

利用非烃技术探讨尕斯库勒油田 E_3^1 油藏的充注模式

李素梅^{1,2}, 刘洛夫¹, 王铁冠¹, 郭绍辉¹, 黎茂稳²

(1. 石油大学油气成藏机理教育部重点开放实验室, 北京 102249;

2. 加拿大联邦地质调查局卡尔加利分部, 卡尔加利 T2L2A7, 加拿大)

摘要: 通过对尕斯库勒 E_3^1 油藏原油中性含氮非烃化合物的分析, 确认吡咯类化合物的油气运移效应显著. 研究表明, E_3^1 油藏的主要油气注入点在背斜油藏的东北端, 西侧翼为其次要的油气注入点. 推测尕斯库勒背斜油藏东北方向的茫崖凹陷为其主要的油源区, 尕斯断陷仅提供少部分油气. E_3^1 油藏的形成机制有其特定的地质条件, 侧上式和断接式为其主要的成藏模式.

关键词: 吡咯类化合物; 油气运移; 成藏模式; 尕斯库勒.

中图分类号: P618.130.1; [TE132.3] 文献标识码: A

文章编号: 1000-2383(2001)06-0621-06

作者简介: 李素梅(1973-), 女, 在加拿大地调局与石油大学进行博士后研究, 主要从事油气地球化学研究.

0 引言

非烃地球化学是地质、地球化学的一个新的研究领域, 构成油藏地球化学的重要组成部分. 非烃技术指利用非烃(含 N, O, S 化合物)的某些显著的特性来解决油气勘探、开发问题的一种新型技术, 如利用非烃中含氮化合物、酚类评价油气的运移与聚集过程. 本文利用吡咯类含氮化合物探讨尕斯库勒深层油藏的充注模式.

1 地质概况

尕斯库勒油田为柴达木盆地西部坳陷区尕斯断陷亚区中的三级构造(图 1), 位于阿拉尔—尕斯库勒—南乌斯弧之中弧形急转弯处. 油田为一个背斜构造(跃进一号构造), 是一从基岩隆起的古构造. 位于尕斯库勒油田东北方向的茫崖坳陷, 沉积了厚约 6 000~8 000 m 的具有一定有机质丰度的新、老第三纪地层, 为柴达木盆地的主力油源层, 该坳陷南区

$E_2^2-N_1$ 为最佳生油层位. 尕斯库勒 E_3^1 油藏圈闭是在基岩隆起基础上长期发育起来的同生沉积构造, 西翼有一控制该构造发育的同生逆断层(即Ⅲ号基岩断裂), 构造主体部位比较完整, 断层较少, 只有 2 条逆断层和 2 条正断层, 都分布在构造的边部(图 2). E_3^1 油藏埋深较大, 集中分布于 3 200~3 800 m 深度范围, 因而地层压力和温度均较高. 油气在背斜高部位相对富集, 在含油范围内无水层分布. 油藏主要受构造因素控制.

2 样品与实验

沿尕斯库勒背斜油藏的长、短轴方向采集了 8 个原油样(图 2、表 1). E_3^1 油藏原油成因类型极其一致, 基本地球化学参数见表 1. 原油烃类组成指示第三系原油(E_3^1)为典型的低熟盐湖相原油, 原油成熟度与沉积环境标志有: 低芳烃(12.5%~20.04%)、低 Pr/Ph 比值(0.42~0.51)、具偶碳数优势(CPI 值为 0.88~1.08); 具有较低的重排甾烷(重排甾烷/规则甾烷比值为 0.000~0.029); 高伽马蜡烷(伽马蜡烷/ C_{31} 藿烷比值为 2.78~3.04); 低 Ts/Tm 比值(0.29~0.81), 高 C_{35} 与 C_{33} 藿烷值

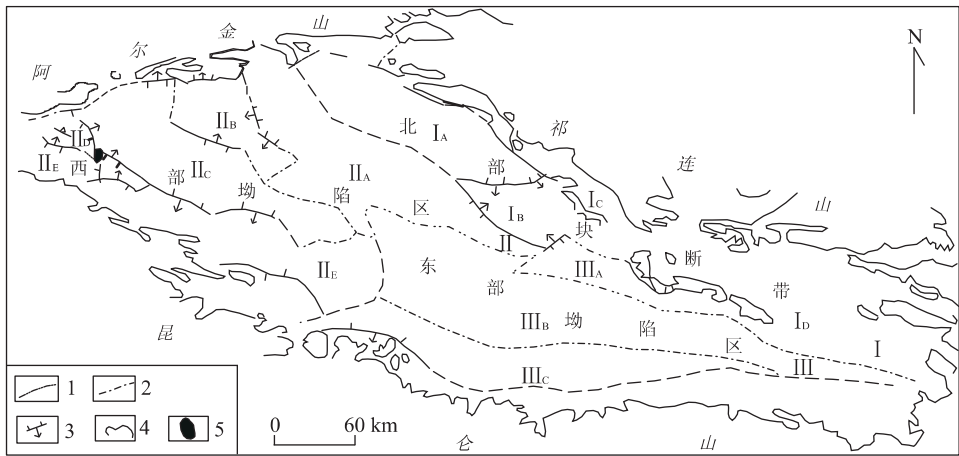


图1 尕斯库勒油田区域位置

Fig. 1 Location of Gasikule oilfield

1. 一级构造单元界线; 2. 亚一级构造单元界线; 3. 逆断层; 4. 老山边界; 5. 尕斯库勒油田位置。I_A. 赛北断陷亚区; I_B. 大红沟隆起亚区; I_C. 鱼卡红山断陷亚区; I_D. 德令哈断陷亚区; II_A. 一里坪坳陷亚区; II_B. 大红山隆起亚区; II_C. 茫崖坳陷亚区; II_D. 尕斯库勒断陷亚区; II_E. 昆北断陷带; III_A. 盐湖斜坡; III_B. 三湖坳陷亚区; III_C. 格尔木斜坡带

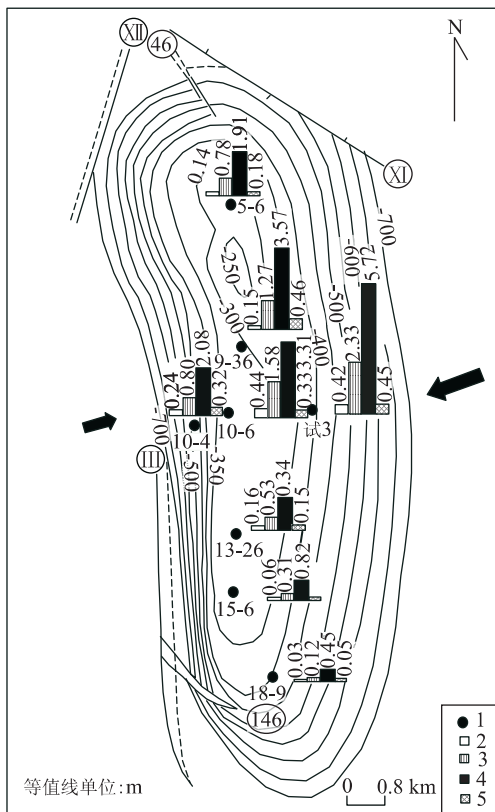


图2 吡咯类化合物丰度变化显示分馏效应

Fig. 2 Abundance of pyrrole compounds in oil decreases with increasing oil migration distance

1. 井位; 2. 吡唑; 3. 甲基吡唑; 4. 三甲基吡唑; 5. 苯并[a],[c]-吡唑

(0.96~2.45) (表1). 原油形成于强还原咸水相沉积环境; 具有水生低等生物、陆源高等植物双重母源

输入的特征.

原油中吡咯类化合物的分离流程如图3所示. GC/MS分析在 Finnigan SSQ710型 GC/MS仪器上进行, 配置 HP-5 弹性石英毛细管柱 (30 m × 0.25 mm × 0.25 μm). 升温程序: 始温 35 °C, 恒温 5 min, 以 2 °C/min 速率升至 120 °C, 再以 3 °C/min 速率升至 310 °C, 恒温 15 min. 采用氮气载气, 电子轰击源, MID 多离子方式检测.

3 E₃ 油藏油气运移探讨

3.1 油气运移分馏机理

在地质条件下, 某些有机氮化合物由于具有较强的极性, 因而有能力通过 N-H 原子与其他分子上的负电性原子 (如氧) 形成氢键^[1,2], 如吡唑分子可与粘土矿物二氧化硅表面的羟基形成氢键, 有机氮化合物可以很强地吸附在固体物表面 (如矿物、有机质表面)^[2~4] (图4). 在地球化学反应过程中, 有机氮化合物的化学活性 (反应性能) 受相对于氮原子周围的烷基取代位及取代程度的影响, 这主要归因于屏蔽效应^[2,5]. 如果 N-H 原子被取代烷基屏蔽, 含氮化合物的活性可能会降低. 例如, 1-甲基吡唑形成氢键的几率比 3-甲基吡唑要小. 与此类似, 二甲基吡唑的活性依次为 2,7- > 1,7- > 1,8- 二甲基吡唑. 因此, 在石油运移过程中氮化合物的绝对丰度将逐渐减少, 氮官能团屏蔽型异构体会比暴露型

表 1 尕斯库勒原油(E₃)甾、萜烷分子地球化学参数

Table 1 Parameters of steranes and terpenoids in oil of Gasikule oilfield

井号	层位	C ₂₉ 甾烷 _{αββ} / (αββ+ααα)	C ₂₉ 甾烷 20S/ (S+R)	C ₂₇ / C ₂₉ 甾烷	Ts/ Tm	C ₃₁ 22S/ (S+R)	伽马蜡烷/ C ₃₁ 藿烷	伽马蜡烷/ C ₃₀ 藿烷	C ₃₀ 莫烷/ 藿烷	C ₃₅ /C ₃₃ 藿烷	三环烷/ 三萜烷	甾烷/ 藿烷	重排甾烷/ 规则甾烷
5-6	E ₃	0.31	0.35	0.77	0.38	0.59	3.04	1.02	0.18	1.71	0.22	1.52	0.015
9-36	E ₃	0.29	0.31	0.81	0.35	0.61	2.88	0.99	0.16	1.69	0.24	1.63	0.013
试 3	E ₃	0.30	0.31	0.79	0.29	0.60	2.93	1.05	0.18	1.73	0.17	1.48	0.016
10-6	E ₃	0.31	0.32	0.81	0.30	0.57	2.99	0.95	0.16	1.57	0.22	1.50	0.030
10-4	E ₃	0.29	0.32	0.81	0.38	0.58	2.82	1.00	0.21	1.86	0.20	1.51	0.010
13-26	E ₃	0.28	0.33	0.71	0.51	0.60	2.78	1.03	0.16	1.70	0.18	1.42	0.026
15-6	E ₃	0.28	0.30	0.77	0.33	0.56	2.94	0.95	0.06	2.45	0.20	1.46	0.000
18-9	E ₃	0.30	0.35	0.79	0.81	0.61	2.88	0.89	0.19	0.96	0.21	1.03	0.029

注:为质量分数比值。

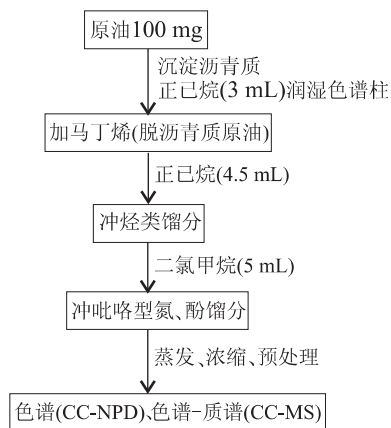


图 3 含氮化合物分离流程^[6]

Fig. 3 Isolulotion scheme of pyrrolic nitrogen compounds

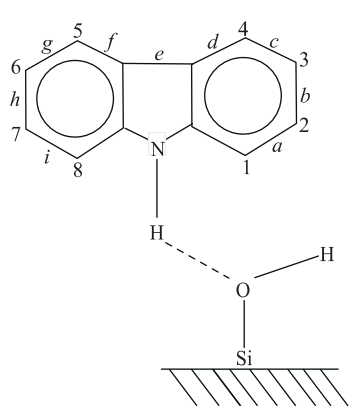


图 4 咔唑与硅表面氢氧基团反应形成氢键示意

Fig. 4 Illustration of hydrogen bond between carbazole and hydroxyl

C-1、C-8 位都被烷基取代的异构体为屏蔽型异构体;C-1、C-8 位仅有一个被烷基取代的异构体为半屏蔽型异构体;C-1、C-8 都未被取代的异构体为暴露型异构体

异构体相对富集;咔唑、苯并咔唑系列中高取代的同系物比低取代的同系物富集。因此含氮化合物的绝

对丰度和相对分布可用来评价石油运移。

3.2 油气运移探讨

原油中含有丰富的中性含氮化合物,不同样品中吡咯类化合物的丰度变化显著,原油中 C₀—C₆—咔唑、C₀—C₄—苯并咔唑系列的绝对丰度分布于 5.81×10⁻⁶~37.8×10⁻⁶。因原油具有一致的成因类型,吡咯类化合物总体馏分峰型基本不变,单体吡咯类化合物的相对分布也较为相似。

同一油藏相同或相似成因类型原油中吡咯类化合物显著的丰度变化被认为与油气运移过程中的吸附分馏作用有关。随着油气运移距离的增加,含氮化合物丰度降低。可以定性的咔唑、甲基咔唑、二甲基咔唑及无取代基苯并咔唑的绝对定量结果如图 2 所示。不同样品中吡咯类化合物的丰度变化有一定的规律性,该背斜油藏的中北部位中性含氮化合物丰度较高,沿着长轴方向向两端,特别是南端丰度逐渐降低。在背斜的短轴方向上,东翼偏高、西翼偏低。

与丰度变化相类似,不同原油样异构体分布也表现出明显的分馏效应。沿背斜油藏长轴方向,明显观察到南南部从 10-6 井、13-26 井到 18-9 井方向,二甲基、三甲基咔唑系列中的屏蔽化程度高的异构体相对于屏蔽化程度低的异构体富集(图 5)。类似地,背斜油藏北部从 9-36 井到 5-6 井,C₂—、C₃—咔唑系列表现出一定的分馏效应。有关参数,如 1,8-/1,3—二甲基咔唑、1,8-/2,7—二甲基咔唑、A/B、A/C、A₅/BB₅(C₅—咔唑)、C₄—/C₂—咔唑、C₄—/C₂—苯并咔唑、甲基苯并咔唑系列中的 a₁/a₅(分别代表甲基苯并[a]、[c]咔唑)等(表 2),基本一致反映背斜油藏的中部油样分馏效应最弱,从长轴方向中部向两侧有一定的分馏效应。但短轴方向分馏效应出现不一致现象,不少参数显示西侧的 10-4 井分馏效应较弱。此外,15-6 井有时表现异常。

表 2 尕斯库勒原油吡咯类化合物基本参数
Table 2 Parameters of pyrrolic nitrogen compounds in oil

井号	1,8-/	1,8-/	1,8-/	1,8-/	A/B	A/C	C ₄ /	C ₄ /	$\omega(C_2-Ca)$			$\omega(C_3-Ca)$			A ₅ /BB ₅	a ₁ /a ₅
	1,3-DMC	2,7-DMC	NEX's-DMC	NPE's-DMC			C ₂ -Ca	C ₂ -BC	G ₁	G ₂	G ₃	G ₁	G ₂	G ₃		
5-6	1.58	1.11	0.38	0.20	0.81	1.25	1.06	0.46	0.12	0.57	0.31	0.38	0.38	0.23	0.70	0.73
9-36	1.32	1.10	0.41	0.19	0.76	1.13	1.35	0.62	0.12	0.60	0.28	0.35	0.38	0.28	3.84	0.77
试 3	1.46	1.16	0.42	0.21	0.85	1.37	0.95	0.54	0.12	0.59	0.29	0.37	0.41	0.23	4.06	0.87
10-6	1.48	1.02	0.35	0.20	0.78	1.21	1.12	0.49	0.11	0.57	0.32	0.35	0.39	0.26	2.29	0.99
10-4	1.31	0.98	0.32	0.17	0.77	1.18	1.88	0.71	0.10	0.58	0.32	0.33	0.41	0.27	2.02	0.57
13-26	1.53	1.20	0.40	0.20	0.87	1.43	1.49	0.77	0.12	0.59	0.29	0.37	0.42	0.21	1.17	0.66
15-6	1.29	1.02	0.32	0.18	0.85	1.26	1.57	0.47	0.10	0.57	0.33	0.36	0.41	0.23	2.00	0.70
18-9	1.55	1.60	0.52	0.20	1.02	1.74	1.99	0.70	0.13	0.63	0.24	0.37	0.41	0.22	0.58	0.51

DMC, 二甲基吡唑; NEX's, 暴露异构体总和; NPE's, 部分暴露异构体总和; Ca, 吡唑; BC, 苯并吡唑; G₁, G₂, G₃, 分别代表屏蔽、半屏蔽、暴露异构体相对质量分数; A₅, BB₅ 代表 C₅-吡唑异构单体; a₁, a₅, 分别代表甲基苯并[A]、[C]吡唑, 皆为质量分数比值。

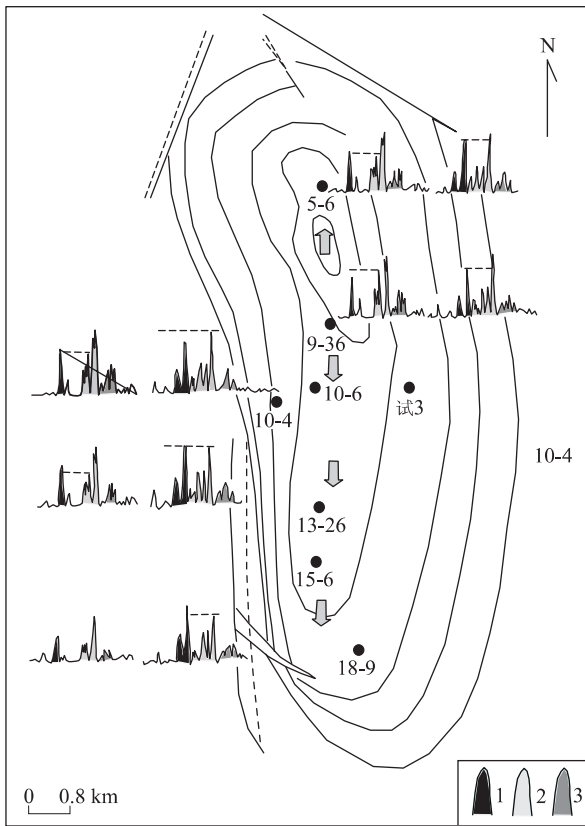


图 5 原油中 C₂-、C₃-吡唑三类异构体相对丰度的变化
Fig. 5 Relative abundance of C₂-、C₃-carbazoles' isomers indicating direction of oil migration

1. 屏蔽型; 2. 半屏蔽型; 3. 暴露型

以上分析指示尕斯库勒 E₃ 油藏的油气注入点在背斜构造的中北部。从含氮化合物的丰度和部分异构体参数来看, 油气注入点在背斜的东北端, 油源来自东北方向; 从部分异构体转移参数来看, 部分油气从西翼注入, 油源来自尕斯断陷自身。由此认为, 该区油气极可能从两个方向注入油藏。油气通过主

要注入点首先充注构造的高部位, 随着油气注入量的不断增加, 必然有部分油气在圈团范围内进行侧向分配, 以充填构造的低部位。与背斜北端相比, 南端属于低部位, 因此, 氮化合物表现出从中北部向南侧的转移分馏效应; 而北部则表现出一定程度的由 9-36 井向 5-6 井, 即从中北部向北部方向的转移效应。含氮化合物所指示的大致转移方向与该油藏油气在北背斜相对富集本质上相互吻合。

依据含氮化合物显示的油气转移分馏效应, 认为尕斯库勒油田的油气主要来源不是尕斯断陷自身的生油岩。如果尕斯库勒油气主要为自身油源, 推测其主要转移通道为 III 号断层, 由断层下盘的红狮凹陷地区生成的油气通过断层转移至构造高部位, 因 III 号断层位置偏向于南端背斜, 油气应表现出由南向北的分馏效应, 但事实并非如此。尕斯断陷提供的油气较为有限, 可能仅分布于背斜油藏的西南部位。西南侧 10-4 井、10-6 井原油吡咯类化合物异构体参数出现与丰度变化不一致及 15-6 井出现异常的情形, 认为与这部分油气的影响有关。因油气的主要注入点并非在背斜构造的最北端, 排除了油气主要来自北部相邻油藏的可能性。结合该区特定的地质条件, 认为 E₃ 油藏的油气主要来自外部烃源岩, 位于尕斯库勒油田东北方向的茫崖凹陷应为提供油气的主要“生油灶”。

早期对茫崖坳陷泥岩压实和油气转移的条件研究指出, 柴达木盆地第三系在一定深度 (2 800 ~ 3 200 m) 普遍存在异常高压, 并成为油气自生油岩向储集岩转移的动力。有关烃类油气转移研究^①认为柴达木盆地第三系油气转移效应并不很显著, 以

①黄第藩, 柴达木盆地西部第三系油源岩的地球化学和生油评价。内部报告, 1987。

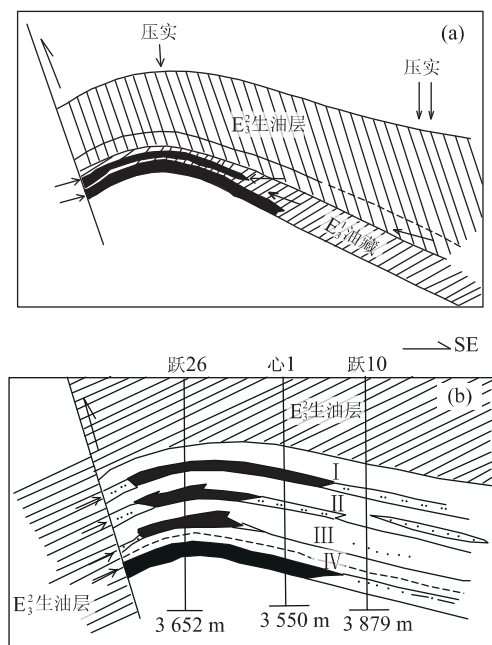
图6 尕斯库勒油田 E_3^1 油藏油气运移模式

Fig. 6 Oil accumulation patterns of Gasikule oilfield

a. 侧上式运移; b. 断接式运移

短距离的侧向运移和垂向运移为特征。尕斯库勒油田所在的构造,即跃进一号位于盆地西部坳陷区的尕斯断陷内,为一凹中之隆。长期以来为油气的运移指向区,而且茫崖凹陷的西南侧烃源岩为最有利的生油层。烃类油源对比数据表明^①,跃进一号油田的油源来自茫崖凹陷,尕斯断陷自身烃源岩仅有少量的贡献。吡咯类化合物确认的油气源与注入点的认识与先前研究不谋而合。

4 E_3^1 油藏形成机制

尕斯库勒 E_3^1 油藏的油气有两个注入点、两个方向的油源,暗示了该油藏油气的来源及油气的充注模式,反映该油藏特定的形成机制。

结合该区地质条件及吡咯类化合物油气运移效应的分析,认为尕斯库勒 E_3^1 油藏的形成是一种“上生下储”式成藏组合,油气运移主要通过以下两种方式:(1)侧上式运移(图6a),尕斯库勒背斜油气藏为一花岗岩基底隆起断块上所发育形成的古构造,边沉积边隆起的特征明显,因而在构造高部位 E_3^1 储集层以上连续沉积 E_3^1 生油层的同时,构造翼部和外围的低凹部分相对沉积了更厚的生油岩系。构造顶部砂岩储集层的压实系数远远小于上覆生油层,特别

是构造翼部和外围的低凹部分的生油岩系。因此,在差异压实作用下,上覆烃源岩、主要是下倾部分烃源岩生成的油气顺层作侧上向运移,进入背斜圈闭聚集成藏。 E_3^1 油藏油气主要来自茫崖凹陷中成熟度较高的 E_3^1 、 E_{1+2} 生油层,该凹陷中第三系生油岩沉积厚度达 6 000~8 000 m;油气注入点在背斜圈闭的翼部符合差异压实的机制。(2)断接式运移(图6b),尕斯库勒背斜圈闭及其两翼的逆断层为同生构造,随着断层西盘的下陷和东盘的隆升,导致尕斯库勒背斜主体的 4 套 E_3^1 储集层与断层西盘的大套生油层直接相连,油气生成以后即可向上作初次运移并通过断层向具有较大孔隙和较低压力的 E_3^1 储集层内运移和富集。尕斯库勒 E_3^1 油藏为“上生下储”式成藏组合,并非单纯的倒灌式,而是有其特定的地质条件。

5 结论

(1)根据含氮化合物的分馏效应,确认尕斯库勒 E_3^1 油藏的油气注入点位于长轴背斜构造两翼的中偏北部位。其中,东翼为主要的油气注入点。推断该区油气有两个方向油源(属于不同部位同一套生油岩),茫崖凹陷为其主要的油源区,尕斯库勒所在断陷自身油源有其局限性;(2)尕斯库勒 E_3^1 油藏为“上生下储”式成藏组合,其特定的地质条件为这一模式的生储组合提供了油气运移的保障。

参考文献:

- [1] Bowler B F, Larter S R, Clegg H, et al. Dimethylcarbazoles in crude oils: comment on "liquid chromatographic separation schemes for pyrrole and pyridine nitrogen aromatic heterocycle fractions from crude oils suitable for rapid characterization of geochemical samples" [J]. Anal Chem, 1997, 69: 3128-3129.
- [2] Dorbon M, Schmitter J M, Garrigues P, et al. Distribution of carbazole derivatives in petroleum [J]. Organic Geochemistry, 1984, 7: 111-120.
- [3] Li M, Larer S R, Stoddart D, et al. Fractionation of pyrrolic nitrogen compounds in petroleum during migration-derivation of migration related geochemical parameters [A]. In: Cubitt J M, England W A, eds. The geochemistry of reservoirs [C]. Geological Society Special Publication, 1995, 86: 103-123.
- [4] Brothers I, Engel M H, Krooss B M. The effects of

- fluid flow through porous media on the distribution of organic compounds in a synthetic crude oil [J]. *Organic Geochemistry*, 1991, 17: 11–24.
- [5] Yamamoto M. Fractionation of azarenes during oil migration [J]. *Organic Geochemistry*, 1992, 19: 89–402.
- [6] Yamamoto M, Taguchi T, Sasaki K. Basic nitrogen compounds in bitumen and crude oils [J]. *Chemical Geology*, 1991, 93: 193–206.

APPLICATION OF NON-HYDROCARBON TECHNIQUE TO CHARGING PATTERN IN E₃¹ POOL, GASIKULE OILFIELD, QAIDAM BASIN

Li Sumei^{1,2}, Liu Luofu¹, Wang Tieguan¹, Guo Shaohui¹, Li Maowen²

(1. *The Key Lab of Education Ministry on Mechanisms of Petroleum Reservoir Formation at Petroleum University, PRC, Beijing 102249, China*; 2. *Geological Survey of Canada (Calgary), Calgary T2L2A7, Canada*)

Abstract: The detection of pyrrolic nitrogen compounds in oils of Gasikule oilfield, Qaidam basin, western China reveals apparent migration effects of pyrrolic nitrogen compounds in the oils, indicating that the main charging points of Gasikule oilfield of lower anticline pool (E₃¹) are on the two sides of the anticline along the direction of the short axis, especially along the right side of the anticline. The main migration directions of oil redistribution range from the middle of the anticline to the two sides of the long axis. Most oils are supposed to come from Manya sag in the northeast of the pool, and only minority of oils, accumulated in the southwest of the anticlinal pool, are supposed to come from Gasi sag itself. The geological background of this area determines the oil migration and accumulation patterns, further indicating that unconformity and fracture are the two major paths for the oil migration.

Key words: pyrrolic nitrogen compound; oil migration; pool pattern; Gasikule oilfield.