

运移分馏作用：凝析油和蜡质油形成的一种重要机制

张水昌

(中国石油天然气集团公司油气地球化学重点实验室, 北京 100083. Email: sczhang@public.east.cn.net)

摘要 地下深部的烃类物质在由断裂诱导的压力释放和过量干气注入的共同作用下会导致油、气两相流体的产生。由于不同原油组分在气液两相中的分配系数不同, 低碳数的烃类更易溶解在气相中, 形成凝析油; 而高碳数的烃类则残留在油相中, 形成蜡质含量较高的油藏。这种分馏过程同时导致通常与源岩有机质或热成熟度有关的原油组分参数(如饱和烃/芳烃值)和甾萜烷分子参数的广泛变化, 原油 $\delta^{13}\text{C}$ 值也因此变重 1‰左右。

关键词 运移分馏作用 凝析油 蜡质油 轮南油区

源岩相、热成熟度和储层蚀变是影响地下原油性质和组分变化的主要控制因素, 这一点已得到广泛共识。近年来, 对深部储层中多相流体的研究发现, 油、气之间相互溶解和解溶过程所引起的分异作用同样严重影响原油的性质及分布^[1~4], 导致流体的强烈非均质性。这里介绍的就是由运移分馏作用所导致的同一油区凝析油和蜡质油的形成。

1 运移分馏作用

当地下深部储层中单相油、气混合物在压力降低作用足以导致两相流体产生即饱含油的气逐渐从单相流体中解析出来时, 其烃类或非烃类成分都将在运移相(饱和油的气相)和残留相(油相)中发生化合物的配分^[1], 由于不同原油组分在气、液两相中的分配系数不同, 在相同温压条件下, 低碳数的烃类更易溶于气相中; 而高碳数的烃类则残留在油相中; 饱和烃更易溶于气相中, 而芳烃则易残留在油相中^[5]。

与储层连通的断层或断裂的发育以及过量外来气的注入是运移分馏作用发生的重要条件。断裂作用一般伴随着压力的降低, 当压力降低时, 饱和油的气相从饱和气的流体中分离出的那一刻即发生分馏作用。分馏出来的烃类主要是轻烃, 并沿断裂运移至较浅的储层中形成凝析油、气藏^[1, 2, 6], 而残留在深部的油相则随分馏作用的强度而含有程度不等的重质成分, 蜡质油就是残留的产物。过量干气的注入将导致饱和油的气相或饱和气的油相的形成, 这会增加运移分馏作用发生的机会^[2]。

2 塔里木盆地研究实例

轮南油区(包括 3 个油田、1 个气田)是塔里木盆地较早发现的油区之一, 位于塔北隆起东段。由于隆起形成期早, 多期的构造运动使这个地区发育了多套与断裂活动有关的圈闭并成为油、气运移的主要指向区和聚集区。其主要产层为侏罗系-三叠系和石炭系-奥陶系, 其中, 三叠系-侏罗系产层主要是气油比小的正常原油; 而较深的石炭系-奥陶系油藏主要是高气油比的凝析油及蜡质油。

对于轮南油区凝析油、气的富集, 普遍认为是与寒武系-奥陶系烃源岩的高演化程度有关。而

对于蜡质油的形成,则认为主要是与寒武系-奥陶系的菌藻生源有关^[7].然而,原油成熟度的计算结果表明这些凝析油与蜡质油和正常油基本上在同一成熟度范围,相当于镜质体反射率(VRE)0.83%~0.89%,位于生油窗范围.它们显然不是源岩有机质在高成熟阶段($R_o > 1.3\%$)的热裂解产物;油源对比结果也表明无论是凝析油还是蜡质油、正常油,均与中、上奥陶统生油层具有明显的亲缘关系^[8].所以,源岩相也不是导致该区原油高含蜡的原因.那么,导致该区原油类型多样性的主控因素最有可能是运移分馏作用.

首先,轮南油区存在运移分馏作用发生的条件,即大量外来干气的注入和断裂作用.该区气藏数多达22个,其中石炭系-奥陶系气藏占15个.并且气的干燥系数大, C_1/C_1^+ 值一般可达0.95~0.99,计算的 R_o 值高达1.9%~2.37%,它们毫无疑问是来源于寒武系过成熟源岩.由于该地区大小断层十分发育,过量气的注入将先前形成的油藏完全溶解,同时导致地层压力加大,再加上喜马拉雅运动,从而诱发断层的进一步活动而导致油的再运移和分异.

其次,原油中分子化合物的分析结果显示轮南油区的凝析油和蜡质油并不是原生的(非原油).如图1(a)所示,这些凝析油和蜡质油在石蜡度与芳香度的关系图上几乎是沿Y轴变化,并且其中的特征成分(如甲苯、二甲苯和甲基环己烷等)与所预测的凝析油和蜡质油是运移分馏作用的

产物的假设也完全一致^[2].因此,可以认为轮南油区凝析油和蜡质油是在运移分馏过程中形成的.当分馏作用不断增强时,轻质组分不断地分异并运移出去,残留的油会越来越富集重质组分,这样就形成了蜡质油.图1(b)所示的原油蜡含量与分馏指数 $[FI = nC_{10} / (nC_{16} + nC_{25})]$ 的关系则说明了蜡质含量与重质组分的关系,随着分馏作用的增强,被分馏的原油(残留油)的蜡质含量会逐渐增高,而分馏出来的原油(凝析油)的蜡质含量则非常低.

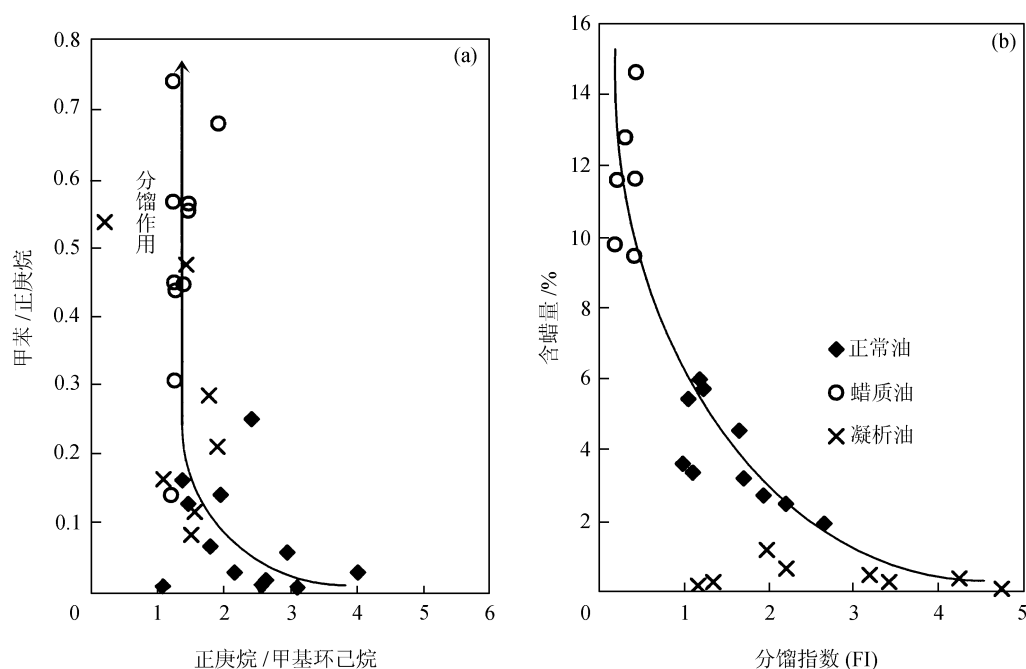


图1 轮南油区原油石蜡度(正庚烷/甲基环己烷值)与芳香度(甲苯/正庚烷值)关系图(a)和原油分馏指数 $[FI = nC_{10} / (nC_{16} + nC_{25})]$ 与蜡含量关系图(b)

(a) 指示运移分馏作用

运移分馏作用对原油组分的影响是广泛的, 这种影响甚至会“击溃”由源岩继承下来的许多信息, 并同时导致成熟度参数的改变. 由于不同碳数化合物或不同组分在气、液两相中的分配系数不同, 低碳数烷烃更容易进入到气相中, 因此, 相邻同系物(或准同系物, 如长侧链对短侧链的环烷烃)都会随分子量的不同而显示出浓度上的差异, 如 $C_{21}/(C_{21}+C_{28})$ 三芳甾烷值、 $C_{23}/(C_{23}$

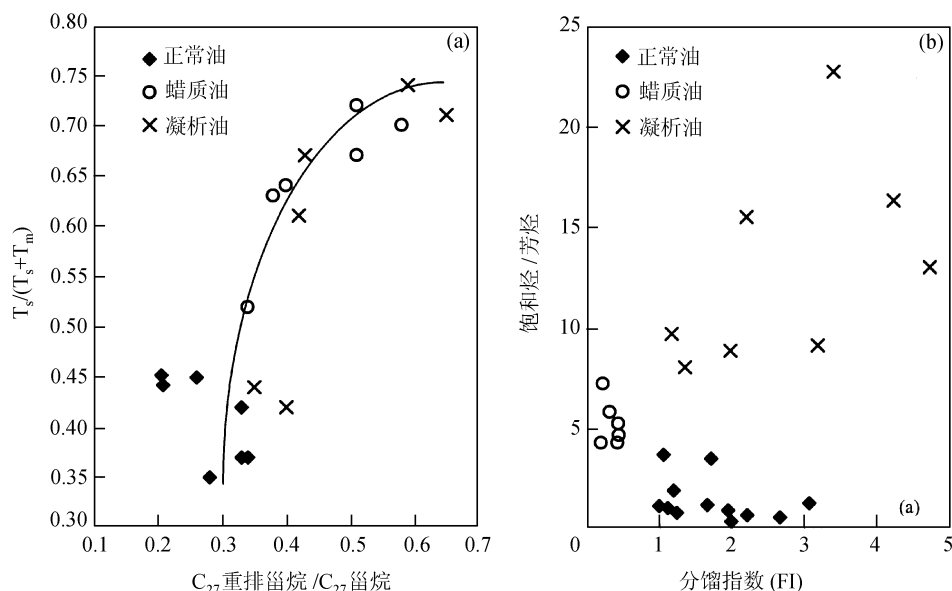


图2 轮南油区原油 $T_s/(T_s+T_m)$ 值和 C_{27} 重排甾烷/ C_{27} 甾烷值关系图(a)和原油分馏指数[FI = $n C_{10} / (n C_{16} + n C_{25})$]与饱和烃/芳烃值关系图(b)

图中数值的变化归因于运移分馏作用的影响

三环萜烷+ C_{30} 藿烷)值等都会表现出随运移分馏作用的增强而增大. 其实, 相同分子量的化合物如 T_s/T_m 值和 C_{27} 重排甾烷/ C_{27} 甾烷值由于分子和分母化合物在气相色谱上的流出时间不同也会显示出浓度上的差异, 先流出的化合物更容易溶解到气相中(图2(a)); 由于脂肪烃比芳烃更容易溶解在烃气中, 在运移相(气相)中, 饱和烃/芳烃值就比残留相中的更大(图2(b)).

此外, 由于原油中低碳数正烷烃更富 ^{13}C , 因而, 运移分馏作用的结果也会导致凝析油(运移相)的 $\delta^{13}C$ 值的变重^[1,3], 轮南油区的凝析油的 $\delta^{13}C$ 值明显比正常油(原始油)重 1‰左右(图3). 作为残留相的蜡质油的碳同位素组成本应该轻, 然而, 从图3可以看出, 蜡质油与凝析油的 $\delta^{13}C$ 值基本上相近, 均大于-32‰. 对这一现象可用图4来解释: 轮南油区蜡质油的形成是由多

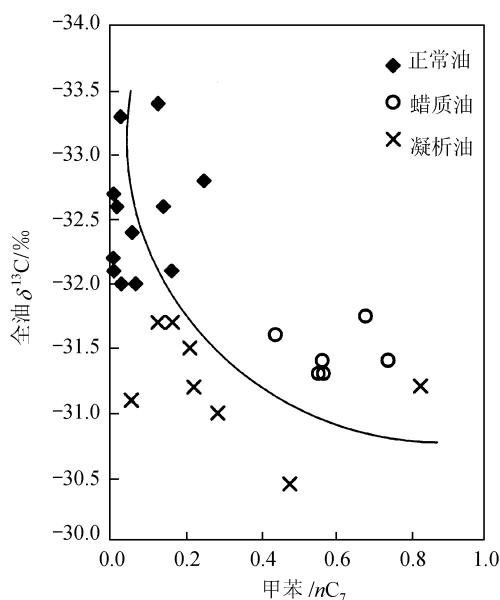


图3 轮南油区原油全油 $\delta^{13}C$ 值与芳香度(甲苯/正庚烷)关系图

步运移

分馏作用所导致的,第 n 步所形成的残留油(蜡质油)的原始油是 $n-1$ 步时的凝析油,这种凝析油是富 ^{13}C 的,而由此形成的残留油也必然富 ^{13}C ,含蜡量越高,说明经历的分馏过程就越多,残留油就越富 ^{13}C 。

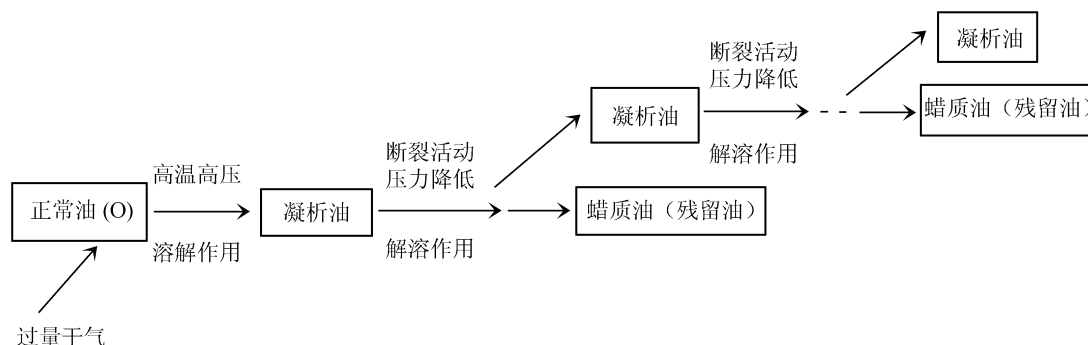


图4 轮南油区原油运移分馏过程示意图

3 结论

运移分馏作用提供了凝析油和蜡质油形成的一种新模式,同时,这一概念的形成将动摇人们视“源”为中心的传统的油源对比研究方法。通过动态地考虑石油组分变化的诸多影响因素,可以防止发生原油分类及成熟度解释上的错误。此外,由运移分馏过程所产生的大量凝析油、气的形成并在浅部地层的富集,大大提高了原油的商用价值,降低了开发生产成本,同时也增加了在深部寻找残留油藏的可能性。

致谢 本工作为国家自然科学基金资助项目(批准号:49771376)。

参 考 文 献

- Curiale J A, Bromley B W. Migration induced compositional changes in oils and condensates of a single field. *Organic Geochemistry*, 1996, 24: 1097~1113
- Thompson K F M. Fractionated aromatic petroleum and generation of gas-condensates. *Organic Geochemistry*, 1987, 11: 237~246
- Dzou L I P, Hughes W B. Geochemistry of oils and condensates, K Field, offshore Taiwan: a case study in migration fractionation. *Organic Geochemistry*, 1993, 20: 437~462
- Thompson K F M. Gas-condensates migration and oil fractionation in deltaic systems. *Marine Petroleum Geology*, 1988, 5: 237~246
- Price L C, Wenger L M, Ging T, et al. Solubility of crude oil in methane as a function of pressure and temperature. *Organic Geochemistry*, 1983, 4: 201~221
- Larter S R, Mills N. Phase-controlled molecular fractionation in migrating petroleum charges. In: England W A, Fleet A S, eds. *Petroleum Migration*. London: Geol Soc Spec Pub, 1991, 59: 191~205
- 黄第藩, 赵孟军. 塔里木盆地原油物性及海相原油中含蜡低含硫的成因分析. 见: 童晓光, 梁狄刚, 贾承造主编. 塔里木盆地石油地质研究新进展. 北京: 科学出版社, 1996. 329~337
- Zhang S C, Hanson A D, Moldowan J M, et al. Paleozoic oil-source rock correlations in the Tarim Basin, NW China. *Organic Geochemistry*, 2000 (in press)

(1999-09-23 收稿, 2000-01-19 收修改稿)