

我国凝析油的成因类型及其地球化学特征和意义

陈践发 沈平 文启彬

(中国科学院兰州地质研究所气体地球化学国家重点实验室 兰州 730000)

提 要 近十几年的勘探实际表明,在我国一些含油气盆地中,许多天然气藏均伴生一定量的凝析油(或轻质油)。按母质类型可将凝析油分为海相腐泥型有机质生成的凝析油、煤系地层腐殖质有机质生成的凝析油、陆相混合型有机质生成的凝析油。本文较详细地从成因机理上讨论了这三种不同成因凝析油的形成特点。

海相腐泥型有机质一般在有机质热演化达到高成熟-过成熟阶段,由于酪根或早期形成的高分子液态烃热裂解才形成凝析油。煤系地层中腐殖型有机质从低成熟到过成熟各个阶段所生成的一定量的液态烃一般主要以凝析油的状态与天然气相伴生。陆相混合型有机质从低成熟到过成熟阶段也都可能形成凝析油。

利用凝析油单体烃的组份特征,石蜡指数和庚烷值对我国主要含油气盆地凝析油的成熟度进行了计算,所得结果,大都与地质实际相吻合。研究表明我国凝析油成熟度的分布范围从低成熟到过成熟均有。

三种不同成因的凝析油其地球化学特征具有一定差异,煤系地层腐殖型有机质形成的凝析油从组份来讲相对富含芳烃,其芳烃含量一般为16.2~23.5%,饱和烃/芳烃值为3.2~5.2,同时其姥鲛烷/植烷值相对较高,通常均大于3;而海相腐泥型有机质生成的凝析油则相对富含饱和烃,其饱/芳比值为11.8~18.2,同时姥鲛烷/植烷值较低,一般小于1。陆相混合型有机质生成的凝析油则介于二者之间。

三类不同成因的凝析油它们的芳烃组份(萘系、联苯系和芴系)和低分子生物标记物(萜类化合物)以及烷烃和芳烃组份的碳同位素组成都具有明显的差异。利用凝析油的这些地球化学特征可以有效地判别凝析油的成熟度和成因类型,从而确定与之相伴生的天然气的成因或来源。

关键词 凝析油 成烃机制 芳烃地化特征 碳同位素 烃类组份

第一作者简介 陈践发 男 33岁 研究员 地球化学、石油天然气地质

Tissot等^[8]指出凝析油是有机质热演化达到高成熟阶段($R_o = 1.35 \sim 2.0\%$)热裂解的产物。Snowdon等^[9]通过对加拿大陆相盆地中凝析油的研究认为,陆相有机质在低成熟-成熟阶段($R_o = 0.5 \sim 1.35\%$)可以形成大量的凝析油和天然气。

近年的勘探表明在我国含油气盆地中均广泛产出与天然气伴生的凝析油,其产层深度最大的达4000m以上,最小仅370m^[1],由于凝析油是天然气中伴生的液态烃,在天然气研究中受到广泛的重视。近年在我国有许多有关凝析油地球化学特征研究的报道^[2,3,10]。在地质实际中往往由于一些与天然气相伴生的轻质油和凝析油难以区分,本文所指的凝析油包括一些比重 < 0.8 轻质油。

1 凝析油的成因分类

我国主要含油气盆地凝析油从母质类型可分为三类:海相腐泥型母质生成的凝析油、陆相湖盆过渡(混合型)母质生成的凝析油和海陆过渡相及内陆沼泽相煤系地层腐殖型有机母质生成的凝析油。

目前在我国发现属于海相腐泥型母质生成的凝析油有产于四川盆地中坝气田三叠系雷口坡组的凝析油^[2]和苏北盆地黄桥地区古生代凝析油和浅层第三系凝析油^[1]。

属于陆相湖盆过渡型母质生成的凝析油有辽河盆地东部凹陷的凝析油^[3],胜利油田第三系凝析油和东濮坳陷卫城地区、白庙和桥口地区第三系沙河街组凝析油^[2,3]。

在我国由煤系地层腐殖型母质生成的凝析油有四川盆地上三叠系须家河组凝析油、陕甘宁盆地西北缘石炭-二叠系凝析油,东濮凹陷文留气藏沙四段凝析油^[2],琼东南崖 13-1 气藏凝析油^[4],华北地区苏桥石炭-二叠系凝析油^[5],塔里木盆地依奇克里克侏罗系凝析油,辽河盆地界 3 井。

除以上三种典型的凝析油外,在一些盆地还具两种有机质形成的烃类混合而成的凝析油。

2 凝析油的成熟度与不同类型有机母质的热演化特征

Thomson^[1]通过研究原油中轻烃组分中链烷烃与环烷烃的比值,提出了利用石蜡指数和庚烷值确定原油和凝析油成熟度的方法。且认为,随着原油成熟度的增加石蜡指数和庚烷值逐渐增大。对我国主要含油气盆地中 40 多个凝析油的单体烃分析所得的凝析油的石蜡指数和庚烷值的分布特征如图 1 所示。从图中可以看出从低成熟到过成熟各个热演化阶段都有分布。

前人对这些凝析油、气的可能源岩用地质和其它地球化学方法所确定的热演化程度与我们所用石蜡指数与庚烷值所确定的凝析油的成熟度吻合性很好。例如,东濮坳陷文留气藏产出的凝析油在图 1 中分布于过成熟区间。其可能源岩石炭-二叠系石蜡指数为 7~16,庚烷值为 48.1~56.1%,气源岩镜质体反射率(R_o)大于 1.3%。陕甘宁盆地西北缘石炭-二叠系的凝析油石蜡指数和庚烷值分别为 0.9~3.8 和 19.6~35.1,分布于图 1 的成熟区间,其可能源岩的镜质体反射率(R_o)为 0.7~0.8%左右。四川盆地中坝气田三叠系雷口坡组的凝析油其石蜡指数为 6~7,庚烷值为 40~51。分布于图 1 中高成熟区,其可能源岩下三叠统雷口坡组海相灰岩有机质热演化程度已达到高成熟,其 R_o 为 1.3~1.8%。

从图 1 中可以看出,属海相腐泥型有机母质生成的凝析油均分布于高成熟-过成熟阶段。属于陆相过渡型母质生成的凝析油主要分布于成熟阶段到高成熟阶段。属于煤系地层腐殖型有机质生成的凝析油分布范围从低成熟阶段到过成熟阶段。这也就是说三种不同类型的有机质生成凝析油的成因特征具有一定的差别,其生成凝析油的机理主要如下:

海相腐泥型有机质富含脂类和类脂官能团结构,在低成熟和成熟阶段能生成大量的高碳数的液态烃,即是能生产一定数量低碳数(汽油烃碳数范围)的烃类也被“混溶”于高碳数的液态烃中,所以在低成熟和成熟阶段海相腐泥型有机质不易形成凝析油产出。而到达高成熟至过成熟阶段。一方面干酪根以生产低碳烃为主,另一方面原在成熟阶段形成的高碳数烃类也裂解成低碳烃类。因此,可以出现凝析油气藏。

煤系地层中的腐殖型有机质,则富含芳核烃结构,各芳核结构中以较短链烷烃结构相

连。在热演化过程中从低成熟阶段开始到过成熟阶段均是生成低碳数烃类为主。在芳香核上侧链基团断裂生成为烃类物质。即是在成熟阶段也主要是生成低碳数烃类为主,这也就是说从低成熟阶段到过成熟阶段都可能生成凝析油和轻质油。且煤系凝析油不是由高碳数液态烃类裂解而生成的,而是由干酪根直接分解生成的。

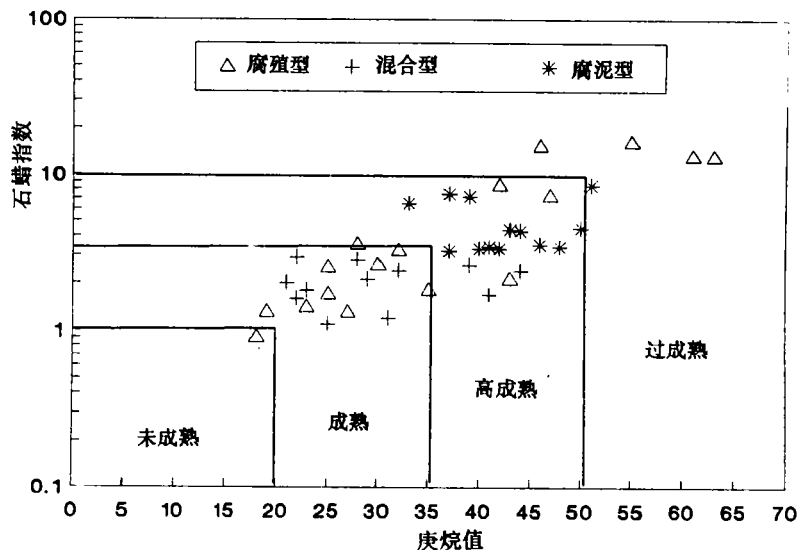


图1 我国不同母质类型凝析油的成熟度分布

Fig. 1 The Relationship between Paraffin Index and Heptane Value of Condensate

陆相混合型有机质的热演化成烃特征是介于二者之间。因此,在低成熟到成熟阶段干酪根也可以生成小量的凝析油。

3 不同母质类型凝析油的地化特征

3.1 凝析油的馏分特征

对我国不同类型凝析油中烃类组份分析表明,煤系地层腐殖有机质生成的凝析油相对富含芳烃,其芳烃含量为 16.2~23.5%,饱/芳值为 3.2~5.2,而海相腐泥型母质生成的凝析油则饱和和烃含量相对较高,芳烃含量较低,为 5.2~7.8%,其饱/芳值为 11.8~18.2。陆相混合型有机质生成的凝析油,芳烃含量介于二者之间,为 6.5~10.4%,饱/芳值为 8.6~14.5(如表 1 所示)。

3.2 异戊间二烯烷烃中姥鲛烷、植烷的特征

前人已做了大量工作证明,原油和生油岩中的姥鲛烷与植烷与其形成环境有关。我国不同类型的凝析油中姥鲛烷和植烷的含量也具有明显差异,煤系地层腐殖有机质生成的凝析油其姥鲛烷/植烷(Pr/Ph)相对较高,在 2.3~6.8 之间,通常该比值都大于 3。而海相腐泥母质生成的凝析油 Pr/Ph 值则相对较低,为 0.1~1.4 左右,一般均小于 1。而陆相混合有机质生成的凝析 Pr/Ph 值介于二者之间,为 1.4~3.8。造成这种差异的原因主要是与生成

凝析油的母质类型以及源岩的沉积环境有关。煤系地层其形成环境为沼泽相,通常为氧化环境,在沉岩作用过程中有利于姥鲛烷的生成,而海相生油岩则偏还原环境,在成岩作用过程中有利于植烷的形成。陆相湖泊沉积则为弱氧化环境-弱还原环境。由于这三者的环境不同而造成 Pr/Ph 值的明显差异,这一结果与前人通过研究原油和生油岩中的 Pr/Ph 值结论相一致。

表 1 凝析油中烃类组份特征

Table 1 The Characters of Fractions in Condensates

凝析油的类型	饱和烃(%)	芳香烃(%)	饱/芳
煤系腐殖质凝析油	76.5~83.9	16.2~23.6	3.2~5.2
陆相混合型有机质生成的凝析油	89.5~93.5	6.5~10.4	8.6~14.5
海相腐泥质凝析油	92.2~94.8	5.2~7.8	11.8~18.2

3.3 凝析油中芳烃组份特征

由于芳烃化合物热稳定性和抗生物降解能力比饱和烃要高。因此,近年来对原油和生油岩中芳烃的研究受到了广泛的重视。

3.3.1 凝析油芳烃特征及其成熟度的探讨

原油和源岩中的非系列和萘系列异构体的分布与成熟度具有良好的线性关系^[12,13]。Alexander 等^[14]指出,甲基联苯异构体的变化与温度(深度)之间存在一定的对应关系。

通过分析我国一些凝析油的甲基萘比值(MNR)、甲基菲比值(MPR),与其相应的源岩实测的镜质体反射率(R_o)(对一些没有实测 R_o 数据的凝析油采用与其相伴生的天然气甲烷 $\delta^{13}C_1$ 值计算出的 R_o 值)。绘制了甲基萘比值(MNR)和甲基菲比值(MPR)与 R_o 关系图(图 2)。从图中可以清楚地看出凝析油的甲基萘比值和甲基菲比值与其可能源岩的成熟度 R_o 有较好的线性关系。即随 R_o 从 0.6% 增加到 1.5%, 甲基萘比值和甲基菲比值均相应增大。其中,甲基萘比值与 R_o 之间的关系显得更好。

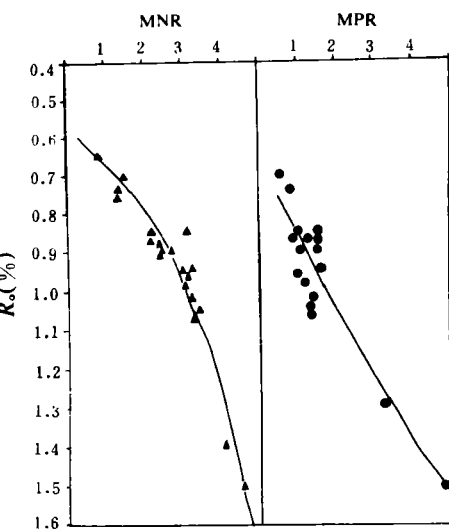


图 2 我国凝析油的甲基萘(MNR)值和甲基菲(MPR)值与镜质体反射率(R_o)关系图

Fig. 2 The Relation between R_o vs. MNR and MPR in Condensates

甲基萘比值和甲基菲比值随演化程度增大是由于它们的空间效应所致。因芳烃的异构体受热力学效应的影响,使芳烃芳环上的基团位置随热成熟度增大,其基团由不定位向定位转移。

3.3.2 芳烃特征与沉积环境和母质的关系

在不同成因的原油中芳烃组份差异除与成熟度有关外,也与沉积环境和母质类型有密切的关系。前人在研究原油芳烃时提出海相原油中菲比较丰富,而陆相原油中萘比较丰富。

尚慧云^①认为这种规律是不存在的。酒西和陕甘宁盆地陆相原油中菲在芳烃中的相对含量高达 65% 以上^[6]。

通过分析凝析油中芳烃相对含量发现,凝析油中萘和联苯的含量,芳烃中茈系化合物茈、氧茈和硫茈三者的相对含量主要与其源岩的母质类型和沉积环境有关。

表 2 凝析油中一些芳烃的含量

Table 2 The Relative Concentration of Naphthalene and Bi-Benzene in Condensates

源岩的母质类型及沉积环境特征	萘(%)	联苯(%)
煤系地层中腐殖型有机质	0.1~45	40~90
海相腐泥型有机质	45~60	20~40
陆相过渡型有机质	60~88	5~20

表 2 列出我国不同母质所生成的凝析油中萘、联苯的相对含量。表中清楚地看出由煤系腐殖型母质生成的凝析油芳烃中萘的相对含量较低,为 0.1~45%,而联苯的含量非常丰富,高达 49~90%;海相腐泥型有机质生成的凝析油萘的含量为 45~60%,联苯的含量为 20~40%;陆相过渡型有机质生成的凝析油,萘的含量最高,为 60~88%,而联苯的含量为 5~20%。

这也就是说不同成因的凝析油其萘和联苯的含量具有较明显的差异。

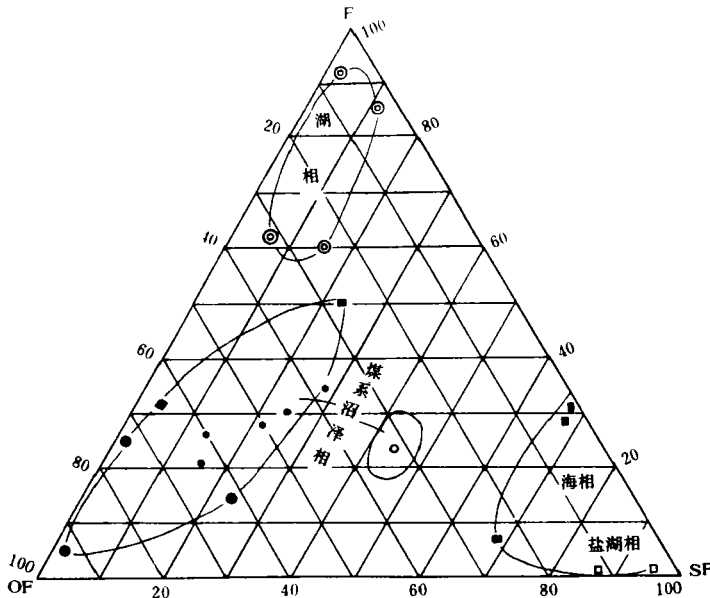


图 3 我国凝析油中茈、氧、硫茈的相对含量三角图

Fig. 3 The illustration of fluorene (F), sulfur-bearing fluorene (SF) and oxygen-bearing fluorene (OF) in condensates

图 3 为不同成因的凝析油的茈系化合物茈、氧茈和硫茈(分别以 F、OF、SF 来表示)的三角图。图中可以清楚地看出煤系腐泥型有机质生成的凝析油氧茈含量相对较高(>50%)、海

① 尚慧云等,1982,石油地质科研成果。

相和盐湖相的凝析油则硫芴含量较高(>60%)、淡水-微咸水陆相凝析油则芴的含量较高(>60%)，在芴系化合物的三角图上可清楚地将不同环境及母质类型的凝析油区分开来。

3.4 凝析油中低分子生物标志化合物特征

低分子量生物标志化合物、二环倍半萜、三环萜和四环萜在油-油及油-源对比中已得到了广泛的应用。但对它原始先质的认识尚不一致。曾宪章^[7]认为二环倍半萜与高等植物三萜类的热解产物有关。Philp^[15]指出二环倍半萜是芸柄蜡烷和四环萜的降解产物。国外一些学者认为四环萜的先质是C₃₀异戊二烯醇，其来源是藻类和细菌。

通过对我国不同类型凝析油低分子量萜烷类标志化合物研究表明：煤系地层腐殖型有机质生成的凝析油，其二环倍半萜含量普遍较高，陆相混合型有机质生成的凝析油其二环倍半萜含量较低。

从凝析油的双倍半萜/三环萜及四环萜/三环萜的关系图(图4)可以看出三种类型的凝析油有明显的差异。煤系地层腐殖型有机质生成的凝析油双倍半萜/三环萜和四环萜/三环萜的比值均明显较高。而由陆相混合型有机质生成的凝析油则两者均较低。

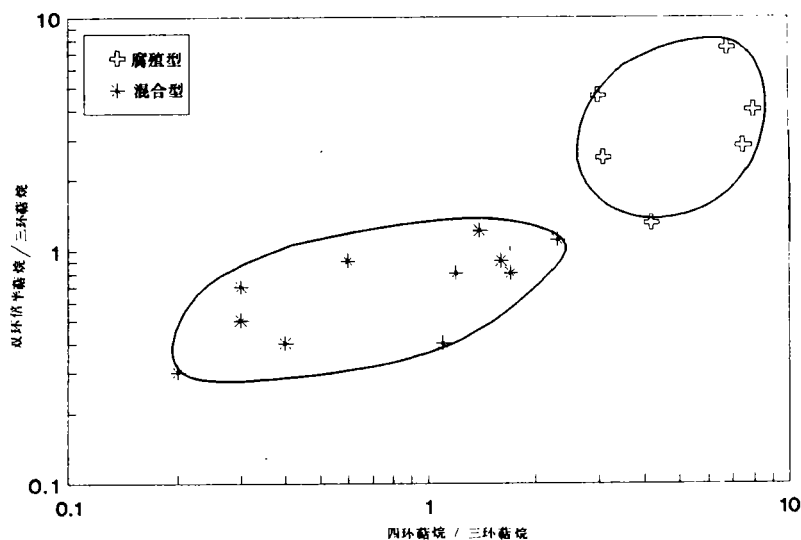


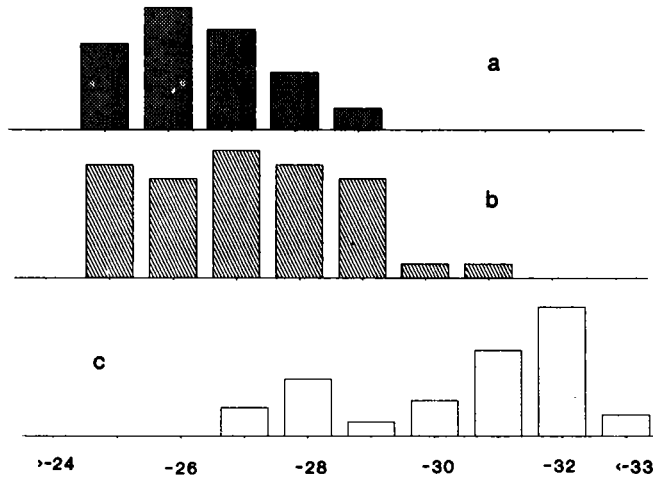
图4 我国不同母质类型凝析油的萜烷分布特征

Fig. 4 The Characters of Terpanes in Condensates

3.5 凝析油的碳同位素组成特征

Snowdon L. R.^[9]通过研究加拿大的一些盆地中凝析油碳、氢同位素组成特征认为凝析油的碳、氢同位素组成与成熟度有关。徐永昌等^[2]通过分析我国一些盆地中与天然气相伴生的凝析油碳同位素组成认为凝析油的碳同位素组成主要与其母质有关。煤系地层有机质生成的凝析油比腐泥型和混合型有机质生成的凝析油相对富集重碳同位素。笔者分析和收集我国主要含油气盆地凝析油的碳同位素组成，如图5所示，从图中可以看出，我国一些主要含油气盆地中凝析油全烃碳同位素组成分布范围很宽，其 $\delta^{13}\text{C}$ 值从-32.5‰到-24.2‰。不同成因类型的凝析油其碳同位素值有一定的差异。海相腐泥型有机质生成的凝析油，相对富集

轻碳同位素值,其 $\delta^{13}\text{C}$ 值为 $-33\text{‰}\sim-27\text{‰}$ 。由煤系腐殖型有机质生成的凝析油则相对富集重碳同位素,其 $\delta^{13}\text{C}$ 值为 $-27\text{‰}\sim-24\text{‰}$ 。陆相混合型有机质生成的凝析油则介于二者之间。凝析油全烃碳同位素组成的分析结果表明用全烃碳同位素组成有时往往很难完全区别其成因类型。



a. 煤系地层腐殖型凝析油 b. 陆相混合型凝析油 c. 海相腐泥型凝析油

图5 我国不同母质类型凝析油全烃碳同位素组成分布图

Fig. 5 The Histogram of Carbon Isotopic Composition of Condensates in China

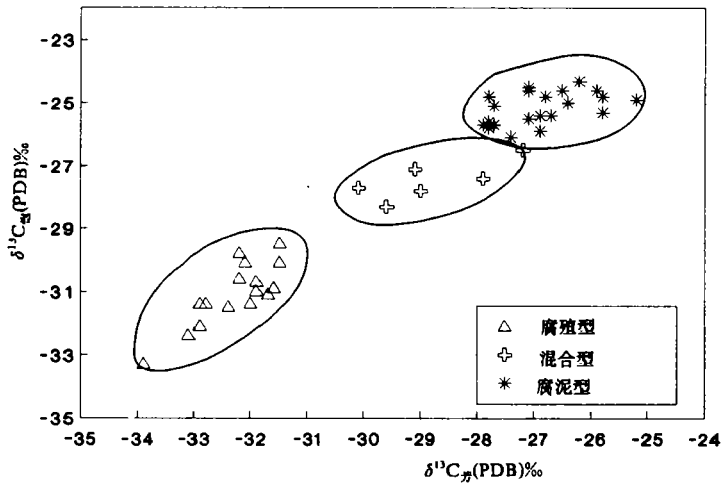


图6 不同母质类型凝析油中 $\delta^{13}\text{C}_{\text{芳}}$ 与 $\delta^{13}\text{C}_{\text{饱}}$ 关系图

Fig. 6 The Relationship between Carbon isotopic Composition of Saturate and Aromatic in Condensates

图6为我国不同母质类型凝析油的饱和烃和芳烃碳同位素组成关系图。从图中可以看出海相腐泥型有机质生成的凝析油饱和烃和芳烃相对都明显地富集轻碳同位素,而煤系地

层腐殖型有机质生成的凝析油,其饱和烃和芳烃相对明显地富集重碳同位素。这二者的饱和烃和芳烃的碳同位素组成与陆相混合型有机质生成的凝析油的饱和烃、芳烃的碳同位素组成均有明显的差异。这也就是说利用凝析油饱和烃和芳烃的碳同位素组成特征可以把不同成因的凝析油很好的区别开来。

结 语

从以上对三种不同母质类型凝析油的形成机理和地球化学特征讨论可知,利用凝析油的地球化学特征可以较好地确定凝析油热演化程度。鉴别不同成因和来源的凝析油。从而更好地判识与之相伴生的天然气的成因和来源。

收稿日期:1994-3-8

参 考 文 献

- [1] 费富安,罗继坤,李丽娜,陈践发,沈平,1987,中国科学院兰州地质研究所生物气体地球化学国家重点开放实验室,研究年报(1986),甘肃科学技术出版社,78~85。
- [2] 徐永昌,沈平,陈践发,文启彬,1988,中国科学(B辑),6:643~650。
- [3] 陈文义,朱家蔚,许化政,1987,煤成气地质研究,北京:石油工业出版社,118~130。
- [4] 陈伟煌,1987,煤成气地质研究,北京:石油工业出版社,97~105。
- [5] 秦建中,梁狄刚,李志鹏,1987,煤成气研究,北京:石油工业出版社,131~144。
- [6] 李新宇,罗斌杰,1991,中国科学院兰州地质研究所生物气体地球化学开放实验室研究年报(1988~1989),北京:科学出版社,106~118。
- [7] 曾宪章,1986,有机地球化学论文集,北京:科学出版社,33~49。
- [8] Tissot B. H. W. and Welt D. H., 1978, *Petroleum Formation and Occurrence*, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg.
- [9] Snowdon L. R. and Powell T. G., *AAPG Bulletin*, Vol. 66(1982), 775~788.
- [10] Chen Jianyu and He Bingyun, *Org. Geochim*, 16(1990), 561~567.
- [11] Thompson K. F. M., *Geochim. et Cosmochim. Acta*, 48(1979), 657~672.
- [12] Radke M., Welt D. H., Willsch H., 1981, *Org. Geochem.*, 7, 504~512.
- [13] Radke M., Welt D. H., Willsch H., 1986, *Org. Geochem.* 12, 51~63.
- [14] Alexander R., *Geochim. et Cosmochim. Acta*, 49(1985), 385~393.
- [15] Philp. R. P., 1981, *Geochim et Cosmochim Acta* 45, 1173~1180.

The Genetic Type and Geochemical Characters and Their Significance of the Condensates in China

Chen Jianfa, Sheng Pin, Wen Qibin

(State Key Laboratory of Gas Geochemistry, Lanzhou
Institute of Geology, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou, 730000)

Abstract

During recent decades exploration, it has been proved that a certain amount of condensate (or light oil) exists in many natural gas reservoirs from most of the oil/gas bearing basins. The condensate (or light oil) can be divided into three types according to their organic matter in source rock, i. e., the condensate formed by sapropel organic matter of marine facies, the condensate originated from humic organic matter in coal-bearing strata, and the condensate generated by mixed organic matter of terrestrial sedimentary rock. Detailed discussion is presented in this paper on the forming mechanism characteristics of the three types of condensates which originated from different ways.

The condensate generated from marine sapropel organic matter is generally formed by the splitting of kerogen or the high molecular liquid hydrocarbon formed formerly, only the thermal evolution reaches high maturation to over maturation stage (the range of R_o is about 1.3% to 2.0%). In coal-bearing strata, from immaturity ($R_o < 0.6\%$) to over maturation stages, the liquid hydrocarbons formed by the humic organic matter generally are in the form of condensates (or light oil) and accompany with natural gases. The condensate might also be formed low to high maturation stage by the mixed organic matter of terrestrial source rock.

In order to understand the maturation of the condensates from different basins in China. The paraffin index and heptane values are calculated by the compositions of condensates. The maturation of the condensate which are estimated by paraffin index I and heptane values are almost in line with the real geological settings, which shows that the thermal evolution of source rock for the condensates in China ranges from immature to over mature.

Some differences are found among the three types of condensates on the aspect of geochemical characteristics. As for their composition, the condensate formed by the humic organic matter of coal-bearing strata is relatively rich in aromatic hydrocarbons which is generally 16.2% to 23.5%, and saturation/aromatic ratios range from 3.2 to 5.2, moreover, its Pr/Ph ratios are comparatively high (generally higher than 3). The condensate formed by the marine sapropel organic matter is relatively lower than 1. The mentioned ratios of condensate formed by terrestrial mixed organic matter range between the former two types.

The composition of aromatic fraction (naphthalene series, bi-benzene series, and fluorene series), low molecular biomarkers (terpane), carbon isotopic composition of alkane and aromatic hydrocarbons are obviously different among the three type of condensates. Based on the above geochemical characteristics the maturity and genetic type of condensate can be identified effectively, and finally to confirm the origin and source of the natural gas associating with them.