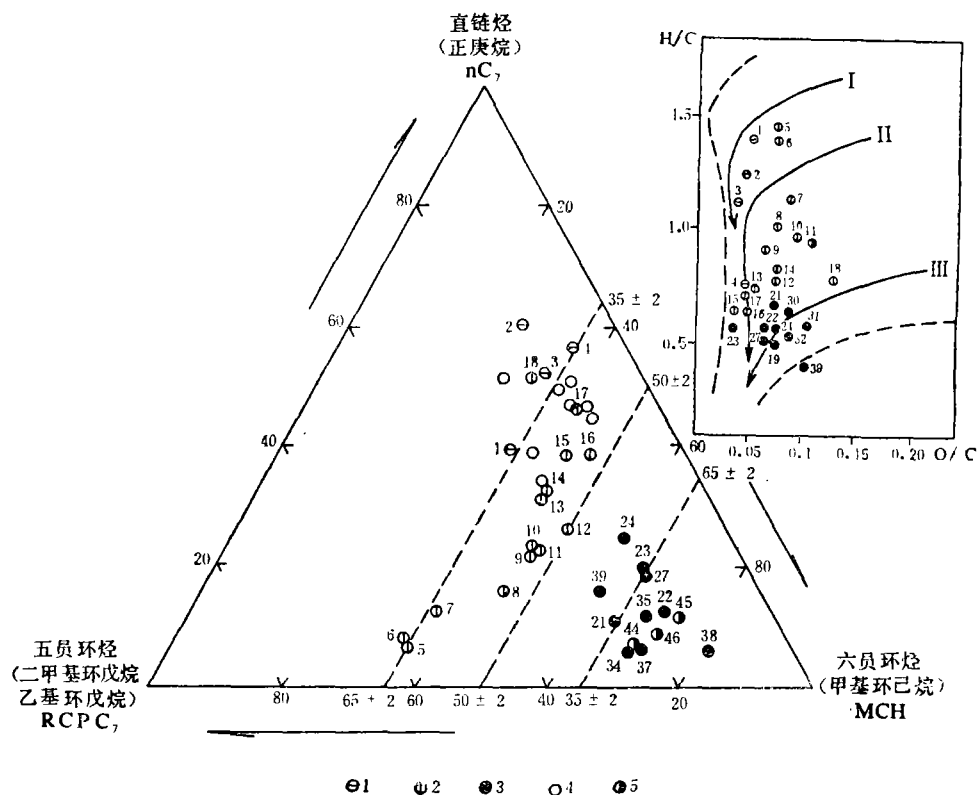


图2 不同沉积环境、不同母质类型源岩甲基环己烷指数 (MCH) 分布图

(样品编号与表2对照使用)

1. 腐泥 I 型 (I 型) 2. 腐泥 II 型 (II 型) 3. 腐殖型 (III 型) 4. 海相腐泥型 (IV 型) 5. C-P 煤岩

表2 不同沉积环境、不同母质类型源岩吸附烃的甲基环己烷指数(MCH指数)、环己烷指数(CH指数)数据表

样 品 编 号	地 区 或 盆 地	层 位	沉积环境及源岩岩性	干酪根 类 型	母 质 类 型 参 数			
					MCH指数 (%)	划分指标	CH指数 (%)	划分指标
1、2、3	松辽	K _{2qn} K _{2n}	较深-深湖相	腐泥Ⅰ型 (Ⅰ型)	26—34	<35±2	12—20	
4	四川	J _{1z}	暗色泥质源岩		35		21	
5、6、7、8	华北	E _s ³ E _s ¹	浅湖-较深湖相	腐泥Ⅰ型 (Ⅰ型)	33—43	35—50±2	9—20	<27±2
16、17	四川	J _{1z}			41—47		17—27	
9、10、 13、15	阜新 松南	J ₃	暗色泥质源岩		42—46		17—29	
27、39	松辽南	K _{1d}	滨湖-浅湖相	腐殖型 (Ⅱ型)	59—64	50—65±2	41—43	
23、24	四川	J _{1m}	暗色泥质源岩		59—64		35	
22、21	阜新	J ₃	沼泽相-湖沼相	腐殖型 (Ⅱ型)	64—71	>65±2	36—46	>27±2
37、38	四川	T _{3x}	暗色泥质源岩		70—82		44—56	
34、35	华北	C—P	滨海沼泽相暗色泥质源岩	(Ⅱ型)	68		37—49	
44、45、 46	华北	C—P	滨海沼泽相煤岩		69—73		44—55	
47、48 14、18	华北	O ₂	浅海碳酸盐岩源岩	腐泥型 (Ⅰ、 Ⅱ型)	32—52	30—50±2	15—22	<27±2
50、51 52、54、55	四川	T _{1j}	暗色灰质云岩、云质灰岩		37—43		17—26	

由于六员环烃(甲基环己烷)主要来自高等植物的木质素、纤维素和糖类,它们是腐殖型母质(Ⅲ型干酪根)的主要组成物,也就是说六员环烃主要来自腐殖型母质。五员环烃(各种构型的二甲基环戊烷和乙基环戊烷)主要来自水生生物甾族类化合物和萜类化合物中的环状类脂体;直链烃(正庚烷)的母源较复杂,主要来自细菌和藻类,也可来自高等植物的链状类脂体。这些不同结构的环状和链状类脂体均是富氢结构的腐泥型母质(Ⅰ型和Ⅱ型干酪根)的主要组成物,因此三元图(图2)中六员环烃(甲基环己烷)的相对含量可以正确地、清晰地反映出源岩不同的母质属性和类型特征。

2. 甲基环己烷指数的分布及指标的划分

表2和图2分别列出和标绘了松辽、阜新、华北和四川等地区源岩吸附烃甲基环己烷指数值。由于源岩沉积环境和母质类型的不同,甲基环己烷指数存在着明显的差异,因此可以把甲基环己烷指数三元图划分为四个区块,分别表示其不同的沉积环境和母质类型特征(图3)。

Ⅰ区为较深湖-深湖相腐泥Ⅰ型(Ⅰ型)源岩分布区,甲基环己烷指数值<35±2%;

Ⅱ区为浅湖-较深湖相腐泥Ⅱ型(Ⅱ型)源岩分布区,甲基环己烷指数值为35±2—50±2%;

Ⅲ区为滨湖-浅湖相腐殖型(Ⅲ型)源岩分布区,甲基环己烷指数值为50±2—65±2%;

Ⅳ区为各种沼泽相、湖沼相腐殖型(Ⅲ型)源岩和煤岩分布区,甲基环己烷>65±2%。

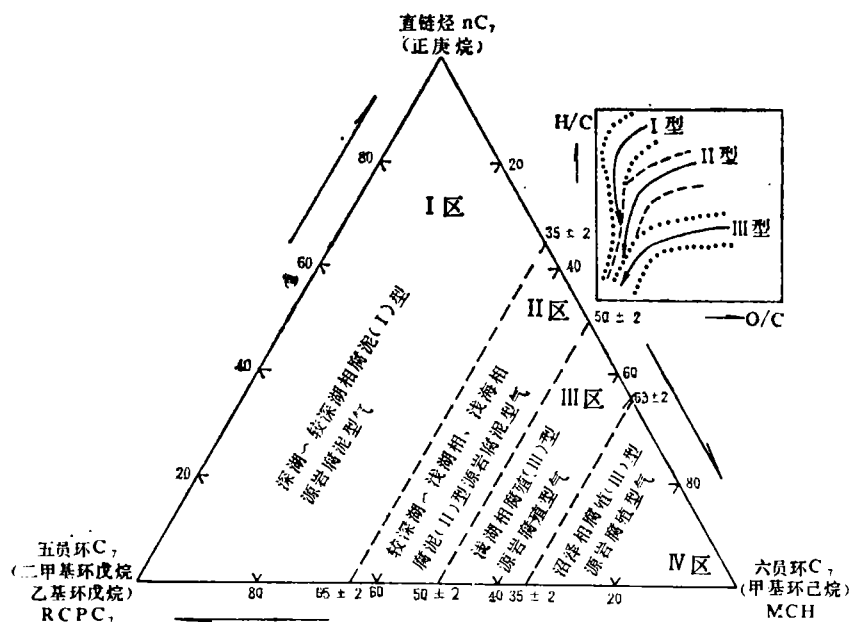


图3 源岩吸附烃、天然气烃指纹指示的沉积环境和母质类型框图

海相碳酸盐岩源岩，其母质大部分属腐泥Ⅱ型（Ⅱ型），因而与湖相腐泥Ⅱ型源岩分布相同，也位于Ⅱ区内。

考虑到源岩母质类型上存在过渡的特征以及色谱分析偏差和误差等因素，对类型指标的界线允许作 $\pm 2\%$ 的游动，是必要和可取的，这样对判别源岩母质属性时更能符合客观实情。

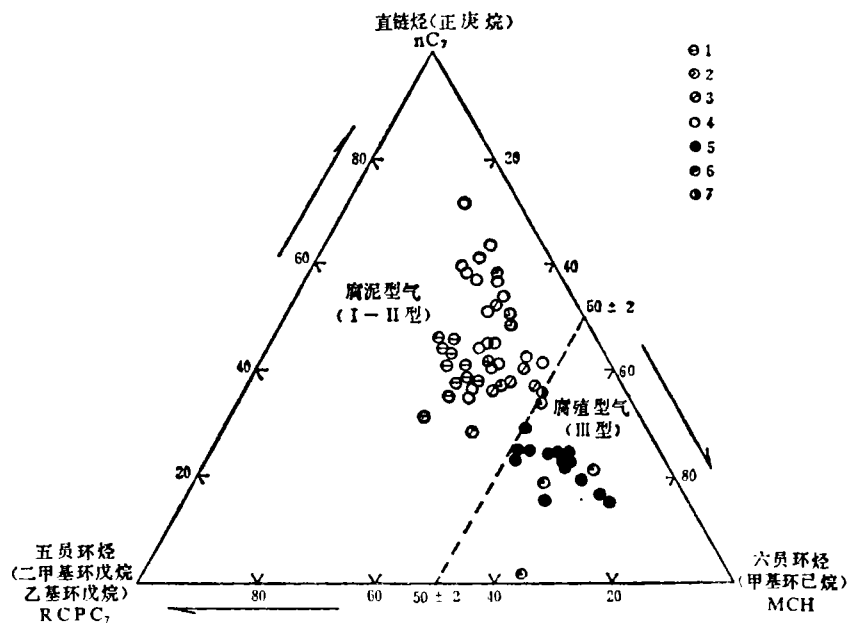


图4 不同类型天然气甲基环己烷(MCH)指数分布图

1. E₅ (华北), 2. K₂ (松辽), 3. J₁ (四川), 4. T_{1j}, T_{1l} (四川), 5. T_{1x} (四川),
6. K₁, J₁ (松辽) 7. F₁ (鄂尔多斯)

3. 母质类型参数甲基环己烷指数的应用

甲基环己烷指数不但可以区分不同母质类型的源岩,也可根据天然气和源岩吸附烃的成生亲缘关系区分天然气的母源属性,以甲基环己烷指数值 $50 \pm 2\%$ 为界, $<50 \pm 2\%$ 的为腐泥型(I型、II型)母质成生的腐泥型气; $>50 \pm 2\%$ 为腐殖型(III型)母质成生的腐殖型气。

图4为我国东部地区几个主要产层天然气甲基环己烷指数分布图。华北地区下第三系沙河街组(Es)、松辽地区中白垩统松花江群(K₂)和四川地区下侏罗统大安寨组(J_{1z})、三叠系下统嘉陵江组(T_{1j})及中统雷口坡组(T_{2l})等产层的天然气,甲基环己烷指数值均 $<50 \pm 2\%$,为腐泥型天然气。而其他层位如四川上三叠统须家河组(T_{3x})、松辽下白垩统(K₁)或上侏罗统(J₃)以及鄂尔多斯地区下二叠统(P₁)等产层的天然气,甲基环己烷指数值 $>50 \pm 2\%$,均属腐殖型气。由此可见应用甲基环己烷指数三元图,可以成功地区分不同母质成生的天然气。但是天然气因运移过程中存在着组份分馏和吸收轻重组份等因素的影响,因此应用甲基环己烷指数三元图区分天然气母质属性时,应特别注意并判别和排除上述因素的干扰,以免得出不恰当的结论。

(二) 环己烷指数(CH指数)

环己烷指数是指环己烷(六员环烃)、甲基环戊烷(五员环烃)和正己烷(直链烃)三端元组成的三元图(图5)。环己烷的相对百分含量即:

$$\text{环己烷指数(CH指数)} = \frac{\text{环己烷(CH)} \times 100\%}{\text{环己烷(CH)} + \text{甲基环戊烷(MCP)} + \text{正己烷}(nC_6)}$$

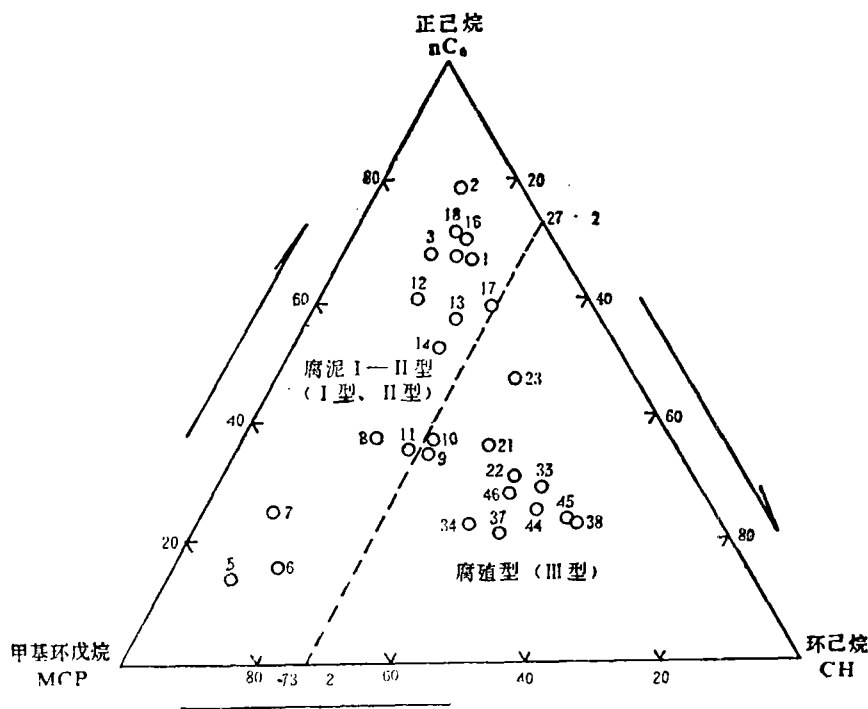


图5 源岩吸附烃环己烷(CH)指数分布图
(样品编号与表2对照使用)

环己烷指数 (CH指数) 三元图与甲基环己烷指数 (MCH指数) 三元图结构相类似, 因此其表征的地化意义也基本相同, 环己烷指数的变化同样反映了源岩母质类型属性的特征。

表2、图5分别可见, 腐泥型 (I型、II型) 源岩的环己烷指数值 $< 27 \pm 2\%$, 腐殖型 (III型) 源岩的环己烷指数值 $> 27 \pm 2\%$ 。环己烷指数在区分腐泥I型和II型的沉积环境、母质属性等特征不如甲基环己烷指数为好, 但它在区分腐泥型和腐殖型两大母质属性的源岩及其成生的腐泥型气和腐殖型气, 仍是具有一定的使用价值的一个母质类型指标。

(三) 脂烃族组成

脂烃族组成即某一碳数烃类中直链烃 (正构烷)、支链烃 (异构烷) 和环烃 (五员环和六员环烷) 组成的归一百分含量, 一般常用正、异、环烷烃三端元组成的三元图式表示。不同沉积环境、不同母质类型的源岩及其成生的天然气, 具有不同的脂烃族组成特征。

1. 天然气不同碳数 (烃 C_5 、 C_6 和 C_7) 脂烃族组成分布特征

图6是四川地区不同层系天然气烃 C_5 、 C_6 和 C_7 脂烃族组成三元图。其中, 上三叠统须家河组 (T_3x) 的脂烃族组成中正构烷烃的含量低, 异构烷烃和环烷烃含量高, 点群分布在三元图的左下方; 下侏罗统大安寨组 (J_1z) 的脂烃族组成中, 正构烷烃和环烷

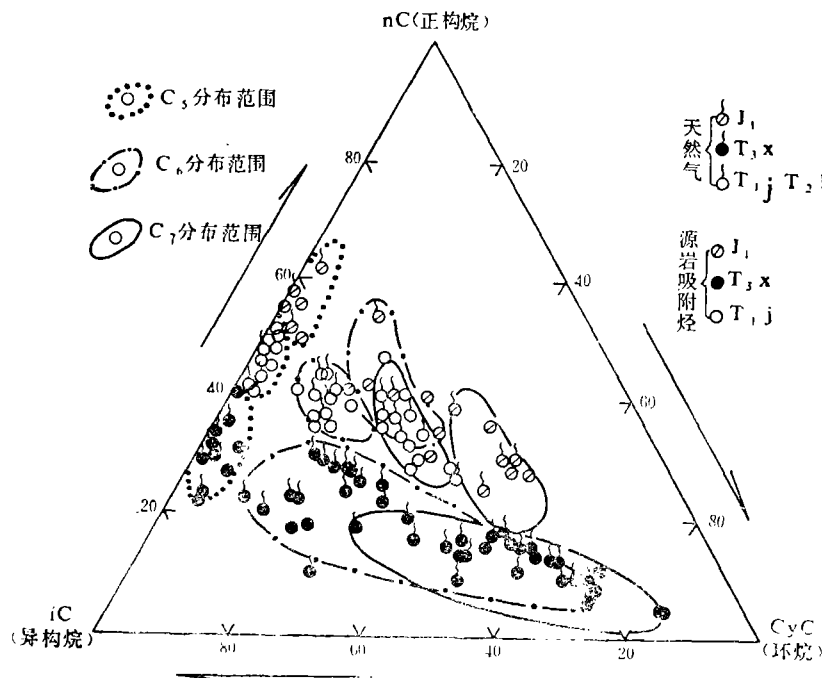


图6 四川地区 J_1z-T_{1j} 的 C_5 、 C_6 、 C_7 脂烃族组成分布图

烃含量较高,异构烷烃含量偏低,点群分布在三元图右上方;下三叠统嘉陵江组(T_1j)和中三叠统雷口坡组(T_2l)的脂烃族组成具有十分相似的特征,其正构烷烃和异构烷烃的含量相对较高,环烷烃含量低,点群分布在大安寨组和须家河组点群之间,处于三元图的中部。上述三个层位的脂烃族组成,随着烃碳数的增大而有规律地向环烃极端收敛呈帚状展布。

2. 脂烃族组成与源岩干酪根类型的关系

众所周知,烃类是干酪根热降解的产物,从已有地质、地化资料表明,须家河组(T_3x)为沼泽相、湖沼相含煤岩系沉积,源岩和煤岩的干酪根绝大多数属腐殖型(Ⅲ型);大安寨组(J_1z)为浅湖-较深湖相沉积,源岩干酪根以腐泥Ⅱ型(Ⅱ型)为主;嘉陵江组(T_1j)为浅海碳酸盐岩,源岩干酪根也以腐泥Ⅱ型(Ⅱ型)为主。上述三个层组源岩吸附烃的脂烃族组成与其相应层段产出的天然气脂烃族组成十分相近,它们之间具有成生的亲缘关系(图6)。这样从气与源岩直接对比证实了不同母质类型源岩及其成生的天然气具有不同的脂烃族组成特征。因此可以用不同碳数(C_6 、 C_8 和 C_7)烃类脂烃族组成三元图判别不同沉积环境、不同母质类型的源岩及其成生的天然气,同时还可以进行气/岩直接对比,追索生气源岩。

总观上述几个母质类型参数,由于其组成参数的轻烃指纹不同而各有利弊,其中以甲基环己烷指数对不同母质类型源岩的判别最为有效,但甲基环己烷指数不能反映烃类中异构烷烃的分布特征,对高成熟阶段后期($R^\circ > 1.7\%$)形成的天然气,判别其母质属性时不如脂烃族组成有效,但脂烃族组成对低成熟阶段源岩母质类型的判别上又不如甲基环己烷指数有效。环己烷指数仅能概略地区分腐泥和腐殖两大母质类型的源岩和天然气,同时其对演化程度较高而缺失 C_7 组成的天然气或源岩母质属性的判别有独到之处。因此判别源岩及其成生的天然气母质类型的属性时,各参数配合使用,以互补其不足,收效就更好。

二、轻烃指纹的热演化特征 ——成熟度参数的开发和应用

Thompson(1979)提出烷烃指数1(异庚烷值)和烷烃指数2(庚烷值)以表示轻烃热演化程度,近几年来这两个成熟度参数已广泛地应用于原油和凝析油的分类,Thomson于1987年又提出正庚烷/甲基环己烷,作为原油轻烃的成熟度指标。作者对源岩吸附烃和天然气轻烃指纹信息的研究,开发和筛选出环烷指数Ⅰ(CA_1)、环烷指数Ⅱ(CA_2)、环烷指数Ⅲ(CA_3)和二甲基环戊烷指数(DMCP)等成熟度参数,可以较有效地判别不同母质类型源岩及其成生天然气的热演化程度。

(一) 成熟度参数的筛选

在 C_6 和 C_7 组成中,根据同碳数不同结构和构型以及沸点相近的原则,按环烃/直链烃、环烃/链烃、五员环烃/六员环烃、直链烃/支链烃等多种配比方式,组建成各种

具有不同地化意义的成熟度参数。表3列出了源岩三类（Ⅰ型、Ⅱ型和Ⅲ型）干酪根H/C原子比和吸附烃各个成熟度参数的数据；表4是各成熟度参数与H/C原子比的相关系数数据。由表3、表4可见，环烷指数Ⅰ（CA₁）具有最高的相关系数，环烷指数Ⅱ

表4 成熟度参数与干酪根H/C原子比相关系数数据

参数编号及代号	成熟度参数	相关系数r（干酪根H/C原子比的）			筛选结果
		腐泥Ⅰ型（Ⅰ型） n=4	腐泥Ⅱ型（Ⅱ型） n=15	腐殖型（Ⅲ型） n=9	
1 CA ₁	RCPC ₇ /nC ₇	0.8386	0.9481	0.6833	好
2 CA ₂	MCH/nC ₇	0.1964	0.8922	0.6214	较好
3 CA ₃	CYC ₇ /nC ₇ + Σ iC ₇	0.4923	0.8989	0.6962	较好
4 DMCP指数	nC ₆ + MC ₅ /DMCP	-0.2699	-0.8778	-0.7326	较好
5 异庚烷值	MC ₆ /DMCP	-0.9528	-0.8740	-0.4744	较差
6 庚烷值	nC ₇ /CH至MCH之间馏出物	-0.5983	-0.8374	-0.4808	差
7	DMCP/nC ₉	0.8677	0.8731	0.6004	较好
8	MCH/ nC ₇ + RCPC ₇ + MCH	-0.3754	-0.2492	0.5433	更差
9	MCH/DMCP	-0.9775	-0.9454	0.0729	差
10	nC ₇ /MC ₆	-0.2214	-0.6458	-0.6698	较差
11	Σ iC ₇ / Σ C ₇ (脂族)	0.1797	0.6671	0.6064	较差
12	nC ₇ + nC ₈ /MB + DMB	-0.4002	-0.6982	0.2351	更差
13	2-MP/nC ₆	0.4717	0.8006	0.5517	差
14	MCP/nC ₆	0.1390	0.9647	0.3994	差
15	MCP/MC ₆	0.5447	0.8661	0.1660	差
16	CH/MCP	-0.9364	-0.9062	0.2785	差

注：参数代号、名称见表3。

（CA₂）、环烷指数Ⅲ（CA₃）和二甲基环戊烷指数（DMCP指数）的相关系数也较高，是好至较好的成熟度参数。至于其他一些参数，包括Thompson提出的庚烷值和异庚烷值，其相关系数较小，因而作为源岩吸附烃和天然气的成熟度参数指标，在应用上有一定的局限性。

（二）几个主要成熟度参数与干酪根H/C原子比的演化特征

1. 环烷指数与H/C原子比的关系

环烷指数Ⅰ（CA₁）、环烷指数Ⅱ（CA₂）是烃C₇中五员环烃、六员环烃分别与直链烃之比；环烷指数Ⅲ（CA₃）是烃C₇中环烷烃与链烷烃之比，以公式表示为：

环烷指数Ⅰ（CA₁）= 五员环烃（RCPC₇）/直链烃（nC₇）

环烷指数Ⅱ（CA₂）= 六员环烃（MCH）/直链烃（nC₇）

环烷指数Ⅲ（CA₃）= 环烷烃（RCPC₇ + MCH）/链烷烃（nC₇ + Σ iC₇）

式中参数代号的意义见表3。

图7、图8和图9分别为环烷指数 I、环烷指数 II 和环烷指数 III 与三类干酪根 H/C 原

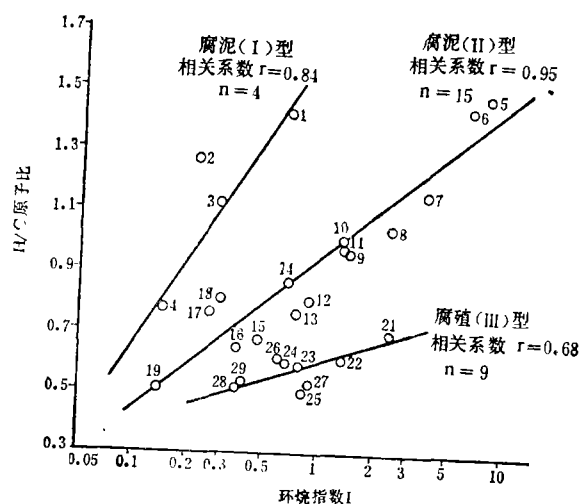


图7 不同类型干酪根H/C原子比与环烷指数 I 关系图

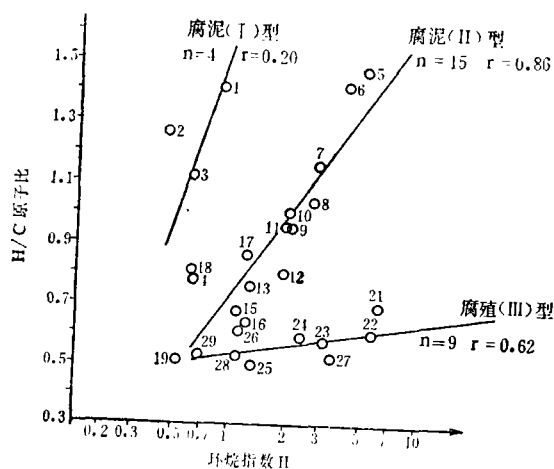


图8 不同类型干酪根H/C原子比与环烷指数 II 关系图

(样品编号与表3相对应)

子比的关系图。随着热演化程度的加深，各类干酪根H/C原子比与各环烷指数呈指数变化的正相关线性特征，它们各自的回归方程式为：

(1) 环烷指数 I (CA_1)

腐泥 I 型： $H/C \text{ 原子比} = 0.8098 \log CA_1 + 1.5852$

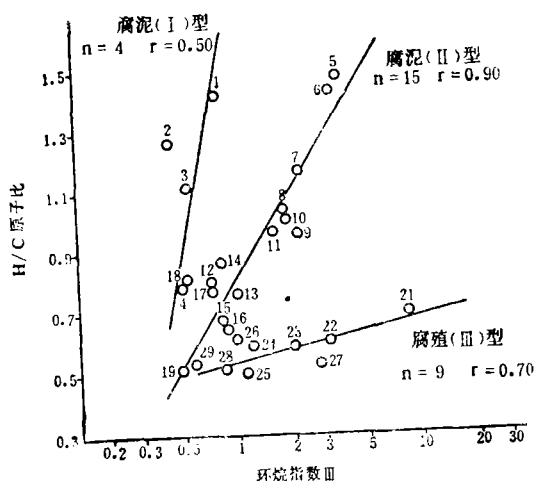


图9 不同类型干酪根H/C原子比与环烷指数Ⅲ关系图

$$n = 4 \quad r = 0.8386$$

腐泥Ⅰ型: $H/C \text{ 原子比} = 0.4906 \log CA_1 + 0.9156$

$$n = 15 \quad r = 0.9481$$

腐殖型: $H/C \text{ 原子比} = 0.1621 \log CA_1 + 0.5874$

$$n = 9 \quad r = 0.6863$$

(2) 环烷指数Ⅰ (CA_2)

腐泥Ⅰ型 $H/C \text{ 原子比} = 0.4370 \log CA_2 + 1.2319$

$$n = 4 \quad r = 0.1964$$

腐泥Ⅱ型 $H/C \text{ 原子比} = 0.8664 \log CA_2 + 0.7342$

$$n = 15 \quad r = 0.8922$$

腐殖型 $H/C \text{ 原子比} = 0.1120 \log CA_2 + 0.5321$

$$n = 9 \quad r = 0.6214$$

(3) 环烷指数Ⅲ (CA_3)

腐泥Ⅰ型 $H/C \text{ 原子比} = 1.1781 \log CA_3 + 1.4481$

$$n = 4 \quad r = 0.4923$$

腐泥Ⅱ型 $H/C \text{ 原子比} = 0.8447 \log CA_3 + 0.8418$

$$n = 15 \quad r = 0.8989$$

腐殖型 $H/C \text{ 原子比} = 0.1167 \log CA_3 + 0.5472$

$$n = 9 \quad r = 0.6962$$

式中n为样品数, r为相关系数。

当源岩或天然气的母质类型一旦被确定后, 根据环烷指数值即可求得相应的H/C原子比以判别其演化程度。但是随着热演化进程的加深, 烃类中烷基化程度不断加大, 环烷烃在热力作用下发生开环和脱甲基或芳构化等反应, 使环烷烃浓度急剧地变低乃至

消亡。因此由环烷烃配比组建的这类成熟度参数，其使用范围不得越过烃类演化的高成熟阶段，对过成熟阶段中的源岩和天然气不适用。

2. 二甲基环戊烷指数 (DMCP 指数) 与 H/C 原子比的关系

二甲基环戊烷指数是烃_{C₈}中正己烷、2-甲基戊烷、3-甲基戊烷之和与烃_{C₇}中三个不同构型的二甲基环戊烷之和的比值，公式表示为：

二甲基环戊烷指数 (DMCP 指数)

$$= \frac{\text{正己烷} + 2\text{-甲基戊烷} + 3\text{-甲基戊烷}}{1\text{反}3\text{二甲基环戊烷} + 1\text{顺}3\text{二甲基环戊烷} + 1\text{反}2\text{二甲基环戊烷}}$$

二甲基环戊烷指数随着各类干酪根 H/C 原子比值的下降呈指数关系增大，有负相关的线性特征 (图10)，其回归方程式为：

腐泥 I 型 H/C 原子比 = $-0.1700 \log \text{DMCP 指数} + 1.2567$

样品数 $n=4$ 相关系数 $r=-0.2699$

腐泥 II 型 H/C 原子比 = $-0.6183 \log \text{DMCP 指数} + 1.3545$

$n=15$ $r=-0.8778$

腐殖型 H/C 原子比 = $-0.2127 \log \text{DMCP 指数} + 0.7718$

$n=9$ $r=-0.7326$

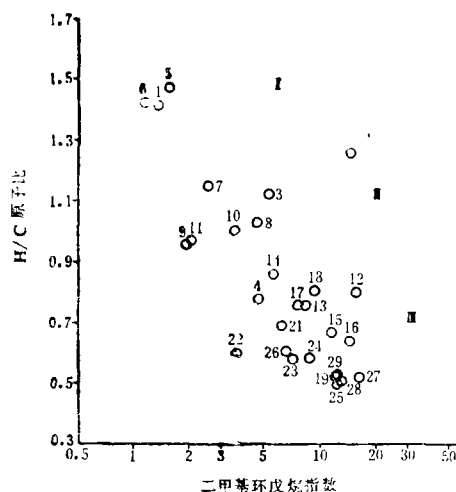


图10 不同类型干酪根 H/C 与二甲基环戊烷指数关系图

(图内样品号与表3相对应)

I. 腐泥 (I) 型 $n=4$ $r=-0.2699$

II. 腐泥 (II) 型 $n=15$ $r=-0.8778$

III. 腐殖型 (III) $n=9$ $r=-0.7326$

由于二甲基环戊烷指数受母质类型的影响较环烷指数要小些，各类型的回归线展布呈宽带状，三类样品 ($n=28$) 总的相关系数 $r_{\text{总}} = -0.7313$ 。

二甲基环戊烷指数所表征的地化意义是随着热力学作用的加强，演化进程加深，不同构型的二甲基环戊烷相应地发生脱甲基和开环作用而成为正己烷和甲基戊烷。二甲基环戊烷指数正是利用它们之间彼此消长的特性来反映烃类的热成熟作用。但是二甲基环戊烷指数与环烷指数相类似，对过成熟阶段的源岩和天然气不适用。

(三) 成熟度参数环烷指数 I (CA_1) 与镜质体反射率 R° 的关系

由于环烷指数 I (CA_1) 与源岩干酪根 H/C 原子比有最好的相关性而优于其他成熟度参数，但是用 H/C 原子比来反映环烷指数 I 的热演化程度不如用镜

质体反射率 R° 那样直感和方便。为此需建立环烷指数 I (CA_1) 与反射率 R° 的相关曲线图。由于源岩实测的镜质体反射率 R° 数据甚少，且与环烷指数 I 又极不配对，因此只可采

用过渡的间接方法来建立环烷指数 $I(CA_1)$ 与镜质体反射率 R^0 的相关模板图, 其步骤和依据如下:

1. 利用热解模拟实测的镜质体反射率 R^0 与干酪根 H/C 原子比数据 (表 5), 并参

表 5 热解模拟实验 R^0 、 H/C 原子比实测数据表

热模拟样品	茂名油页岩 (腐泥 I 型)								
实测参数									
R^0 (%)	0.36	0.45	0.50	0.76	1.20	2.03	2.58	2.78	
H/C	1.34	1.27	1.20	0.99	0.74	0.52	0.43	0.41	

热模拟样品	黄县褐煤 (腐殖 II 型)								
实测参数									
R^0 (%)	0.42	0.51	0.61	0.76	1.09	1.60	2.30	2.65	
H/C	0.93	0.85	0.81	0.74	0.64	0.55	0.46	0.44	

热模拟样品	黄县褐煤 (腐殖 III 型)									
实测参数										
R^0 (%)	0.46	0.57	0.76	1.08	1.37	1.85	2.77	3.19	3.61	
H/C	0.959	0.874	0.764	0.666	0.543	0.435	0.314	0.29	0.226	

照 Barrows 和 Cluff (1984) 的 H/C 原子比与 R^0 图板充实和校验, 获得三类干酪根 (I 型、II 型和 III 型) H/C 原子比与镜质体反射率 R^0 的拟合关系曲线图 (图 11)。由于采用

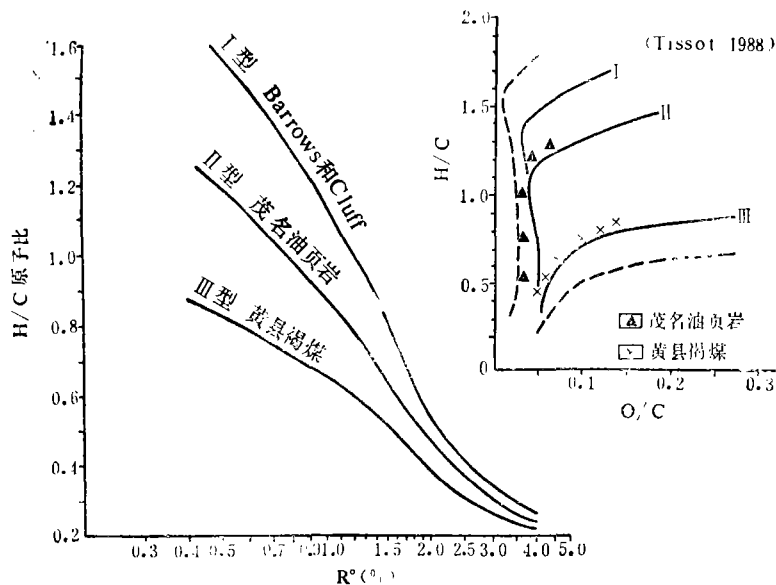


图 11 三类干酪根 H/C 与 R^0 拟合关系曲线图

茂名油页岩和黄县褐煤等热模拟样品的干酪根类型品性基本上与 Tissot 的 II 型和 III 型平均演化线相吻合 (见图 11)。因此上述三类干酪根 H/C 原子比与镜质体反射

率 R° 的拟合关系曲线具有一定的代表性和可靠性,可以作为H/C原子比与 R° 关系模板使用,并在该图上求取对应于任一H/C原子比的 R° 值。

2.利用源岩吸附烃成熟度参数环烷指数 I (CA_1) 与源岩三类干酪根H/C原子比拟合的关系曲线(见图7)为模板,在该模板上求取对应于任一H/C原子比的环烷指数 I (CA_1) 值。

3.根据同一H/C原子比值所对应的 R° 和环烷指数 I (CA_1) 的数据,配对作关系图,即可获得环烷指数 I 与反射率 R° 的关系模板(图12),由关系模板求得的 R° 值,为了与实测的 R° 值有所区别,可称为 R_{c7} 。

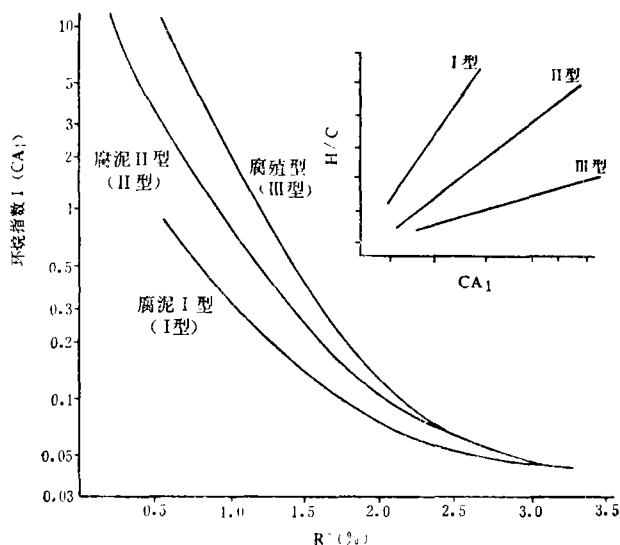


图 12 不同类型源岩环烷指数 I 与 R° 关系模板

由环烷指数 I 与 R° 关系模板可见,三类(I型、II型和III型)母质的环烷指数 I 均随着反射率 R° 的增大呈指数关系下降,有负相关的函数关系。

因此当源岩或天然气的母质类型一旦被确定后,可根据环烷指数 I 与 R° 的关系模板,由环烷指数 I 即可求得其相应的 R° (即 R_{c7})作为其热演化的成熟度。

(四) 成熟度参数指标的应用

由成熟度参数环烷指数 I (CA_1) 和环烷指数 II (CA_2) 组成的关系图,经技术处理后,即按不同母质类型分别回归求其相关曲线,同时用环烷指数 I 相对应的 R° (R_{c7}) 值标在图上,即可组成一张不同类型的环烷指数 I 和环烷指数 II 的关系模板(图13)。该模板图可直接反映源岩或天然气处于不同演化阶段时的成熟度,同时还可概略地(当 $R^\circ < 1.4\%$ 时)区分其母源的类型特征。因此这种关系模板图具有较高的使用价值和较好的效果(图14中下图比上图的效果更好)。

下面是四川地区和华北地区几个不同产层天然气成熟度判别实例。

1. 四川地区

图15是四川地区中生界几个产层天然气环烷指数 I 和环烷指数 II 的关系模板图。由

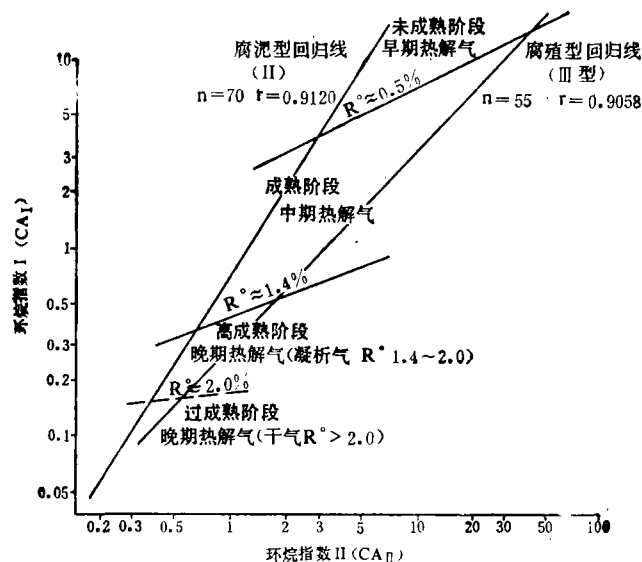


图13 环烷指数 I 与环烷指数 II 关系图 (模板)

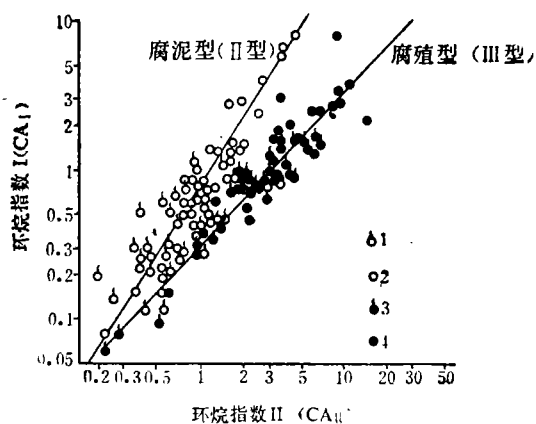
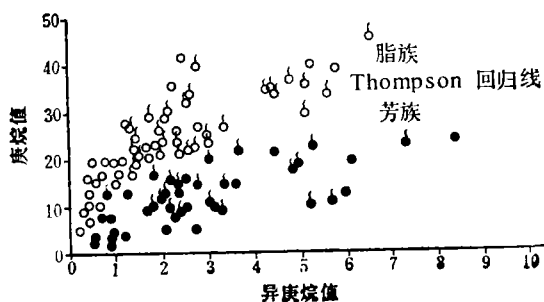
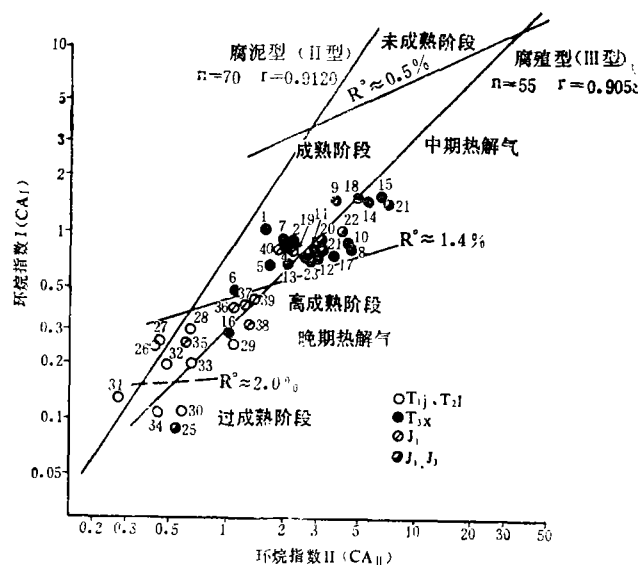


图 14 庚烷值与异庚烷值、环烷指数 I 与环烷指数 II 关系图

1. 腐泥型气 2. 腐泥型源岩 (I) 3. 腐殖型气 4. 腐殖型源岩 (II)



序号	井号	层位	序号	井号	层位	序号	井号	层位
1	女103	T _{3x}	15	关2	T _{3x}	29	卧3	T _{1f}
2	角5	"	16	秋2	"	30	邓34	T _{2j}
3	中9	"	17	川96	"	31	邓17	"
4	关6	"	18	川95	"	32	邓35	"
5	遂8	"	19	川108	J _{2b}	33	兴3	"
6	通6	"	20	川109	J _{3p}	34	邓15	"
7	大参1	"	21	"	J _{3p}	35	川44	J _{1z}
8	川96	"	22	"	J _{2h}	36	遂121	"
9	文4	"	23	中16	T _{3x}	37	角37	"
10	中71	"	24	中2	"	38	角3	"
11	中51	"	25	大2	J _{1b}	39	金25	"
12	川102	"	26	中2	T _{2l}	40	广9	"
13	中29	"	27	中40	"			
14	金2	"	28	音2	"			

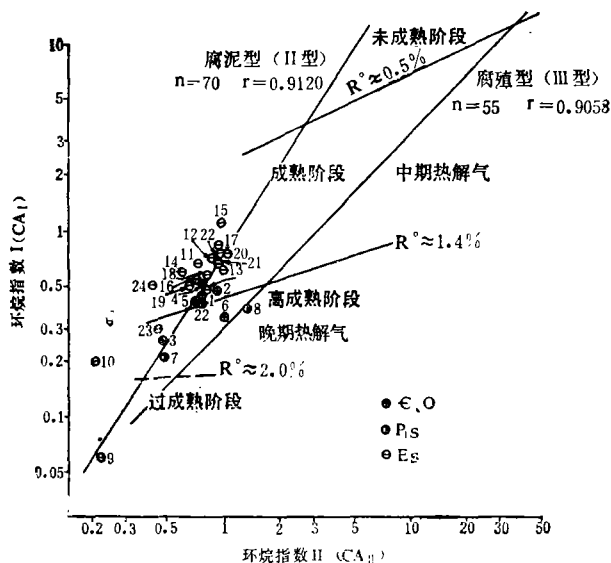
图15 四川地区天然气CA_I与CA_{II}关系图

图可见,中、下三叠统碳酸盐岩嘉陵江组(T_{1j})和雷口坡组(T_{2l})天然气的成熟度R_{c7}约为1.7—2.1%,为高成熟至过成熟演化阶段的腐泥型天然气;上三叠统须家河组(T_{3x})和川西侏罗系红层(J₁₋₃)的天然气,其成熟度R_{c7}大多数为1.0—1.4%之间,属成熟阶段的腐殖型天然气,仅少数气处于高成熟至过成熟阶段;大安寨组(J_{1z})天然气,乍一看来似属高成熟的腐殖型气(点群偏在Ⅲ型回归线一侧),但经甲基环己烷指数值

($<50\%$) 的判别应属腐泥型气, 其成熟度 R_{c7} 有的 $<1.4\%$, 如角37井、遂121井和金25井, 其天然气均为成熟阶段的油层伴生气; 有的 $R_{c7}>1.4\%$, 如角3井、川44等 它们属高成熟阶段形成的凝析气。

2. 华北地区

图16是华北地区包括鄂尔多斯地区几个不同产层天然气环烷指数 I 和环烷指数 II 的关系模板图。产于下第三系沙河街组(E_s)天然气的成熟度 R_{c7} 大多在 $0.9—1.2\%$ 之间, 以成熟阶段形成的腐泥型气(原油伴生气)为主, 个别井层(文31井)的天然气(E_s^4 段)其成熟度 $R_{c7}>2.0\%$ 以上, 演化程度高, 为来自古生界的过成熟阶段天然气; 鄂



序 号	井 号	层 位	序 号	井 号	层 位	序 号	井 号	层 位
1	苏1-2	O ₂	10	文33	E _{s3}	19	小14-18	Ek
2	苏1-4	"	11	荆联1	E _s	20	港2025	E _{s3}
3	泽21	"	12	岔12-7	E _s —E _d	21	港中963	E
4	晋古1-1	"	13	岔83-16	"	22	南13	€
5	晋古2	"	14	岔81	"	23	港2019	Nn
6	伊24	"	15	庙81	E _d	24	砂845	E _{s1}
7	任4	P _{1x}	16	官3	E _{s1}	25	港665	E _{s2}
8	伊17	"	17	官963	"			
9	文31	E _{s4}	18	官22-41	Ek			

图16 华北地区天然气 CA_1 与 CA_{11} 关系图

尔多斯地区产于下二叠统(P_1)的天然气, 其成熟度 R_{c7} 约为 $1.5—1.7\%$, 如伊17井 的天然气不难判别为高成熟阶段形成的腐殖型气。华北地区产于下古生界奥陶系碳酸盐岩潜山构造带的天然气, 其成熟度 R_{c7} 一般在 $1.2—1.4\%$, 仅泽21井天然气的成熟度较高

Rc₇为1.7%左右。这些奥陶系产层的天然气，以指纹参数来看，一般均具有腐泥型母质的特性。

上两实例表明应用环烷指数Ⅰ和环烷指数Ⅱ关系模板判别天然气的成熟度是可行的，符合客观实情，因而具有十分广泛的使用价值。

三、简要的结论

源岩吸附烃和天然气中烃类C₁—C₉指纹信息，具有十分丰富的地质、地化内涵。从烃C₆—C₇指纹组成中开发的甲基环己烷指数（MCH指数）、环己烷指数（CH指数）和不同碳数（C₆、C₈和C₇）脂烃族组成等母质类型参数以及环烷指数Ⅰ（CA₁）、环烷指数Ⅱ（CA₂）、环烷指数Ⅲ（CA₃）和二甲基环戊烷指数（DMCP指数）等成熟度参数，其中甲基环己烷指数和环烷指数Ⅰ对源岩或天然气的母质类型、成熟度的判别最为有效，具有较高的实际应用价值，而不同碳数的脂烃族组成参数，不仅可以区分源岩和天然气的母质属性，还可应用其进行气/气、气/岩直接对比，追索其相应的生气源岩。总之之开发和应用轻烃指纹参数，可为天然气成因分类、气源岩评价等提供一种快速有效、简便经济的新方法。

（收稿日期：1990年5月20日）

参 考 文 献

- 〔1〕Leythaeuser, D. et al., 1979, Generation and migration of C₂—C₇ light hydrocarbons in sedimentary basins, Organic Geochemistry, Vol.1979.
- 〔2〕Snowdon, L.R. and Powell, T.G., 1982, Immature oil and condensate—modification of hydrocarbon generation model for terrestrial organic matter, AAPG, Bull Vol.66.
- 〔3〕Thompson, K.F.M., 1979, Light hydrocarbons in subsurface sediments Geochim et Cosmochim Acta Vol.43.
- 〔4〕Thompson, K.F.M., 1983, Classification and thermal history of Petroleum based on light hydrocarbons Geochim et Cosmochim Acta Vol.47.
- 〔5〕Thompson, K.F.M., 芳香类石油的分馏和凝析油的生成，张丹荣译自《Org Geochim》Vol.11, 1987.
- 〔6〕Barrows, M.H. and Cluff, R.M., 1984, New Albion shale group (Devonian—Mississippian) source rocks and hydrocarbon generation in the Minors Basin, AAPG memoir 35.
- 〔7〕舒文震等，1988，四川盆地上三叠统煤系沉积环境，石油与天然气地质文集，第一集，中国煤成气研究，地质出版社。
- 〔8〕程耀黄等，四川盆地的气源与勘探，天然气工业，1982年1期。

THE DEVELOPMENT AND APPLICATION OF FINGERPRINT PARAMETERS FOR HYDROCARBONS ABSORBED BY SOURCE ROCKS AND LIGHT HYDROCARBONS IN NATURAL GAS

Hu Tilin Ge Baoxiong Chang Yigang Liu Bin

(Central Laboratory of Petroleum Geology, MGMR)

Abstract

Among the fingerprint parameters of light hydrocarbon, indexes of MCH and CA are developed and selected as optimum parameters for parent material type and maturity, respectively, by studying the characteristics of hydrocarbons absorbed by source rocks and light hydrocarbons in natural gas. Applying these parameters, we can identify the types of natural gas and source rocks as well as determine maturity, and make direct correlations of gas/gas and gas/source rock. This new method is considered as an efficient, simple and economical measure in identifying the origin of natural gas and estimating gas source rocks.

表 3 源岩干酪根类型、H/C原子比、源岩轻烃成熟度参数数据表

序 号	井 号	源 岩 母 岩 类 型	干酪根 H/C	参 数										备 注			
				RPC, $\frac{MCH}{nC_7}$	$\frac{C_7}{\Sigma C_7}$	$\frac{C_7+C_8+MC}{\Sigma C_7}$	$\frac{DMCP}{nC_7}$	$\frac{MCH}{MCH+DMCP}$	$\frac{nC_7}{nC_7+DMCP}$	$\frac{MCH}{MCH+DMCP}$	$\frac{nC_7}{nC_7+DMCP}$	$\frac{nC_7}{\Sigma C_7}$	$\frac{nC_7}{\Sigma C_7}$	$\frac{nC_7}{\Sigma C_7}$	$\frac{nC_7}{\Sigma C_7}$	$\frac{nC_7}{\Sigma C_7}$	$\frac{nC_7}{\Sigma C_7}$
1	大202	凝泥(I)型	1.41	0.68	0.87	0.79	1.52	1.19	28	0.38	0.38	1.43	0.98	5.61	0.82	0.28	0.70
2	红 16	"	1.56	0.72	0.44	0.43	14.54	5.42	44	0.18	0.18	2.50	0.55	42.04	0.39	0.12	1.31
3	粘深10	"	1.12	0.29	0.65	0.54	5.32	2.21	36	0.20	0.20	2.60	0.71	64.18	0.59	0.20	1.60
4	役 71	"	0.78	0.15	0.63	0.50	4.76	5.20	40	0.11	0.11	1.88	0.71	23.90	0.17	0.14	2.23
5	文 32	凝泥(II)型	1.47	8.36	4.97	3.60	1.54	0.31	5	0.88	0.88	0.65	2.71	3.97	2.08	5.26	1.34
6	"	"	1.42	6.87	4.03	3.30	1.13	0.20	6	0.86	0.86	0.74	2.30	2.96	1.83	4.35	0.21
7	"	"	1.15	3.99	2.84	2.50	2.51	0.21	9	0.78	0.78	0.88	1.73	9.17	1.59	2.50	0.15
8	谷深 1	"	1.03	2.43	2.67	1.73	4.93	0.65	10	0.69	0.69	0.71	1.86	3.69	1.32	1.18	0.56
9	5001	"	0.85	1.43	2.06	2.25	1.92	0.36	17	0.55	0.55	2.21	0.55	12.97	0.73	1.08	0.78
10	"	"	1.00	1.33	2.03	1.83	3.50	0.58	16	0.54	0.54	1.71	0.84	7.53	1.18	0.93	0.50
11	晋古 1	"	0.86	1.33	2.01	1.58	2.04	0.68	17	0.52	0.52	1.32	0.97	2.87	0.58	1.09	0.67
12	昌 2	"	0.80	0.90	1.93	0.71	15.49	2.53	10	0.40	0.40	0.51	2.97	6.40	1.55	0.42	0.56
13	5001	"	0.78	0.79	1.32	1.01	8.41	1.14	20	0.42	0.42	1.40	1.09	8.82	0.85	0.38	1.02
14	苏1-5	"	0.88	0.69	1.25	0.81	5.73	1.69	21	0.38	0.38	1.06	1.40	5.49	0.96	0.50	0.84
15	农101	"	0.87	0.48	1.11	0.81	11.47	1.85	25	0.31	0.31	1.51	0.97	23.56	0.95	0.23	1.14
16	役 71	"	0.64	0.36	1.22	0.87	14.58	2.57	26	0.24	0.24	1.63	0.82	502.84	0.47	0.19	1.23
17	川102	"	0.76	0.26	0.90	0.71	7.88	2.58	31	0.19	0.19	2.06	0.65	23.76	0.39	0.23	2.02
18	任 41	"	0.81	0.30	0.61	0.51	9.43	2.37	35	0.21	0.21	1.84	0.79	16.53	0.47	0.18	1.18
19	SN 18	"	0.51	0.14	0.53	0.43	13.14	2.96	43	0.12	0.12	3.00	0.39	38.68	0.31	0.12	2.22
20	5001	凝泥(III)型	0.89	2.46	6.20	3.66	6.37	0.52	6	0.69	0.69	0.96	1.35	10.25	0.90	0.76	1.34
21	"	"	0.60	1.34	5.86	3.15	3.53	0.76	8	0.57	0.57	0.99	1.30	/	0.88	0.88	1.66
22	川103	"	0.58	0.80	3.24	2.00	7.22	1.23	13	0.42	0.42	1.33	1.02	9.18	0.56	0.38	1.99
23	役 71	"	0.60	0.68	2.42	1.04	9.03	2.52	16	0.38	0.38	0.78	1.98	59.25	0.84	0.24	1.13
24	5001	"	0.50	0.85	1.95	1.11	12.62	1.00	15	0.44	0.44	1.44	0.99	5.83	0.69	0.45	1.21
25	"	"	0.61	0.61	1.31	0.98	6.43	1.38	24	0.35	0.35	1.52	0.96	61.08	0.62	0.23	1.08
26	SN 13	"	0.52	0.90	3.52	2.82	16.46	0.93	8	0.47	0.47	1.76	0.57	1.90	0.71	0.48	2.36
27	SN 18	"	0.52	0.37	1.12	0.86	12.40	2.22	25	0.25	0.25	1.85	0.73	23.75	0.40	0.21	1.94
28	5001	"	0.53	0.40	0.69	0.58	12.64	2.05	29	0.26	0.26	1.61	0.87	52.22	0.60	0.25	1.21