

海拉尔盆地乌尔逊凹陷石油运移模式与成藏期

侯启军^{1,3}, 冯子辉^{2,3}, 霍秋立³

1. 中国科学院长沙大地构造研究所, 湖南长沙 410013

2. 吉林大学地球科学系, 吉林长春 130061

3. 大庆油田有限责任公司, 黑龙江大庆 163712

摘要: 海拉尔盆地由多个凹陷构成, 油气潜在资源丰富. 研究含油凹陷油气的来源、油气充注方向及成藏时间对指导盆地油气勘探具有理论和现实意义. 以乌尔逊凹陷为例, 采用生物标志化合物及含氮化合物定量分析技术, 研究了石油的来源及运移方向; 利用自生伊利石 K-Ar 同位素测年法、源岩生排烃史法及储层流体包裹体测温法, 探讨了石油成藏期. 结果表明, 原油主要来源于凹陷南部“烃源灶”内的南屯组生油岩, 油气成藏中发生了侧向运移. 通源大断裂是油气运移的主要通道, 断层两盘的构造圈闭是油气聚集成藏的有利部位. 苏仁诺尔构造带石油沿断裂向东北方向运移, 最大距离可达 20 km. 乌尔逊凹陷有 3 次成藏期, 其中距今 100 Ma 左右的伊敏组沉积末期是该区的主要成藏期. 凹陷中随油藏与“烃源灶”距离的减小, 成藏期呈现逐渐变晚的趋势.

关键词: 海拉尔盆地; 乌尔逊凹陷; 石油运移; 成藏期.

中图分类号: P618.130

文章编号: 1000-2383(2004)04-0397-07

收稿日期: 2004-03-13

Oil Migration Model and Entrapment Epoch of North Wuerxun Depression in Hailaer Basin

HOU Qi-jun^{1,3}, FENG Zi-hui^{2,3}, HUO Qiu-li³

1. Changsha Institute of Geotectonics, Chinese Academy of Sciences, Changsha 410013, China

2. Department of Earth Science, Jilin University, Changchun 130061, China

3. Daqing Oilfield Company Ltd., Daqing 163712, China

Abstract: Based on the organic geochemical analysis of oils and source rock in Wuerxun depression, Hailaer basin, hydrocarbons are thought to be derived from the Nantun Formation in south Wuerxun depression and to enter the oil pools through lateral migration. Apparent migration pathways along the Surennuoer fault belt can be traced by means of absolute abundance of pyrrolic nitrogen compounds and biomarkers from the oil samples. The results indicate that the large fault is the dominant pathway in which the oil can migrate for a long distance, and fill easily into the traps near the fault. According to the migration effects of pyrrolic nitrogen compounds in the oils, the maximum migration distance is estimated to be about 20 km. The analysis of K-Ar illite age, fluid inclusion and history of source rock expulsion indicates that there are three oil filling and entrapment events, the major oil entrapment epoch occurs in the Late Yimin period about 100 Ma before the present. It can be also observed that the farther the pools away from the source kitchen are, the earlier the ages of oil filling are.

Key words: Hailaer basin; Wuerxun depression; oil migration; entrapment epoch.

油气运移和成藏期是油藏地球化学研究的重点之一,也是油气勘探开发中必须探讨的实际问题,它涉及多学科、多技术,至今仍是石油地质学研究领域的薄弱环节(张厚福和金之钧,2000). 20 世纪 90 年代我国地球化学工作者曾利用生物标志化合物等分析技术在塔里木、吐哈、松辽、济阳、辽河等盆地开展

了油气运移研究的尝试,近几年含氮化合物分离检测技术的出现,为油气运移的方向、途径、距离及油藏充注方向的研究提供了新手段,在塔里木、威里斯顿及阿尔伯达等地区应用收到了良好效果(刘洛夫和徐新德,1996;刘洛夫,1997;李素梅和王铁冠,1999;庞雄奇等,2002),同时应用伊利石测年方法确定油气充注的年龄等研究也取得了可喜的进展(白国平,2000). 本文利用油气地球化学分析新技术并结合海拉尔盆地石油地质条件,对乌尔逊凹陷石油的运移及成藏期进行了研究.

海拉尔盆地是在我国东北地区古生代褶皱基底上发育起来的大陆火山裂谷带中的较大的断陷盆地,我国境内面积 44 210 km²,沉积岩最大埋深可达 6 000 m. 盆地演化主要经历了断陷期和拗陷期 2 个阶段,发育地层主要有铜钵庙组、南屯组、大磨拐河组、伊敏组、青元岗组及第三、第四系. 盆地平面上表现出较强的分割性,可划分为基本独立的 16 个凹陷,各凹陷具多物源、近物源、相带窄、相变大的特点. 凹陷内断裂发育,构造类型以断块构造为主. 乌尔逊凹陷是海拉尔盆地目前发现的相对富油的凹陷之一,原油主要产于南屯组并提交了一定数量的探明储量,因此对该凹陷石油运移和成藏期的研究,对

指导其他凹陷的油气勘探具有实际意义.

1 乌尔逊凹陷“烃源灶”及油源关系

1.1 “烃源灶”的确定

乌尔逊凹陷北部的南屯组、大磨拐河组和伊敏组暗色泥岩发育. 源岩有机质地球化学分析表明,伊敏组泥岩有机质丰度较低,主要为非常差生油岩,生油意义不大. 大磨拐河组上段有机碳平均为 1.65%,生烃潜量平均 1.16 mg/g,氯仿沥青“A”平均 0.0318%,为差烃源岩. 大磨拐河组下段发育 20~200 m 泥岩,平面上主要分布于乌北地区南部深洼槽,有机碳平均为 2.29%,生烃潜量平均 2.79 mg/g,氯仿沥青“A”平均 0.0417%,为中等—差烃源岩,有机质类型为 III₁ 型,大部分处于未熟—低熟热演化阶段. 南屯组暗色泥岩一般在 100~500 m,由北向南变厚,有机碳一般 2.49%~2.56%,生烃潜量一般 8.27~8.65 mg/g,氯仿沥青“A”一般 0.0916%~0.1197%,为中等—好烃源岩,有机质类型主要为 II 型,处于成熟演化阶段,为本区主要烃源层. 铜钵庙组暗色泥岩厚度一般在

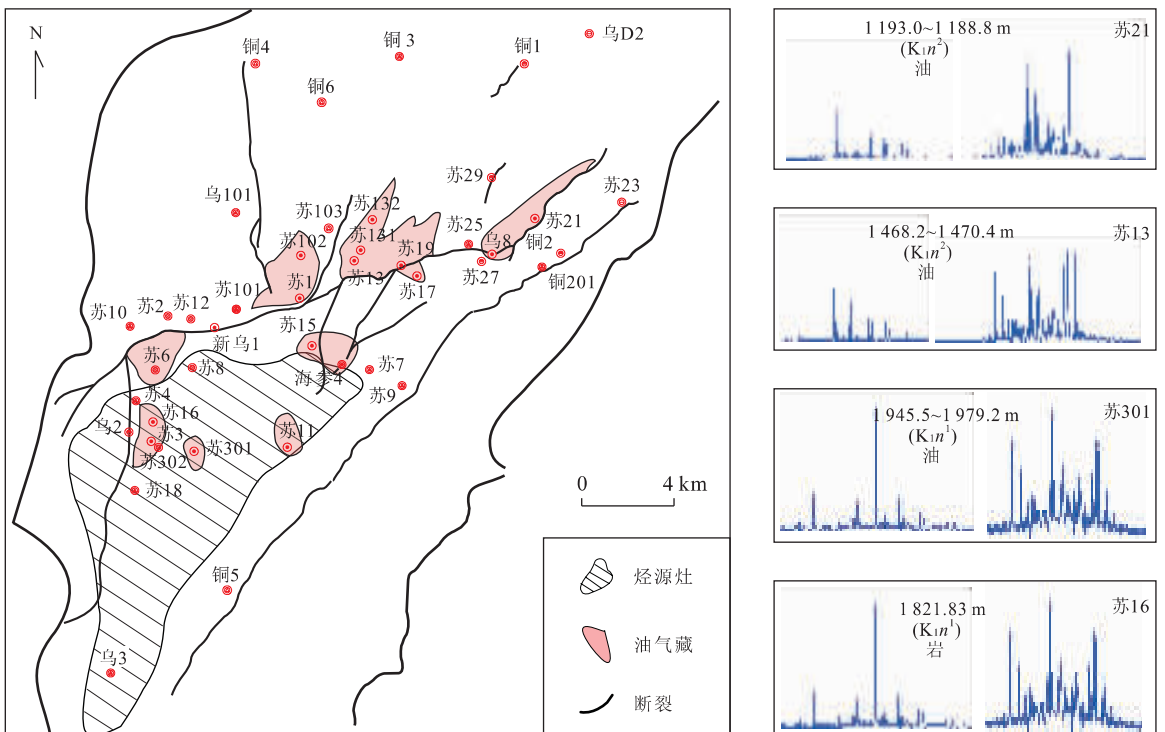


图 1 海拉尔盆地乌北地区烃源灶及油藏分布

Fig. 1 Distribution of source kitchen and oil pools in north Wuerxun depression, Hailaier basin

表 1 海拉尔盆地乌尔逊北部原油生物标志化合物参数

Table 1 Biomarker parameters of oils in north Wuerxun depression

井号	深度/m	层位	$C_{29} \alpha\alpha\alpha 20S / (20S + 20R)$	$C_{29} \beta\beta / (\alpha\alpha + \beta\beta)$	$Ts / (Ts + Tm)$
苏 301	1 945.5~1 979.2	$K_1 n_1$	0.565	0.627	0.682
苏 11	1 792~1 806	$K_1 n_2$	0.530	0.463	0.489
苏 102	1 446.6~1 463.0	$K_1 n_2$	0.472	0.513	0.560
苏 1	1 474.8~1 502.2	$K_1 n_2$	0.435	0.477	0.535
苏 13	1 468.2~1 470.4	$K_1 n_2$	0.473	0.459	0.491
苏 2	1 339.2~1 358.2	$K_1 n_2$	0.434	0.470	0.527
新乌 1	1 627~1 650	$K_1 n_2$	0.370	0.431	0.522
乌 8	1 219.6~1 238.6	$K_1 n_2$	0.463	0.447	0.505
铜 2	940~1 004.5	$K_1 d_1$	0.508	0.407	0.569
苏 21	1 193~1 188.2	$K_1 n_2$	0.418	0.345	0.395

50~160 m, 泥岩有机质丰度较高, 有机碳平均为 1.84%, 生烃潜量平均为 3.77 mg/g, 氯仿沥青“*A*”平均为 0.071 2%, 但有机质类型较差, 主要为 III₂ 型, 处于成熟演化阶段。

上述分析表明, 乌尔逊凹陷北部主要生油岩为南屯组, 生烃演化模式分析表明其开始大量生油 *R*₀ 0.65% 对应的埋藏深度约 1 500 m, 此深度所确定的“*烃源灶*”范围主要位于乌北地区南部深洼槽中(图 1), “*烃源灶*”内部南屯组*烃源层*厚度大, 有机质丰度高、类型好, 目前处于成熟生油高峰阶段。

1.2 油源追踪

乌尔逊凹陷北部目前所发现的油藏主要分布于“*烃源灶*”以外地区(图 1), 表明原油成藏时发生了侧向运移。各油藏中原油一般产于南屯组, 原油在化学组成和生物标志物分布上均非常相似, 属同一族群的特征。油岩生物标志化合物对比结果(表 1)表明, 原油主要来自“*烃源灶*”内成熟度相对较高的南屯组*烃源岩*, *烃源岩*的 *R*₀ 一般超过 0.7%, 埋深大于 2 000 m。目前“*烃源灶*”中心部位的南二段底及南一段*烃源岩*埋深已超过该深度, 反映原油在该地区生成后向“*烃源灶*”周边及外部运移。

2 乌尔逊凹陷石油运移特征

利用原油中含氮化合物分析技术研究油气二次运移特征, 目前国内外许多学者已做了大量的研究工作(刘洛夫和徐新德, 1996; 刘洛夫, 1997; 刘洛夫和康永尚, 1998; 李素梅和王铁冠, 1999; 李素梅等, 2002)。Yamamoto(1992)分析了烷基苯并喹啉在油气运移中的含量, 发现随着运移距离的增大, 原油烷基苯并喹啉系列的分子组成发生规律性变化。Li *et*

al. (1995) 研究了一系列原油和源岩样品, 发现油气初次运移和二次运移使咪唑类化合物产生规律性分布。本次研究采用原油生物标志化合物和含氮化合物定性及绝对定量的方法, 研究了乌尔逊凹陷石油的运移特征。

已有的研究表明, 来自于同一“*烃源灶*”的原油随运移距离的增大成熟度表现出逐步降低的趋势。乌北地区苏仁诺尔构造带上随原油距“*烃源灶*”距离的增大, 原油的成熟度表现为上述特征(图 2)。如从苏 301 到苏 21 井, 原油成熟度的指标 $Ts / (Ts + Tm)$ 从 0.682 下降至 0.395, $C_{29} \beta\beta / (\alpha\alpha + \beta\beta)$ 从 0.627 下降到 0.345, $C_{29} \alpha\alpha\alpha 20S / (20S + 20R)$ 从 0.565 下降到 0.418, 反映原油沿苏仁诺尔构造带向北东方向运移的趋势。值得说明的是, 石油在砂岩储层中运移一般会产生色层效应, 造成原油的 $\beta\beta$ 构型甾烷逐渐富集(如松辽盆地古龙凹陷), 但乌北地区

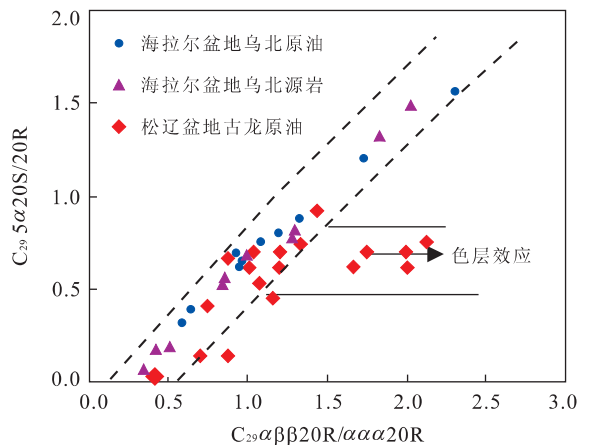


图 2 海拉尔盆地乌北地区原油运移效应

Fig. 2 Migration effects of the oil in north Wuerxun depression

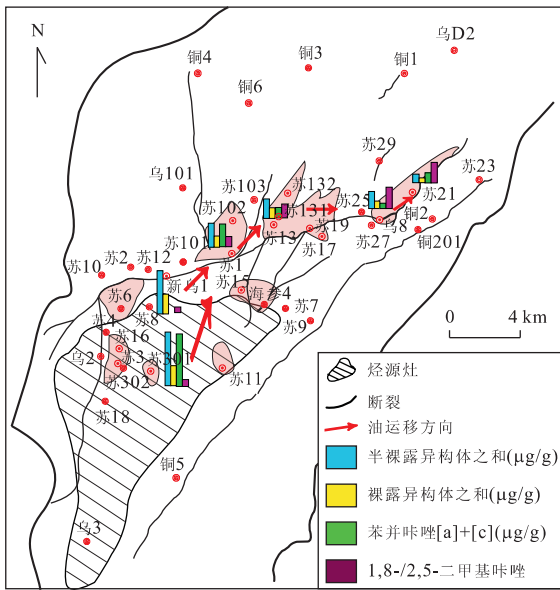


图 3 海拉尔盆地乌北地区原油含氮化合物指标变化
Fig. 3 Lateral migration effects of the oils in north Wuerxun depression

原油甾烷构型分布的研究结果(图 3)表明,原油与源岩均有规律地分布在成熟趋势线附近,沿原油的运移方向没有表现出 $\beta\beta$ 构型甾烷富集的趋势,反映原油在运移中没有发生明显的色层效应。因此,推断原油的运移通道可能不是以砂体为主,断层在运移中起关键作用。

原油中含氮咪唑类化合物具有较强的极性,原因是氮原子上键合的氢原子与地层中的有机质或粘土矿物上的负电性原子(如氧原子)构成氢键,使部分咪唑类分子滞留于输导层或储层中,从而在油气

运移途中出现咪唑类化合物绝对量减少的趋势。乌北地区原油咪唑类化合物绝对定量分析表明(图 4),沿苏仁诺尔构造带苏 301 井到苏 102 井到苏 21 井方向,半裸露型咪唑、裸露型咪唑、苯并咪唑[a]+[c]的绝对量均呈现减少的趋势。其中半裸露型咪唑从 224.54 $\mu\text{g/g}$ 降到 11.31 $\mu\text{g/g}$,裸露型咪唑从 84.48 $\mu\text{g/g}$ 降低到 6.54 $\mu\text{g/g}$,苯并咪唑[a]+[c]从 10.85 $\mu\text{g/g}$ 降低到 1.12 $\mu\text{g/g}$,反映沿上述方向油气运移的趋势。另外屏蔽型咪唑(C-1, C-8 位氢原子分别被烷基取代,形成 N-H 全屏蔽型结构),由于极性低与围岩介质作用小,运移过程中不易被吸附,随着运移距离的增大相对富集,而裸露型咪唑(如 2,5-二甲基咪唑等)极性较强,运移中容易被周围介质所吸附而损失,因此两者的比值也可以反映油气运移的趋势。乌北地区原油 1,8-/2,5-二甲基咪唑参数分布表明(图 4),从苏 301 井到苏 102 井到苏 21 井方向,1,8-/2,5-二甲基咪唑比值从 1.41 增大到 2.26,同样说明原油沿苏仁诺尔构造带运移的特征。从“烃源灶”到目前发现原油的构造位置,估算石油运移的最大距离大于 20 km。

乌北地区原油的运移研究表明,在海拉尔盆地各生油凹陷油气的主要运移通道是通源大断裂,油气在断层两盘的断块中圈闭成藏。因此沟通“烃源灶”的大断裂带是下步油气勘探的有利部位。

3 乌尔逊凹陷石油成藏期

油气成藏期研究是圈闭评价的重要依据。目前

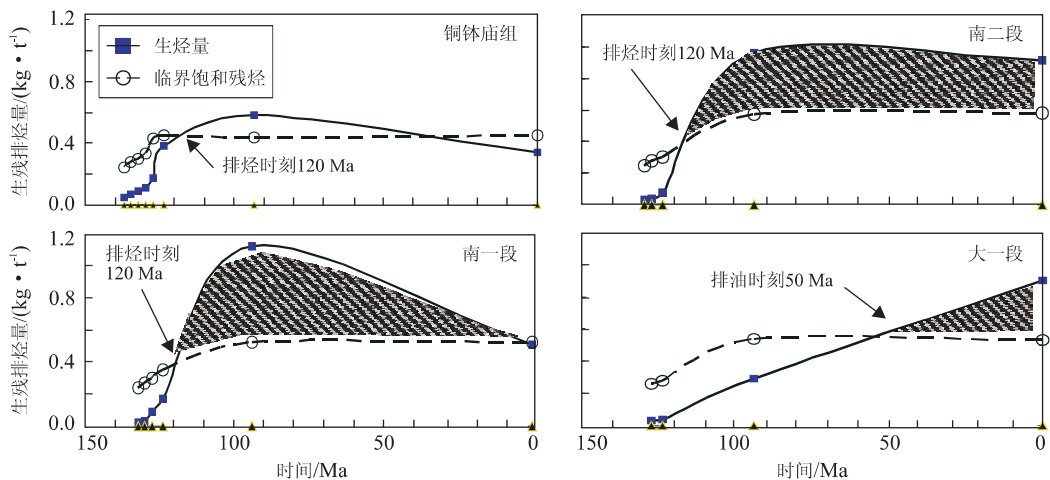


图 4 海拉尔盆地乌北地区乌 3 井源岩生排烃史

Fig. 4 Hydrocarbon generation and expulsion history of source rock in well Wu 3

确定油气藏形成时间的方法较多,但不同方法依据的原理不同,所确定的成藏年代意义各异. 本次研究主要采用生排烃史法、K-Ar 同位素法和原油轻烃法.

3.1 生排烃史法确定油藏成藏期

油气成藏是烃源岩排烃、运移和聚集的结果,因此可以由烃源岩的排烃史推断油气的成藏史. 烃源岩的初始排烃期可以认为是油气成藏期的上限,烃源岩的大量排烃期为油气成藏的主要时期.

已有的研究表明,烃源岩生成的油气由于受到岩石本身的吸附等作用,首先存留于烃源岩中,其数量达到烃源岩存留油气的临界饱和度后才开始排运. 因此研究烃源岩排烃需要解决 2 个问题,一是烃源岩的油气生成量;二是烃源岩的临界残留油气量. 以烃源岩的油气生成量为例,本研究中采用了有机质成烃的化学动力学方法. 选择的动力学模型是:有限个平行一级反应,每个反应有不同的指前因子. 干酪根原始生油、生气潜量可分别由下式计算.

若设干酪根成油反应由 N 个平行反应组成,则总生油量是:

$$X_o = \sum_{i=1}^{N_o} X_{O_i} = \sum_{i=1}^{N_o} \{X_{O_{i0}} [1 - \exp(-\int_{T_0}^T \frac{A_{O_i}}{D} \exp(-\frac{E_{O_i}}{RT}) dT)]\}$$

式中, X_{O_i} 为生油潜量; $X_{O_{i0}}$ 为初始潜量; E_{O_i} 为每个反应的活化能; A_{O_i} 为指前因子.

若设干酪根成气反应由 N 个平行反应组成,则总生气量是:

$$X_g = \sum_{i=1}^{N_g} X_{G_i} = \sum_{i=1}^{N_g} \{X_{G_{i0}} [1 - \exp(-\int_{T_0}^T \frac{A_{G_i}}{D} \exp(-\frac{E_{G_i}}{RT}) dT)]\}$$

式中, X_{G_i} 为生气潜量; $X_{G_{i0}}$ 为初始潜量; E_{G_i} 为每个反应的活化能; A_{G_i} 为指前因子.

由于干酪根的模拟实验,确定干酪根成烃动力学参数即 E_{O_i} 、 A_{O_i} 、 $X_{O_{i0}}$ 、 E_{G_i} 、 A_{G_i} 、 $X_{G_{i0}}$,干酪根的热演化史结合盆地沉积埋藏史和热史的研究,则由上两式即可动态计算出烃源岩在各个历史时期的生油、生气量. 由生烃量的计算结果减去残留量即为烃源岩的排烃量.

在乌尔逊凹陷“烃源灶”内,乌 3 井为地层发育齐全且埋深较大的探井,目前烃源岩的生油门限深度为 1 500 m 左右,生油的高峰深度为 2 000 m. 大

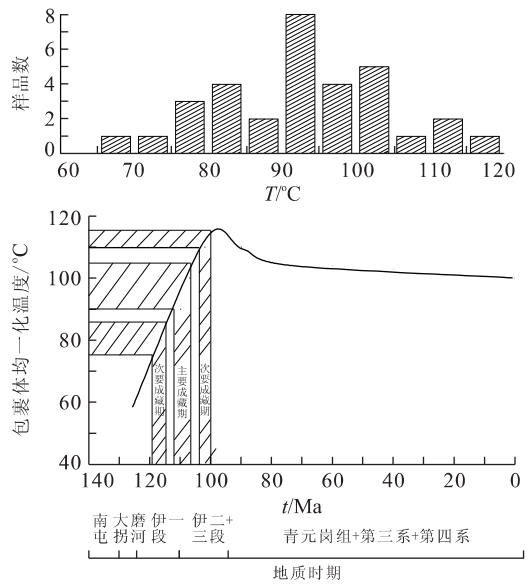


图 5 乌北地区储层包裹体均一化温度分布与沉积史、热史

Fig. 5 Histogram of homogenisation temperatures for fluid inclusion and burial history and thermal history of north Wuerxun depression

二段及以上地层尚未进入生油气门限,大一段进入生油门限,南屯组处于生油高峰阶段,铜钵庙组进入裂解生气阶段. 乌 3 井的主要烃源岩层的生排烃史研究表明(图 5),铜钵庙组的主要排油期在伊敏组早期,排油量较小,最大排油量仅为 0.15 kg/t 岩石,现今已不再排油,南一段的排油时间几乎与铜钵庙一样,但排油量较大,最大排油量为 0.6 kg/t 岩石,现今已进入排油暮年,其底部已不再排油. 南二段的排油时间比南一段稍晚,排油高峰时间在青元岗组沉积时期,现今仍处于排油时期,最大排油量为 0.37 kg/t 岩石. 大一段在贝尔湖群沉积中期开始排油,现今处于排油高峰,最大排油量为 0.37 kg/t 岩石. 综上所述,铜钵庙组、南一段、南二段的排油时间大致相同,均在伊敏组早期距今约 120 Ma 开始排油. 据此推断,乌尔逊北部的最早成藏时期应在 120 Ma 伊敏组早期.“烃源灶”的最大排油期距今约 100~90 Ma 左右,表明伊敏组末期是乌尔逊北部的成藏期.

3.2 K-Ar 同位素测年确定油藏成藏期

储层中自生伊利石一般认为是在流动的富钾水介质环境下形成的,油气进入储集层后伊利石形成作用便会停止. 因此,利用储层中自生伊利石的 K-Ar 同位素年龄可以推断油气进入储层的时间,即油

表 2 自生伊利石 K-Ar 法同位素测年数据

Table 2 Data of authigenic illite K-Ar isotope

井号	层位	样品深度/m	年龄/Ma
苏 301	K ₁ n ¹	1 957.0	99.42±1.44, 88.52±1.29
苏 131	K ₁ n ²	1 470.5	101.72±1.48
苏 131	K ₁ n ²	1 458.0	100.56±1.49, 103.89±1.51
苏 21	K ₁ n ²	1 191.0	119.12±2.14, 118.55±1.89

气藏的最早成藏期(白国平, 2000)。

乌尔逊凹陷南屯组 4 块含油砂岩样品自生伊利石 K-Ar 同位素测年结果表明(表 2), 凹陷内油气的成藏期主要有 3 期, 第一个成藏期是距今 118~119 Ma 的伊敏组早期; 第二个成藏期是距今 103~99 Ma 的伊敏组末期; 第三个成藏期是距今 85 Ma 的青元岗组早期。第二个成藏期是油气的主要成藏期, K-Ar 同位素测年揭示的结果与烃源岩排烃反应的成藏特征吻合。值得说明的是, 凹陷内油藏的成藏期随油藏与“生烃灶”距离的增大, 表现出逐渐变早的趋势。苏 21 井距“烃源灶”最远, K-Ar 同位素测年为 118~119 Ma, 属第一次油气成藏期的产物, 原油的成熟度也相对最低, 反映“烃源灶”早期排出的原油以沿大断裂长距离运移为主, 较少在“烃源灶”附近聚集成藏。苏 131 井距“生烃灶”相对较近, K-Ar 同位素测年为 100~103 Ma, 处于第二个油气成藏期, 但可能由于长距离运移的通道条件发生变化, 或通道上圈闭大量形成, 油气在“生烃灶”周边的断块圈闭聚集成藏。苏 301 井基本在“烃源灶”内, K-Ar 同位素测年为 99~88 Ma, 第二和第三次成藏期都有体现, 原油成熟度相对最高, 成藏期相对最晚, 同时也间接表明第三次成藏期影响的范围有限。

3.3 储层流体包裹体测温法确定油藏成藏期

砂岩储层在压实、胶结、溶蚀、重结晶和交代等成岩作用中, 矿物加大边或裂隙充填物内形成的次生包裹体的均一化温度记录了储层当时的地层温度, 因此含油气包裹体的均一化温度所反映的油气进入储层的温度为确定油气成藏期提供了依据(庞雄奇, 1995; 高岗和黄志龙, 2003)。乌尔逊凹陷 5 口井 10 块南屯组储层样品包裹体分析(中国石油勘探开发研究院实验中心检测), 主要在矿物周边的胶结物或裂隙充填物中见串珠状分布的次生包裹体, 形态主要有三角形、长形或椭圆形, 直径一般 2~9 μm, 气液比 4%~8%。

包裹体的均一化温度测定结果(图 5), 乌尔逊凹陷油气成藏温度约在 65~120 °C 之间, 由于温度

呈连续的变化, 反映烃源岩的排烃过程或成藏过程也是连续的。在整个成藏历史中, 大致可以分为 3 个主要的成藏温度段, 最主要的成藏温度段是 90~105 °C, 其次是 75~85 °C、110~115 °C。以乌 3 井为例, 对南屯组储层沉积史、热史研究表明(图 5), 主要的成藏温度 90~105 °C 对应的地质时期为 105~98 Ma, 次要的成藏温度段 75~85 °C、110~115 °C 对应的成藏时期分别为 120~117 Ma、88~78 Ma。这 3 次成藏期与 K-Ar 同位素测年得到的成藏时间基本吻合, 其中主要成藏期基本都确定在距今 100 Ma 左右, 反映乌尔逊凹陷目前发现的大部分油气藏均为这一时期形成。

盆地分析表明, 乌尔逊凹陷油气成藏期及其分布变化与凹陷的构造发育史有密切的关系。南屯组沉积时期, 盆地受强烈拉张作用, 地壳发生沉降使湖泊变深变大, 湖相生油层和储集层形成。大磨拐河组沉积时期, 断陷处于稳定拉张阶段, 沉积末期南屯组烃源岩发生排烃拉开了第一次成藏期的序幕。这个时期由于断裂活动加强, 出现大的开启断裂, 为伊敏组早期(120 Ma)油气长距离运移成藏提供了通道条件。伊敏组末期(100 Ma)盆地发生了较大规模的构造运动, 大部分断裂再次活动, 使原有的构造复杂化并形成大量断块圈闭, 苏仁诺尔构造带就形成于该时期。烃源岩排出的油气虽然仍以沿大断裂运移为主, 但通道上圈闭发育, 成藏条件相对有利。因此, 第二次成藏期尽管烃源岩的排烃规模和油气成藏规模相对最大, 但油气的运移距离小于第一次成藏期。青元岗沉积期盆地转为萎缩阶段, 构造活动相对较弱, 因此青元岗早期(88 Ma)出现的第三次成藏期影响范围小, 主要局限于“烃源灶”内。

4 结论

(1) 海拉尔盆地乌尔逊凹陷北部“烃源灶”主要位于南部深洼槽中, 主要烃源层是处于成熟生油高峰阶段的南屯组烃源层。目前所发现的油藏主要分布于“烃源灶”以外地区, 油岩对比表明, 原油主要来自“烃源灶”内成熟度相对较高的南二段和南一段烃源岩, 表明原油成藏时发生了侧向运移。(2) 原油的生物标志物及含氮化合物分布表明, 海拉尔盆地乌北地区油气的主要运移通道是通源大断裂, 油气在断层两盘的断块中圈闭成藏, 沟通“烃源灶”的大断裂带是下步油气勘探的有利部位。(3) 海拉尔盆地乌

尔逊凹陷油气的成藏期主要有3期:第1个成藏期是距今120~117 Ma的伊敏组早期;第2个成藏期是距今105~98 Ma的伊敏组末期;第3个成藏期是距今88~78 Ma的青元岗组早期。第2个成藏期是油气的主要成藏期。凹陷内油藏的成藏期随油藏距“烃源灶”距离的增大,表现出逐渐变早的趋势,原因主要与盆地的构造演化有关。

References

- Bai, G. P., 2000. Application of K-Ar dating technique to determination of timing of oil/ gas entrapment. *Journal of the University of Petroleum*, 24(4): 100—103 (in Chinese with English abstract).
- Gao, G., Huang, Z. L., 2002. Research on organic inclusion in reservoir and gas accumulation process in Pinguoba gas field. *Acta Sedimentologica Sinica*, 20(1): 156—159 (in Chinese with English abstract).
- Li, M., Larter, S. R., Stoddart, D., et al., 1995. Fractionation of pyrrolic nitrogen compounds in petroleum during migration; Derivation of migration related geochemical parameters. In: Cubitt, J. M., England, W. A., eds., *The Geochemistry of Reservoirs. Geological Society Special Publication*, (86): 103—123.
- Li, S. M., Pang, X. Q., Jin, Z. J., 2002. Distribution and significance of steroids in Bamianhe oilfield, east China. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 27(6): 711—717.
- Li, S. M., Wang, T. G., 1999. Geochemical characteristics and significance of the pyrrolic compounds in petroleum. *Acta Sedimentologica Sinica*, 17(2): 312—317 (in Chinese with English abstract).
- Liu, L. F., 1997. Investigation on pyrolytic nitrogen compounds in the Qun-4 well oil of the Tarim basin. *Acta Sedimentologica Sinica*, 15(2): 184—187 (in Chinese with English abstract).
- Liu, L. F., Kang, Y. S., 1998. Investigation on secondary migration of oils in central Tarim, Tarim basin using pyrrolic nitrogen compounds. *Geochimica*, 27(5): 475—482 (in Chinese with English abstract).
- Liu, L. F., Xu, X. D., 1996. Study of nitrogen compounds and

petroleum migration. *Petroleum Explorationist*, 1(2): 33—37 (in Chinese with English abstract).

- Pang, X. Q., 1995. Theory of hydrocarbon expulsion threshold's controlling hydrocarbon and its application. Petroleum Industry Press, Beijing, 31—56 (in Chinese).
- Pang, X. Q., Li, S. M., Li, M. W., et al., 2002. Discussion on petroleum migration in Bamianhe oilfield of Dongying depression, eastern China. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 27(6): 666—670 (in Chinese with English abstract).
- Yamamoto, M., 1992. Fractionation of azaarenes during oil migration. *Org. Geochem.*, 19(4—6): 389—402.
- Zhang, H. F., Jin, Z. J., 2000. Present situation and the future of petroleum migration research in our country. *Journal of the University of Petroleum*, 24(4): 1—3 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 白国平, 2000. 伊利石 K-Ar 测年在确定油气成藏期中的应用. *石油大学学报*, 24(4): 100—103.
- 高岗, 黄志龙, 2003. 平落坝储层有机包裹体特征与气藏形成过程研究. *沉积学报*, 20(1): 156—159.
- 李素梅, 王铁冠, 1999. 原油中的吡咯类化合物的地球化学特征及其意义. *沉积学报*, 17(2): 312—317.
- 李素梅, 庞雄奇, 金之钧, 2002. 八面河地区原油、烃源岩中甾类化合物的分布特征及其应用. *地球科学——中国地质大学学报*, 27(6): 711—717.
- 刘洛夫, 1997. 塔里木盆地群4井原油吡咯类化合物地球化学研究. *沉积学报*, 15(2): 184—187.
- 刘洛夫, 康永尚, 1998. 运用原油中吡咯类含氮化合物研究塔里木盆地塔中地区石油的二次运移. *地球化学*, 27(5): 475—482.
- 刘洛夫, 徐新德, 1996. 含氮化合物与石油运移研究. *勘探家*, 1(2): 33—37.
- 庞雄奇, 1995. 排烃门限控油气理论与应用. 北京: 石油工业出版社, 31—56.
- 庞雄奇, 李素梅, 黎茂稳, 等, 2002. 八面河油田油气运聚、成藏模式探讨. *地球科学——中国地质大学学报*, 27(6): 666—670.
- 张厚福, 金之钧, 2000. 我国油气运移的研究现状与展望. *石油大学学报(自然科学版)*, 24(4): 1—3.