

# 断陷盆地多次运移成藏的有机地球化学研究

陈建渝 牛瑞卿

(中国地质大学资源学院, 武汉 430074)

**摘要:** 油气运移一直是石油地质学中的重要理论问题,也是该领域中的难题.以济阳拗陷东北部沾化凹陷中的几个油田为例,根据原油及烃源岩有机地化分析结果,特别是生物标志物的组成,划分原油类型,进行油源对比,以探讨断陷盆地中油气多次运移和成藏的特征.研究证明:沾化凹陷中渤南油田的形成与三次油气运移和成藏过程有关;位于边缘断裂带的垦西油田是油气交替通过输导层作侧向运移和通过断层作纵向运移聚集的结果;孤岛类型的古潜山油田的形成主要与油气从老第三纪油藏向上进行第三次运移有关.在断陷盆地内部以侧向运移和充注为主多形成单源油藏,在断裂带以垂向充注为主常形成混源油藏.油气的多次运移与盆地中断裂活动的长期性和多期性有关.

**关键词:** 断陷盆地;运移;成藏;生物标志物;第三次运移;济阳拗陷.

中图分类号: P618.130.1 文献标识码: A

文章编号: 1000-2383(2000)03-0253-07

**作者简介:** 陈建渝,女,教授,1944年出生,1966年毕业于北京地质学院,长期从事石油地质、有机地球化学及油藏工程领域的教学和科研工作.

我国东部的断陷盆地由于中新世代的构造演化,特别是老第三纪的强烈的多幕式的断陷活动提供了发育多套生储盖层系及油气多次成藏的动力学背景,在大多数盆地中形成了复式含油气系统<sup>[1]</sup>.每个系统有着各自的烃源岩和油气的运移聚集期,因此,整个盆地表现出多次运移和成藏的特征.其次,断裂活动的长期性和多期性,也是造成油气多次运移和成藏的主要因素.断裂是断陷盆地构造变动的主要形式.油气的生成、运移和聚集都受到断裂活动的控制.在油气运移过程中,运移的通道是由砂岩输导层、断层、不整合面及微裂隙组成的网络.其中,断层常常是网络的骨架.断裂活动的封闭性、强度、时间及期次会直接影响油气的运移方向、数量和时间.单一的油田也可能是多次运移和成藏的结果,因此,油气多次运移和成藏是断陷盆地的重要石油地质特征,也是选择勘探目标时必须考虑的问题.

济阳拗陷是我国东部重要的新生代含油气盆地<sup>[2]</sup>.笔者通过对济阳拗陷东北部沾化凹陷中的渤南油田、垦西油田及孤岛油田的有机地球化学研究,探讨了断陷盆地中油气运移成藏的一些特征<sup>[3]</sup>.沾



图1 渤南、垦西和孤岛油田的分布位置

Fig. 1 Location map of Bonan, Kenxi and Gudao oilfields

1. E<sub>3</sub>底等深线, m; 2. 油气运移方向

化凹陷是济阳拗陷中重要的富生烃洼陷<sup>[4-6]</sup>,在众多的油田中,渤南油田和孤岛油田均是亿吨级地质储量的大油田,垦西油田地质储量也高达几千万吨



图 2 渤南油田三种类型原油的代表性甾烷萜烷质量色谱

Fig. 2 Representative mass-chromatographs of sterans and terpanes from the oils of three types in Bonan oilfield

4MS. C<sub>30</sub>4 - 甲基甾烷; DS. 甲藻甾烷;  $\gamma$ . 伽玛腊烷; R. 重排甾烷; Tm. 17 $\alpha$ (H)三降藿烷; Ts. 18 $\alpha$ (H)三降藿烷; Es<sub>1</sub>, Es<sub>3</sub>, Es<sub>4</sub> 分别为沙河街组第一、三、四段; M/Z217 为甾烷的特征离子质量数; M/Z191 为萜烷的特征离子质量数; C<sub>27</sub> - C<sub>35</sub> 为质量色谱图中化合物的碳数

(图 1). 凹陷中存在着 3 套性质不同的烃源岩, 即始新统沙河街组第四段、第三段及渐新统沙河街组第一段. 有机地球化学分析表明沙三段及沙一段烃源岩以油页岩和暗色泥岩为主, 均为富含藻类的优质源岩, 而沙四段烃源岩也为质量尚好的烃源岩. 本区普遍存在的高热流及其造成的高地温梯度(32~35 °C/km)十分有利于有机质转化生烃. 因此, 在沾化凹陷内部沙三段及沙四段烃源岩均已进入成熟-高成熟阶段( $R_o=0.7\% \sim 1.3\%$ ), 沙一段烃源岩也进入低成熟阶段( $R_o=0.4\% \sim 0.6\%$ ). 由这些烃源岩生成的原油在不同的地质时期, 沿着不同的运移通道充注到各种类型的圈闭中, 形成了不同规模的油

气田. 油气的运移是成藏作用的关键, 也是最难以追踪和模拟的过程, 但是对盆地中烃源岩及原油的有机地球化学研究有助于认识这个过程.

## 1 渤南油田

### 1.1 三类原油

渤南油田是位于富生烃的渤南-孤北洼陷中的断块-岩性圈闭类型的大油田, 它具有丰富的石油储量及产量. 其中的含油层系以沙三段、沙二段为主, 其次是沙四段和沙一段<sup>[4-6]</sup>. 在渤南油田中, 根

据生物标志物的组成我们区别出了3类不同成因的原油(图2)。

第一类原油见于北部近洼陷中心的沙二段—沙一段储层,如在义18井、义20井等,为正常高腊低硫原油,其密度在 $0.87\sim 0.90\text{ g/cm}^3$ 范围。原油具有与沙一段生油岩相同的生物标志物组合特征,即低 $w(\text{Pr})/w(\text{Ph})$ (姥鲨烷/植烷)比值( $0.39\sim 0.64$ )、高伽玛蜡烷丰度, $w(\text{伽玛蜡烷})/w(\text{C}_{30}\alpha\beta\text{霍烷})$ ,即伽玛蜡烷指数 $>0.3$ , $\text{C}_{27}$ 甾烷丰度明显大于 $\text{C}_{29}$ 甾烷,并检测出甲藻甾烷为特征,反映了有机母质富含藻类,原始沉积环境为强还原、高矿化度的水体,而且,原油为典型的低熟油, $\text{C}_{29}$ 甾烷成熟度参数值很低,其 $w(\text{S})/w(\text{R+S})$ 值范围仅为 $0.12\sim 0.20$ 。

第二类原油见于渤南油田主体部分的沙三段储层,特别是沙三中、沙三上的夹在半深湖相的油页岩和暗色泥岩中的浊积砂体和水下扇体中。原油为正常原油,其密度在 $0.84\sim 0.88\text{ g/cm}^3$ 范围。该类原油具有与洼陷中沙三段生油岩相同的特征,以高 $w(\text{Pr})/w(\text{Ph})$ 比值( $0.8\sim 1.8$ )、低伽玛蜡烷指数( $<0.3$ ),并含有丰富的4-甲基甾烷为其特色,反映了有机质来源于断陷中期淡水湖盆的沉积环境。此外, $\text{C}_{29}$ 甾烷的异构化系数 $20\text{S}/(20\text{S}+20\text{R})$ 值高达 $0.32\sim 0.50$ ,证明原油为成熟油。

第三类原油主要见于渤南油田深部夹于膏盐层、泥膏层中的沙四段砂岩储层中,如渤深4井、义160井。原油为轻质油,其密度 $0.80\sim 0.84\text{ g/cm}^3$ 范围。该类原油具有与洼陷中沙四段生油岩相同的特征,以低 $w(\text{Pr})/w(\text{Ph})$ 比值( $0.26\sim 0.8$ )、高伽玛蜡烷指数、高 $\text{C}_{29}$ 甾烷的异构化系数 $20\text{S}/(20\text{S}+20\text{R})$ 和 $w(\text{C}_{35}\text{霍烷})>w(\text{C}_{34}\text{霍烷})$ 为特征,反映了有机质来源于断陷初期闭塞湖盆中高矿化度水体的沉积环境。

### 1.2 三次油气运移期

渤南油田的不同含油层系含有不同成因和来源的原油。对渤南—孤北洼陷盆地模拟研究的结果表明,它的形成是3次油气运移成藏的结果。第一次是沙四段生成的原油在渐新世沙一段—东营组沉积期运移;第二次是沙三段生成的原油在中新世馆陶组沉积期运移;第三次是沙一段生成的原油在上新世明化镇组沉积末期—第四纪运移。渤南油田的各含油层系基本上与同期的烃源岩互层或指状交叉,给运移提供了有利的条件。特别是沙三段的浊积体,从南部的物源区一直延伸到洼陷中心,周围被具有异



图3 垦西油田和孤岛油田中的两类稠油

Fig. 3 Two kinds of heavy oils in the Kenxi and Gudao oil fields

1. 渤南油田; 2. 孤岛油田; 3. 垦西油田

常高压的烃源岩所包围,形成了大型的岩性油气藏。洼陷内部的断层垂向延伸有限而盖层封闭性优良,沙四段以膏岩为盖层,沙三段及沙一段都有厚层泥岩作为盖层,所以油气的聚集以侧向运移、自生自储为主。上部馆陶组的砂岩尽管物性好,分布广泛,却含油有限,这正是缺乏垂向沟通的结果。

## 2 垦西油田

垦西油田位于渤南洼陷南部边缘斜坡,东部为孤岛凸起。从构造上可视为孤岛凸起西斜坡。该油田由断层上升盘的断块油藏及下降盘的逆索引背斜油藏组成,其中含油层系多。除正常原油以外,稠油资源量十分丰富,且分布范围广<sup>[7]</sup>。

### 2.1 两类稠油

根据稠油的物化性质可将其分为两类(图3):第I类以高密度( $0.9855\sim 1.0920\text{ g/cm}^3$ )、高粘度( $6338\sim 41958\text{ mPa}\cdot\text{s}$ )( $80\text{ }^\circ\text{C}$ )、高含硫( $3.12\%\sim 8.61\%$ )、高凝固点( $20\sim 43\text{ }^\circ\text{C}$ )为特征,是典型的稠油及特稠油,主要产于深部始新统沙四段储层。如垦76x3井及垦73-1井沙四段的原油密度大于 $1.0\text{ g/cm}^3$ ,含蜡量仅为 $2.25\%$ ,凝固点却达 $34\text{ }^\circ\text{C}$ ,其化学组成以高胶质( $42\%\sim 49\%$ )、高沥青质( $20\%\sim 31\%$ )、低含蜡( $2.2\%\sim 6.5\%$ )为特征。第II类稠油以高密度( $0.9428\sim 0.9931\text{ g/cm}^3$ )、高粘度( $151\sim$

尽管,二者物理化学性质有很大的差别,仍可以判断为来自同一烃源岩.第 II 类稠油以高  $\omega(\text{Pr})/\omega(\text{Ph})$  比、低伽玛蜡烷指数和高甾烷的异构化系数为特色,与渤南洼陷沙三段原油的生物标志物相似.而垦 24-1 井沙一段储层中正常原油的生物标志化合物特征证明,这些稀油与馆陶组稠油同样来自于沙三段的油源.综合的油岩对比表明,垦西油田的原油分别来自于渤南洼陷的沙三段、沙四段生油岩.在垦西油田中未检测出渤南洼陷中见到的来源于沙一段的低熟油.

## 2.2 两次运移期

综合原油的成因和产状,可以判断垦西油田的成藏机制.垦西油田油气的性质及分布特点是下稠上稀.从中新世馆陶组的稠油到渐新世东二段、沙一段的稀油,再到始新世沙三段底和沙四段的稠油及特稠油,原油密度及粘度表现出中—低—高、凝固点增高、含硫量突变的变化特征(图 5).与其他地区稠油仅分布在浅层不同,垦西油田稠油分布最大埋深达到 2 400 m,而以深层沙四段含稠油面积最大,向上逐渐减小.

垦西地区作为长期隆起的地区是渤南洼陷油气运移的指向.洼陷中的沙四段源岩在渐新世末期开始大量生成并排出原油.它们从洼陷深部主要沿着不整合面,穿过断层运移到断层上升盘的沙四段—沙三段底部的储层中聚集.沙三段下部的泥岩、油页岩便是良好的盖层.部分原油穿过断层,进入下降盘

图 4 垦西油田两种成因原油的生物标志物特征

Fig. 4 Biomarker feature of two genetic kinds of oils in the Kenxi oilfield

6 600 mPa·s)、含硫较高(1~3%)、低凝固点( $< 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ )为特征,主要产于浅部的中新统馆陶组储层.根据原油组分分析,该类稠油组成特点是高胶质(27%~54.2%)和低沥青质含量(6.6%),较高的含蜡量(4.9%~7.2%).

垦西油田原油样品中的生物标志物特征是提供了判断成因的有力证据(图 4).第 I 类稠油以低  $\omega(\text{Pr})/\omega(\text{Ph})$  比,高伽玛蜡烷指数和高  $\text{C}_{35}$  霍烷含量为特征,其  $\text{C}_{29}$  甾烷的异构化系数值较高,与前面提到的渤南洼陷沙四段轻质油的生物标志物相似.

图 5 垦西油田原油性质随深度变化

Fig. 5 Change of oil properties with the depth in the Kenxi oilfield

的东三段储层. 由于本区在东二段末期便开始了长期的抬升, 断层活动强烈, 古流体活跃, 使已形成的沙四段古油藏轻质组分散失, 原油普遍遭受了强烈的次生改造, 形成了第一类稠油及特稠油<sup>[8]</sup>.

沙三段源岩在馆陶组沉积期大量生成并排出原油, 沿着大型的砂体, 穿过断层运移到垦西地区从沙三段直至馆陶组的圈闭中聚集. 轻质油以及气体聚集在断块的高部位. 在断层封闭性差、储层浅的部位原油遭受生物降解和氧化, 尤其是馆陶组河流相沉积物中低矿化度水(1 000~5 000 mg/L)中细菌的活动使原油遭受了普遍的次生改造, 形成了第二类稠油, 而在其下沙一段、沙三段中的原油仍保持了原来的正常原油面貌.

总之, 垦西油田的形成有两个主要的运移成藏期. 油气交替通过输导层作侧向运移和通过断层作纵向运移. 沙四段生成的原油主要在沙四段储层成藏; 沙三段生成的原油在沙三段直至馆陶组成藏.

### 3 孤岛油田

#### 3.1 I类稠油

孤岛油田位于沾化凹陷东部孤岛上第三系潜山披覆构造带上. 丰富的油气聚集在上第三系馆陶组河流相储集层中, 形成了特大型的油气田. 馆陶组储层(图3)以含高密度(0.871~0.925 g/cm<sup>3</sup>)、高粘度(250~5 700 mPa·s)、高含硫(1.17%~3.38%)、低凝固点(-10~3.2℃)、含蜡量少(4.9%~7.2%)的稠油为主. 原油的性质在油藏中的变化规律是上稀下稠、顶稀边稠, 在构造顶部形成相对稀油区, 局部有小气顶. 随深度增加原油的密度和粘度有所增大. 在明化镇组下部及馆陶组上部还有纯气层.

对原油的有机地球化学分析证明, 绝大部分原油的生物标志物特征与北部渤南-孤北洼陷以及南部孤南洼陷中沙三段储层原油相似, 这表明它们来自南、北两个洼陷中的沙三段成熟的烃源岩. 南、北两侧的大断层起到了沟通两侧洼陷中生储油层与馆陶组储集层的作用. 稠油的形成主要是受到馆陶组储层中淡水, 特别是底水和边水的氧化及生物降解造成. 馆陶组储层的地温为60~65℃, 正是微生物活跃的环境. 孤岛披覆构造上断层不发育, 渗滤地表水的影响不大.

#### 3.2 第三次运移

根据油气的性质和产状可以判断孤岛油田油气

的运移和聚集应发生在作为盖层的馆陶组上部—明化镇组沉积并形成封闭能力以后. 根据胜利油田地质科学研究所的研究成果可知, 馆一段—明下一段的孔隙度在20%~25%以上, 渗透率约为 $10^{-4} \times 10^{-3} \sim 10^{-6} \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ , 孔隙半径平均值为30 nm, 突破压力小于10 kPa, 属于低压突破型盖层. 天然气的聚集取决于气藏剩余压力( $\Delta p$ )与盖层突破压力( $p_a$ )的差值. 当 $p_a > \Delta p$ 时, 就会发生聚集. 济阳拗陷浅层气藏剩余压力多小于5 kPa, 只有当盖层突破压力大于5 kPa, 才能成为有效的遮挡. 统计资料表明此时泥岩的埋深应在750~900 m, 也就是在明化镇组下段沉积末期. 但是, 对渤南-孤北洼陷进行的盆地模拟, 特别是对沙三段烃源岩热演化及生烃史的研究表明, 沙三段烃源岩主要的排烃期是馆陶组沉积中期. 这样的时间差距可以解释为原油从烃源岩中排出以后, 首先聚集在老第三纪的储层中, 当边界断层在明化镇组沉积期又一次活动时, 这些原油沿着断层发生了第三次运移, 直接进入了馆陶组储层. 原油中析出的天然气甚至进入了明化镇组下部的岩性圈闭中. 这点从断层下降盘丰富的油气显示中也可以得到证明. 如孤北断层下降盘低台阶的渤92井沙二、沙三段油斑砂岩井段厚100 m以上, 试油全为水层. 此外, 在孤北100井、101井中都见到了含油砂岩、油迹等, 说明油气运移曾经过这里, 很可能是原已形成的油藏因断层重新活动遭到了破坏, 大量的油气都向上运移到孤岛披覆背斜中聚集. 目前, 油气勘探结果表明油气运移到达的层位与断层活动到达的层位一致.

油气总是沿阻力最小的通道运移, 在所有的运移通道中, 开启的断层输送油气的效率最高. 油气沿断层的运移比在孔道中运移的阻力要小得多, 甚至可以呈涌流形式, 因此, 在较短的地质时间就能从下降盘运移到上升盘的储层中. 这些在新第三纪活动的正断层倾角陡(50°~70°), 断层面上正压力小, 更容易成为通道. 在孤岛油田的实例中, 断层一边连接的是深部具较高流体压力的沙三段储层; 另一边连接的是馆陶组储层. 由于埋藏浅, 成岩作用弱, 馆陶组河流相砂岩具有优良的储集性能. 在孤岛油田, 馆陶组储层的孔隙度高达30%~35%, 渗透率为 $300 \times 10^{-3} \sim 4 000 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ; 这是最优的运移动力及通道的组合. 它们与明化镇组盖层相结合, 就形成重要的油气聚集. 当然, 如果缺少好的盖层, 就会造成油气的散失. 由于沿断层运移的优选性, 断层的



图 6 渤南洼陷油气多次运移示意

Fig. 6 Illustration of multiple migration of petroleum in the Bonan sag

封闭性就会直接影响到沿断层下降盘分布的砂砾岩体断块—岩性圈闭的含油气性,所以,分析断层在新第三纪活动的状态对于选择这类砂砾岩圈闭为勘探目标是有意义的<sup>[9,10]</sup>.

纵观以上 3 个油田的成藏机制,可以认识到断陷盆地中油气多次运移和成藏的特点.在以断裂带为主的运移通道体系,油气首先通过输导层作侧向运移,而后通过断层作纵向运移是油气运移的主要模式.在盆地内部以侧向运移和充注为主形成单源油藏,在断裂带以垂向充注为主,常形成混源油藏.渤南洼陷中的断裂,除了边界断层以外,主要活动期是老第三纪,尤其是在东营组沉积末期,到新第三纪活动便减弱直至停息.因此,早期沙四段及沙三段生成的原油可以利用这些通道从洼陷中心或者向上运移,或者直接运移到边缘断裂带形成重要的聚集.沙四段生成的原油主要运移期是渐新世,早于南部孤岛披覆构造中圈闭的形成,只能聚集在边缘斜坡带,形成垦西油田.沙三段生成的原油主要运移期是中新世至上新世,它不但可以聚集在洼陷内部,而且可以进入洼陷外部的披覆构造带中,形成大型油气田,如渤南油田的主体及孤岛油田.而沙一段在上新世晚期生成的原油则由于断裂活动的停息而被阻挡,分布仅局限于洼陷中部,成为渤南油田的上部含油层系(图 6).

## 4 结论

(1)我国东部的断陷盆地由于中生代多幕式

的构造演化及由此形成的多个沉积旋回,导致了多套生储盖层系的发育,形成了复式含油气系统.断陷盆地中断裂活动的长期性和多期性,是造成油气多次运移和成藏的主要因素.

(2)控制构造带的边界断层即可以起到沟通源层和上覆层位圈闭之间的作用,也可以由于在新第三纪的活动起到连通原生油气藏与浅层圈闭的作用,引起油气的第三次运移.

(3)以沾化凹陷中几个油田的有机地化研究为例,展示了断陷盆地油气多次运移和成藏的特征.渤南油田 3 种来源原油的存在表明它的形成与三次油气运移和成藏过程有关;垦西油田中有两类成因的稠油,可以判断存在两次油气运移和成藏过程;孤岛潜山上第三系披覆构造油田的形成需要由断层作为通道的油气第三次运移.

(4)在以断裂带为主的运移通道体系,油气交替通过输导层作侧向运移和通过断层作纵向运移是油气运移的主要模式.在盆地内部以侧向运移和充注为主形成单源油藏;在断裂带以垂向充注为主,常形成混源油藏.

### 参考文献:

- [1] 王捷.关于复式油气田[J]. 复式油气田,1996,(1): 1~3.
- [2] 王秉海,钱凯.胜利油区地质研究与勘探实践[M]. 东营:石油大学出版社,1992. 357.
- [3] 陈建渝,李水福,毕研鹏,等.渤海湾盆地的复式油气系统——以济阳坳陷为例[A]. 见:费琦,戴世昭,朱水安编.成油体系与成藏动力学论文集[C]. 北京:地震出版

- 社, 1999. 95~100.
- [4] 张春荣. 孤南盆地中原油的生成及生油岩[J]. 陆相石油地质, 1990, 34: 14~18.
- [5] 周光甲. 陆相块断湖盆油气生成的地球化学模式[J]. 陆相石油地质, 1992, (1): 2~10.
- [6] 洪志华. 济阳拗陷下第三系生油岩地球化学特征[J]. 地球化学, 1983, (1): 41~51.
- [7] 陈建渝, 李水福, 毕研鹏, 等. 垦西地区稠油分布及成因浅析[J]. 复式油气田, 1998, (2): 28~33.
- [8] 胡见义, 徐树宝, 程克明. 中国重质油藏的地质和地球化学成因[J]. 中国地球化学, 1989, 15: 26~30.
- [9] 张树林, 叶加仁, 杨香华, 等. 裂陷盆地的断裂构造与成藏动力系统. 北京: 地震出版社, 1997.
- [10] 童亨茂. 断层开启与封闭的定量分析[J]. 石油与天然气地质, 1998, (3): 215~220.

## ORGANIC GEOCHEMISTRY RESEARCH INTO MULTI-PHASE PETROLEUM MIGRATION AND ACCUMULATION IN RIFT-SUBSIDENCE BASIN

Chen Jianyu Niu Ruiqing

(Faculty of Earth Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China)

**Abstract:** The petroleum migration is not only an important theoretical problem but also a puzzle in petroleum geology. In this paper, the organic geochemical analytical results of the crude oil and source rocks, especially the biomarker compositions, are used to classify the petroleum types for the correlation between the petroleum sources, with some examples of oil fields within the Zhanhua sag, northeast of Jiyang depression. In this case, the features can be summarized of the multi-phase petroleum migration and accumulation in the rift-subsidence basin. The present research results support the correlation between the formation of the Bonan oilfield in Zhanhua depression and the three-phase petroleum migration and accumulation. The Kenxi oilfield in the marginal fault zone is a product of the alternation of petroleum migration directions: the lateral migration through the carrier beds and the vertical migration through the faults. The formation of the Gudao-type Guqianshan oilfield is related to the third petroleum migration from the lower Tertiary pool. The lateral migration and filling within the rift-subsidence basin often result in the formation single-source petroleum accumulation, but the vertical filling at the fault zone often results in the formation of the mixed-source petroleum accumulation. Therefore, the multi-phase petroleum migration is related to the duration and episodes of the fracturing activity within the basin.

**Key words:** rift-subsidence basin; migration; petroleum accumulation; biomarker; the third migration; Jiyang depression.