

# 试论适合叠合盆地的油源对比方法

常象春, 王明镇, 韩作振

(山东科技大学 地球信息科学与工程学院, 山东 泰安 271019)

[摘要] 应用谱图形态、碳同位素分布、生标参数和多元统计法, 对叠合盆地的油源对比研究进行了分析对比, 发现谱图直接对比, 虽简单明了, 但叠合盆地的成藏特征会使得一些不具成因联系的样品具相似谱图, 或有成因联系的样品谱图差别却较大; 碳同位素分布亦较直观, 但分馏效应使得判别时偏离值不易把握; 生标参数虽具成因意义, 但受多因素影响; 生标参数组合能同时全面反映各控制因素; 分段成熟度可以有效地判别混源油; 多元统计法既能处理大量样品又能清楚界定相关性。结果表明, 多因素生标参数组合、分段成熟度和多元统计法是适合于叠合盆地油源对比的有效方法。

[关键词] 油源对比; 碳同位素; 生物标志物; 参数组合; 分段式对比; 多元统计; 叠合盆地

[中图分类号] P618.13 [文献标识码] A [文章编号] 1672-6561(2004)04-0032-05

[作者简介] 常象春(1974—), 男, 陕西绥德人, 讲师, 博士研究生, 现从事石油地质学方面的教学与科研工作。

油源对比作为油气地质研究中一项经常使用的技术, 用来搞清楚含油气盆地中油气与烃源岩之间的成因联系、油气运移的方向、距离和次生变化。一般认为, 烃源岩中干酪根降解生成的油气只有一部分运移到储层中或成藏或逸散, 其余部分仍残留在源岩中, 故而烃源岩与源于该层系的油气间具有亲缘关系, 在化学组成上必然存在一定程度地相似性<sup>[1]</sup>。

由于烃源岩的成熟演化及原油的运移和次生改造作用都会使原本同源的油气显示出这样或那样的差别, 所以, 油源对比时要选择成因意义明确、结构稳定的化合物以及受运移分馏效应影响甚微的参数, 事实上完全不受次生作用影响的参数指标是不存在的, 特别是对于中国陆相叠合盆地来说, 多套烃源岩、多期生排烃、多期油气运移、多期成藏、多期改造和调整使得油源对比难度更大<sup>[2]</sup>。因此, 选取合适的油源对比方法, 对于准确认识油源关系, 进而深入了解油气成藏条件和成藏过程具有重要意义。

## 1 常规油源对比方法在叠合盆地中的局限性

### 1.1 谱图直接对比

当原油与烃源岩存在亲缘关系时, 二者化合物组成相似, 必然在谱图上表现出相似的外貌特征, 通过目测来确定彼此间的相似性, 若分布相似表明可能存在油源关系, 若分布不同则表明没有油源关系<sup>[3]</sup>, 这种方法直观简便, 很受“偏爱”。谱图外貌虽然受控于原油中的化合物组成, 但也受生物降解作用、混源输入、成熟作用和运移作用等叠合盆地中常见的次生变化影响, 甚至会使同源的双方表现出不同谱图外貌, 不同源的反而会呈现相似外貌。Peters 和 Moldovan(1993)对比了怀俄明州两个原油, 根据生标和同位素特征, 综合认定其是同源的, 但由于它们热成熟演化程度不同, 气相色谱图存在明显差别<sup>[1]</sup>(图1)。M/Z191, 217 质谱图也经常用来对比油源关系, 藿烷类虽然成因意义明确、结构稳定, 但是其菌藻类生源自寒武纪就开始演化, 细菌在沉积物中也普遍存在, 长期的地质演化可以造成其指纹分布趋同, 相似条件下沉积的不同源岩生成的石油也会具有相似的藿烷指纹, 源岩的成熟作用及原油的运移、生物降解作用也会导致三环萜

[收稿日期] 2004-01-30

[基金项目] 国家重点基础研究发展规划(973)项目(2003CD214608); 中国地质调查局地质调查项目(200113000071-01)

烷含量的相对升高, 造成高成熟岩石中三环萜与原油中的相当, 会导致对比上的误解<sup>[3]</sup>。

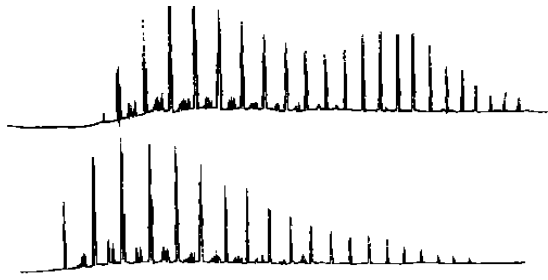


图 1 怀俄明州两个相关石油的气相色谱图

Fig. 1 Chromatograms of two genesis-related oils in Wyoming

1.2 碳同位素分布对比

石油的稳定碳同位素组成取决于原始有机质、生成环境和演化程度, 不同成因的石油间存在较大差异, 根据碳同位素的组成特征可判别油源的成因联系。Stahl(1978)提出利用稳定碳同位素类型曲线进行油源追踪, 原油的饱和烃、芳烃、非烃和沥青质的  $\delta^{13}\text{C}$  值, 是随着其极性的增强而依次增加的, 这 5 种组分的  $\delta^{13}\text{C}$  值延长线, 应落在生油岩干酪根的  $\delta^{13}\text{C}$  值及其附近, 偏离值在  $0.5 \times 10^{-3}$  之内, 或者碳同位素分布曲线形状相近(图 2), 就认定其间具有良好亲缘关系<sup>[4]</sup>。越来越多的研究表明, 碳同位素存在分馏效应, 尽管有的学者认为碳同位素值仅有  $0.5 \times 10^{-3}$  的差异不足以区分源岩有机相<sup>[5]</sup>, 但运移分馏对碳同位素的影响幅度达  $(1 \sim 2) \times 10^{-3}$ <sup>[5-7]</sup>, 这对油源对比中碳同位素间偏离程度的把握造成很大难度, 当分布曲线形状与趋势相似时, 究竟偏离多远算作同源; 或当稳定碳同位素值相接近时, 分布曲线的形状和趋势如何考虑, 均不易掌握。此外淡水有机相油气混入到咸水有机相油气中、陆生来源油气混入海相油气、碳酸盐含量

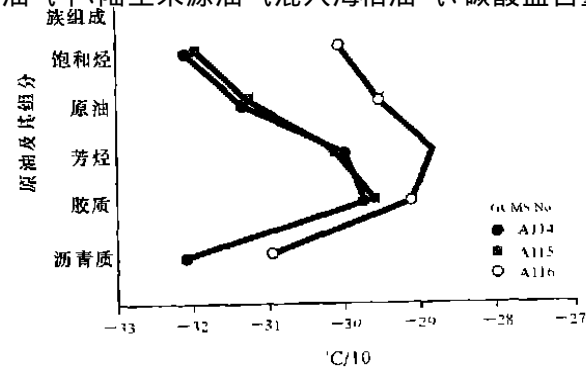


图 2 蒂曼-伯朝拉盆地三个原油的不规则碳同位素曲线

Fig. 2 Irregular carbon isotope curves of three oils in Basin

的降低都会使  $\delta^{13}\text{C}$  变轻<sup>[8]</sup>, 这些情况在叠合盆地中极为常见, 均增加了判别时的难度。

1.3 生标参数相关对比

生物标志物(甾、萜烷烃)的相对含量和立体构型特征主要受有机质母源输入条件、沉积环境和热演化程度的共同控制, 对于有生源关系的源岩与原油, 其中的甾烷、萜烷的相对含量、组合特征应是相似的。事实上同一个生标参数受到的影响或控制因素并不是单一的, 如  $\text{Pr}/\text{Ph}$  比既反映环境介质又受成熟度影响, 该值会随成熟度增加而增加, 而且随着成熟演化作用,  $\text{Pr}/\text{Ph}$  增加同时,  $\text{Ph}/\text{nC}_{18}$  值反而会降低<sup>[9]</sup>。对于适用未成熟到过成熟的参数  $\text{Ts}/\text{Tm}$  来说, 相同热演化条件下, 受沉积环境的影响, 当沉积环境的  $\text{Eh}$  值较低时, 该值增大, 当  $\text{pH}$  较高时, 该值则降低<sup>[10]</sup>; 高伽玛蜡烷指数常可表征高盐度沉积环境, 但这样的环境并不总是具高的伽玛蜡烷指数, 伽玛蜡烷先质只在一定盐度下繁殖,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$  在  $0.1\% \sim 2\%$  内, 伽玛蜡烷随含盐度增大而增大, 盐度过高或过低, 伽玛蜡烷含量则急剧减小<sup>[11]</sup>。特别是多油源的情况就更为复杂, 如王文军等通过混源实验, 认为成熟油中即使只有  $30\%$  的低熟油混入, 混合油会表现出低成熟特征<sup>[12]</sup>。叠合盆地的多油源、多期运移、改造等复杂影响因素使得只靠生标参数相关法或甾烷、萜烷指纹分布图难于全面把握、准确对比油源。

2 多因素生物标志参数综合对比法能同时全面反映各控制要素

如果原油之间或源岩与原油之间具有亲缘关系, 则两者无论在母源性质、沉积环境、成熟度上都应是高度一致的, 但影响生物标志化合物的因素十分复杂, 任何单一指标都具有局限性<sup>[13]</sup>。考虑到上述因素, 不少学者确立了多因素生标参数综合对比法, 如选取反映母源沉积环境的参数:  $\alpha\alpha\alpha(20\text{R})$  甾烷  $\text{C}_{27}/\text{C}_{29}$ ,  $\alpha\alpha\alpha(20\text{R})$  甾烷  $\text{C}_{28}/\text{C}_{29}$ , (莫烷+藿烷)  $\text{C}_{29}/\text{C}_{30}$ ; 反映母源类型的参数: 伽玛蜡烷  $\text{C}_{30}$  (莫烷+藿烷); 反映成熟度的参数:  $\alpha\alpha\alpha\text{C}_{29}$  甾烷  $20\text{S}/(20\text{S}+20\text{R})$ ,  $\text{C}_{29}$  甾烷  $\beta\beta/(\beta\beta+\alpha\alpha)$ ,  $\text{C}_{31}$  藿烷  $22\text{S}/(22\text{S}+22\text{R})$ ,  $\text{C}_{29}$  藿烷/莫烷等, 取得了良好效果<sup>[13-14]</sup>。

多因素生标参数综合对比法, 由于同时考虑了母源输入、沉积环境、成熟演化等信息, 使得在判别时能对成因进行综合分析, 反映情况较为全面。当

各类生标参数分布均相似,表明二者具有一定成因联系,若仅有某一个或某一类参数有差别,须排除各种成藏原因,如分馏效应、生物降解、水洗作用、多源混入等的影响,才能准确分析它们的关系,若各类参数多数均有差异,则样品间就不应当存在成因联系。如图 3,古洞煤 P<sub>2</sub>l 矿龙潭组源岩与盐参 1 井凝析油相近,除了藿烷成熟度参数外,其余各参数均与之差别较大,而藿烷成熟参数的相爰是由于藿烷异构体均达到构型转化平衡态,参数已不能再反映成熟度差别所致,表明二者没有生源上的联系。盐参 1 井凝析油与 N4 井 P<sub>2</sub>q 源岩多因素曲线均吻合较好,体现了良好地相关性。

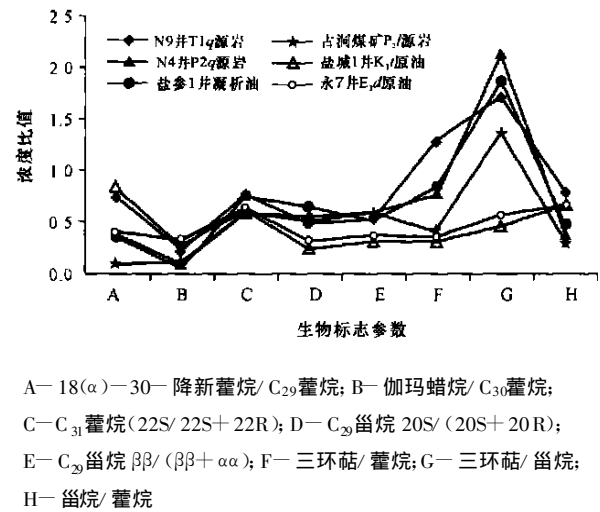


图 3 多因素生物标志参数综合对比  
Fig. 3 Correlation by assemblage of multi-factor biomarker parameters

3 分段成熟度对比法有效判识混源油

混源油现象在叠合盆地中普遍存在,由于形成混源油的源岩母质类型、沉积环境、成熟演化程度都多种多样,相混过程也可能错综复杂,分段式对比法指的是从“轻、中、重全面剖析原油成因和多因素综合研究”,其中“轻”是指原油中  $C_5$ — $C_9$  分子量较轻的组分,“中”是指  $C_{10}$ — $C_{19}$  具中等分子量的组分,“重”则指  $C_{20}$  以上较重的组分<sup>[13]</sup>。研究中最常用的就是分段原油成熟度参数,“轻”段有正庚烷值、异庚烷值;“中”段主要有 DNR, DBT, MPI 等;“重”段主要有  $Ts/Tm$ ,  $\alpha\alpha C_{29}$  甾烷  $20S/(20S+20R)$ ,  $C_{29}$  甾烷  $\beta\beta/(\beta\beta+\alpha\alpha)$ ,  $C_{32}$  藿烷  $22S/(22S+22R)$  等。一般情况下,“轻”、“中”、“重”三段的成熟度应该是相近的,当彼此间产生明显差异时,就要

采用原油、源岩、成藏史、构造演化史等综合研究。如苏北盆地盐城凹陷朱家墩气藏伴生的凝析油,作为轻质组分的轻烃中石蜡指数介于 1.39~5.8,庚烷指数介于 26.85~31.77,反映一种高成熟演化特征;中等组分中甲基菲指数 MPI 1, MPI 2 分别介于 0.115~0.25, 0.14~0.25,体现出未熟或低熟的特征。而反映重组分特征的  $C_{31}$  藿烷  $22S/(22S+22R)$  介于 0.55~0.71,达到了异构化平衡状态,甾烷  $C_{29}20S/(20S+20R)$ ,  $C_{29}\beta\beta/(\beta\beta+\alpha\alpha)$  分别介于 0.40~0.70, 0.38~0.50,反映达到主要生油演化阶段<sup>[16]</sup>(表 1)。

表 1 盐城凹陷原油凝析油成熟度参数

Table 1 Maturity parameters of oils and condensate in Yancheng Sag							
井号	盐参 1	盐参 1	盐参 1	盐参 1	盐参 1	盐参 1	N 4
样品	油顶气	轻质油	凝析油	凝(清)	凝(浊)	原油	原油
庚烷指数	26.85	28.14	31.77	—	—	—	—
石蜡指数	5.8	1.39	1.48	—	—	—	—
MPI 1	—	—	0.25	0.15	0.16	0.17	0.53
MPI 2	—	—	0.25	0.15	0.14	0.17	0.59
$Ts/Tm$	—	—	2.01	3.01	3.40	1.91	1.38
$C_{31}S/(S+R)$	—	—	0.71	0.60	0.60	0.59	0.55
$C_{29}S/(S+R)$	—	—	0.70	0.48	0.40	0.21	0.52
$C_{29}\beta\beta/(\beta\beta+\alpha\alpha)$	—	—	0.49	0.50	0.38	0.26	0.55

多因素分析对比研究表明,上古生界处于高成熟演化的海相腐泥型源岩,受热裂解生成大量气体,在长期活动性断裂提供的通道下向上运移,由于压力释放产生分馏,分馏出来的轻烃组分在浅层形成凝析油,而泰州组腐殖型源岩处于低成熟-成熟状态,亦能贡献少许腐殖型油气,故形成主体为高成熟腐泥型气,同时混有成熟态的腐殖型气<sup>[17]</sup>。中等组分甲基菲成熟度参数的异常变化,可能与其异构体热效应有关,随着成熟度增加,制约甲基菲 4 个异构体的主导因素已由成熟阶段的重排反应转变成了高演化阶段的脱甲基作用,而由脱甲基作用引起的 4 个甲基菲异构体相对丰度与成熟度关系更加复杂,这种情况在下扬子地区广为存在<sup>[18]</sup>。凝析油中的重质组分生物标志物组合与高成熟的海相腐泥型源岩具有良好相关性,但成熟度参数值却变得要低一些,这可能也与泰州组低熟油气的混入有关。成熟油中甾、萜类生物标志物浓度比低成熟原油中所含的浓度要低几个数量级,因而混源油中甾、萜烷面貌及其反映的成熟度正是反映了小部

分具高浓度甾、萜烷浓度、成熟度较低组分的特征, 这一点在混源实验中均有证实<sup>[14]</sup>。

4 多元统计法

4.1 聚类分析法

聚类分析的思想认为, 所研究的对象间存在不同的相似性, 按“物以类聚”原则来研究事物分类, 根据研究样品的观测指标, 找出能够度量样品之间相似程度的统计量, 相同成因的样品关系密切, 不同成因的样品关系较为疏远<sup>[19]</sup>。同样对于盐城凝析油的对比, 选用同前参数, 结果如图 4, 盐参 1 井凝析油与 N4 井 P<sub>2q</sub> 源岩相似距离系数(欧氏距离)为 0.35, 显现出高度的相似性, 盐城 2 井 K<sub>2t</sub> 原油与永 7 井 E<sub>2d</sub> 原油相似距离系数为 0.45。前人研究表明, 永 7 井 E<sub>2d</sub> 原油主要源于阜四段, 而盐城 2 井 K<sub>2t</sub> 原油源于阜二段, 两套源岩仅有成熟度上的微小差别, 母质输入与沉积成烃环境几乎完全相同, 故二者也体现出一定的相似性。利用欧氏距离衡量样品的相关性时, 距离系数越小, 表明样品间相似程度越大, 一般小 0.5 就应当认为其相关性较强, 具有一定的成因联系。

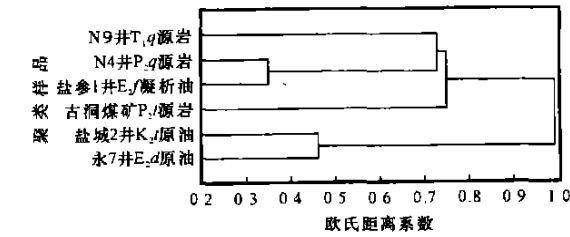


图 4 聚类分析谱系

Fig. 4 Tree clustering graph used for oil/ source correlation

由于聚类分析是根据各种观测指标, 求出其相似程度统计量, 把关系密切的样品聚合为一个小的分类单位, 关系疏远的聚为一个大的分类单位, 最终结果以谱系图来体现, 清楚了。

4.2 因子分析法

因子分析方法认为, 研究的样品或变量间不是独立的, 彼此间存在复杂相关关系, 通过数学方法把数目众多的样品(或变量)作线性组合, 组合出几个能代表原有地质样品变化信息的主要成分, 同样对于盐城凹陷凝析油的对比, 选用同前参数, 结果如图 5, 其判别结果与前完全一致, 盐参 1 井凝析油与 N4 井 P<sub>2q</sub> 源岩在因子得分图中分布非常集中, 体现了良好地相关性

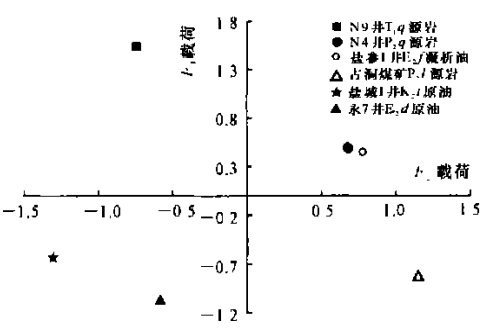


图 5 用于油源对比的因子得分

ig. 5 IFactor scores used for oil/ source correlation

因子分析能够对大量分析数据进行精简压缩, 而又不失数据中包含的成因信息, 便于综合分析, 同时把庞杂纷乱的数据按成因联系进行归纳和分类, 整理出几条客观的成因线索, 有利于成因推理。更具特色的是能分解地质过程中各种成因叠加过程, 进而有效识别单个过程, 使对比结果精确有效。

5 结论与讨论

油源对比在油气地质研究中意义重大, 选用合适的方法会使对比容易进行且结论准确。通过对多种油源(油)对比方法的剖析, 笔者认为, 对比时应尽可能用“负相关”法排除不具相关性的样品, 直接对比法、指纹分布法或生标参数相关法简单明了, 易于操作, 但由于其受多重因素影响, 应用中存在局限性或不确定性, 主要适合于地质作用或成藏条件单一的情况。在叠合盆地纷繁复杂的地质作用或地质过程中, 传统方法的对比受到限制, 而基于生物标志化化合物的多因素参数组合综合对比能够在对比的同时体现母质类型、沉积环境、演化程度等控制要素, 便于同时全面地把握油源间的相似与差异, 并明确各自的主控条件。近期提出的分段式成熟度对比, 则把油气按组分的轻重进行分段, 通过各段成熟度的比较来有效判识混源油, 效果明显。多元统计法能在众多样品及各种测试指标中, 把庞杂纷乱的数据按成因联系进行归纳和分类, 整理出成因线索, 甚至还可以分解各种成因叠加过程, 同时不失数据中包含的成因信息, 颇值关注。当然不管采用那种方法, 其最终对比结论都应当与地质条件相结合, 从源岩类型及展布、埋藏及热演化史、运聚成藏史、改造保存条件, 甚至是盆地沉积充填、构造演化等方面能得以合理解释, 符合客观实际, 才会使对比结果准确可靠。

## [ 参 考 文 献 ]

- [ 1 ] K E 彼得斯, J M 莫尔多万. 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.
- [ 2 ] 赵文智, 张光亚, 何海清, 等. 中国海相石油地质与叠合含油气盆地[ M ]. 北京: 地质出版社, 2002.
- [ 3 ] 郭海花, 常象春, 张金亮. 兰坪坳陷上三叠统原油地球化学及有机成矿意义[ J ]. 长安大学学报(地球科学版), 2003, 25(4): 1~5.
- [ 4 ] 张厚福, 方朝亮, 高先志, 等. 石油地质学[ M ]. 北京: 石油工业出版社, 1999.
- [ 5 ] Curiale J A, Bromley B W. Migration induced compositional changes in oils and condensates of a single field[ J ]. Organic Geochemistry, 1996, 24: 1097~1113.
- [ 6 ] Dzou L I P, Houghes W B. Geochemistry of oils and condensates, K Field, offshore Taiwan; a case study in migration fractionation [ J ]. Organic Geochemistry, 1993, 20: 437~462.
- [ 7 ] 张水昌, 何忠华. 复杂盆地油源对比思路及参数选择——以塔里木盆地为例[ A ]. 见: 梁狄刚. 中国石油天然气集团公司油气地球化学重点实验室文集(第一集)[ C ]. 北京: 石油工业出版社, 2001. 127~142.
- [ 8 ] 陈建平, 黄第藩, 陈建军, 等. 酒东盆地油气生成和运移[ M ]. 北京: 石油工业出版社, 1996.
- [ 9 ] Ten Haven H L, de Leeuw J W, Peakman T M, et al. Restricted utility of the pristane/phytane ratio as a palaeoenvironmental indicator[ J ]. Nature, 1987, 330: 641~643.
- [ 10 ] Rulotter J, Marzi R. Natural and artificial maturation of biological markers in a Toarcian shale from northern Germany[ J ]. Organic Geochemistry, 1988, 13: 639~645.
- [ 11 ] 王锐良, 尚慧芸, 傅家谟, 等. 不同沉积环境中伽玛蜡烷的分布特征及其成因探讨[ A ]. 见: 傅家谟. 中国科学院地球化学研究所有机地球化学开放研究实验室研究年报(1988)[ C ]. 北京: 科学出版社, 1990. 100~107.
- [ 12 ] 王文军, 宋宁, 姜乃煌, 等. 未熟油与成熟油的混源实验、混源理论图版及其应用[ J ]. 石油勘探与开发, 1998, 26(4): 34~37.
- [ 13 ] 张枝焕, 关强. 新疆三塘湖盆地二叠系油源分析[ J ]. 石油实验地质, 1998, 20(2): 174~181.
- [ 14 ] 常象春, 郭海花, 张金亮, 等. 江苏高邮凹陷永安气藏烃类流体包裹体特征和天然气成藏条件[ J ]. 地质通报, 2003, 22(10): 808~813.
- [ 15 ] 王培荣, 何文祥, 王占生, 等. 判识混源油的方法及实例[ A ]. 见: 梁狄刚. 有机地球化学研究新进展[ C ]. 北京: 石油工业出版社, 2002. 253~257.
- [ 16 ] 常象春, 毛凤鸣, 郭海花. 盐城朱家墩气藏凝析油成因探讨[ A ]. 见: 张金亮. 油藏地质与油藏表征[ C ]. 西安: 西安地图出版社, 2002. 84~95.
- [ 17 ] 张金亮, 常象春, 刘宝瑞, 等. 苏北盐城油气藏流体历史分析及成藏机理[ J ]. 地质学报, 2002, 76(2): 254~259.
- [ 18 ] 包建平, 王铁冠, 王金渝. 下扬子地区海相中、古生界有机地球化学[ M ]. 重庆: 重庆大学出版社, 1996.
- [ 19 ] 陆明德, 田时芸. 石油天然气数学地质[ M ]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1991.

## Discussion on methods of oil-source correlations suitable for composite basins

CHANG Xiang-chun, WANG Ming-zhen, HAN Zuo-zhen

(School of Earth Information Sciences and Engineering, Shandong University of  
Science and Technology, Shandong Tai'an 271019, China)

**Abstract:** This paper correlates the oils and source rocks in composite basins through the gas chromatogram, stable carbon isotope, biomarker parameters and multi-variant statistical analysis. The use of chromatograms is simple and distinct, but sometimes non-genesis-related samples may show similar patterns while genesis-related samples may demonstrate different patterns of chromatograms, which caused by the characteristics of pool-forming in composite basins. The use of carbon isotope is intuitionistic with indefinite departure induced by fractionation. Biomarkers are of genetic characteristics influenced by multiple factors. Assemblage of biomarker parameters is the embodiment of controlling factors simultaneously and thoroughly. Maturities of subsection are available for identifying mixed-source oils. Multi-variant statistical analysis can both deal with large numbers of samples and determine their relativity. The results indicate that using assemblage of multi-factor biomarker parameters, subsection correlation or multi-variant statistical analysis could more effectively trace the source of oils in composite basins.

**Key words:** oil/source rock correlation; stable carbon isotope; biomarker; assemblage of biomarker parameters; subsection correlation; multi-variant statistical analysis; composite basin

[ 英文审定: 李庆春 ]