

<http://www.geojournals.cn/dzxb/ch/index.aspx>

柴达木盆地尕斯库勒油田原油油源特征及成藏分析

朱扬明¹⁾ 翁焕新¹⁾ 苏爱国²⁾ 张大江²⁾ 邹华耀³⁾

1) 浙江大学地球科学系, 杭州, 310027

2) 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

3) 石油大学资源与信息学院, 北京, 102249

内容提要 在系统剖析尕斯库勒油田浅层($N_1-N_2^1$)和深层(E_3^1)油藏原油的地球化学特征, 精细划分原油类型基础上, 用中性氮化合物作为原油运移的示踪性指标, 追溯油藏原油的运移方向和路径; 并利用含油包裹体测温资料, 结合地层沉降热演化史, 确定原油成藏期。研究表明, 尕斯库勒浅层与深层油藏原油地球化学特征有明显差别, 分别来自不同的油源; 在浅层和深层油藏内部原油也并非来自单一油源。运移参数显示, 尕斯库勒浅层油藏原油来自茫崖凹陷, 沿油砂山大逆断层从构造东侧注入油藏。深层油藏有两个原油注入点, 一是来自茫崖凹陷的原油从东北方向沿油藏北端的XI号断层注入, 由北往南运移; 二是从构造西侧的III号断层注入。尕斯库勒浅层油藏原油在约9Ma前开始注入成藏, 延续至今; 深层油藏原油成藏期较早, 为前29.5~3Ma。

关键词 原油 运移 成藏 含氮化合物 生物标志物 尕斯库勒油田 柴达木盆地

柴达木盆地是我国西北地区重要的含油气盆地, 本区的盆地构造、成藏机制和油气地球化学研究已进行了大量工作(李本亮等, 2003; 张晓宝等, 2003; 朱扬明等, 2003; 段毅等, 2003; Zhang et al., 2003a)。尕斯库勒油田是柴达木盆地西部地区最大的油田, 原油年产量占全盆地总产量的一半以上。该油田有浅层($N_1-N_2^1$)和深层(E_3^1)两个层系油藏。尕斯库勒油田地处盆地西部的尕斯断陷(图1a), 东邻茫崖凹陷, 北接红狮凹陷, 南濒切克里克凹陷, 可能具有多个油气源。自上世纪70年代末油田被发现以来, 该油田原油的油源一直有多种认识。一种观点^①认为油源来自油田所在的尕斯断陷, 烃源层为中新统上干柴沟组下段(N_1^1)和渐新统下干柴沟组上段(E_3^2)咸水湖相泥岩; 深层油藏是在构造低部位较高的异常压力作用下原油向侧下运移聚集而成, 即以“上生下储式”方式成藏; 而浅层油藏则以“下生上储式”模式成藏。有人^②则认为油藏的油源可能来自其东北边的茫崖凹陷和西北边的红狮凹陷, 通过断层引起的地层接触错落, 以“断接式”生储组合成藏; 还有人提出南边的切克里克凹陷也可能提供油源(私人通讯)。然而, 这些观点主要依据油藏所处的构造

位置, 只从地质背景上加以推测, 缺乏有效的地球化学证据, 无法明确油藏原油的来源、运移方向及成藏机制。李素梅等(2001)曾用非烃技术对该油田 E_3^1 油藏的充注模式进行了探讨, 但没有考虑油藏内部原油性质的差异性对运移参数产生的可能影响。至于 $N_1-N_2^1$ 浅层油藏, 迄今尚无人开展过运移及成藏方面的地球化学研究。

本文在系统剖析尕斯库勒油田浅层($N_1-N_2^1$)和深层(E_3^1)油藏原油的地球化学特征, 精细划分原油类型基础上, 用中性氮化合物作为原油运移的示踪性指标, 追溯油藏原油的运移方向和路径; 并利用含油包裹体测温资料, 结合地层沉降热演化史, 确定原油成藏期; 为本区的油气深入勘探提供科学依据。

1 尕斯库勒油藏概况与样品

尕斯库勒油藏构造位于柴达木盆地西部坳陷尕斯断陷中的油砂山大逆掩断层下盘(图1b)。大逆掩断层上盘浅部为油砂山油田, 下盘中部为尕斯库勒浅层 $N_1-N_2^1$ (中新统上干柴沟组—上新统下油砂山组)油藏, 深部为深层 E_3^1 (渐新统下干柴沟组下段)油藏。 E_3^1 深层油藏为一轴向近南北、北端略向西偏的

注: 本文为中国石油天然气集团公司“九五”重点攻关项目(编号 970207)资助成果。

① 顾树松, 等. 1994. 青海省柴达木盆地尕斯库勒油田地质规律与勘探经验. 内部报告。

② 范连顺, 等. 1983. 青海省柴达木盆地成油条件及油气资源初评. 内部报告。

收稿日期: 2003-09-02; 改回日期: 2003-12-24; 责任编辑: 周健。

作者简介: 朱扬明, 男, 1954年11月生。1997年于中国科学院广州地球化学研究所获博士学位。现为浙江大学地球科学系教授, 主要从事有机地球化学研究和教学。通讯地址: 310027, 浙江省杭州市浙大路38号; 电话: 0571-85521670。

背斜圈闭油藏。油藏构造长13km,宽4km,构造轴部较平缓,两翼不对称,西翼陡东翼缓。在西翼外围有一平行于轴线的东倾逆断层。该油层岩性主要为细砂岩,其次为粉砂岩、中砂岩;底部主要为砾岩、含砾砂岩。油藏埋深3178~3846m,划分为四个油层组。 E_3^1 油藏属高温(126°C)、异常高压、低饱和、低渗透油藏。原油属低硫石蜡基型,密度为 0.8416 g/cm^3 ,凝固点 34.6°C ,含蜡量12.87%,含硫量0.189%。本油藏无气顶也无纯气层,只含溶解气。

$N_1-N_2^1$ 浅层油藏是在背斜背景下由断层和岩性因素控制的油藏,长约12km,宽5~6km。其构造由两部分组成,一部分为油砂山大逆断层下盘,构造形态与 E_3^1 深油藏构造相似,南北长约10km,东西宽约3.5km;另一部分由油砂山大逆断层—Ⅱ号逆断层(为油砂山断层向西延伸部分)上盘与Ⅰ号逆断层(与油砂山断层正交的近北向断层)下盘组成,其构造轴线近东西向,向西倾没。油层岩性主要为中、细砂岩、砾状砂岩,其次为粉砂岩;划分成11个油层组;

油层埋深1280~2556m。原油物性与下部的 E_3^1 油藏相近,密度 0.8499 g/cm^3 ,凝固点 35.3°C ,含蜡量12.8%,含硫量0.4714%。没有明显的气层或气顶,天然气为原油中的溶解气。

本研究在矿区井口分别采集了尕斯库勒浅、深层油藏原油样品各10余个。取样时,考虑了取样井在油藏构造南北、东西向上的空间分布(图1c),以利进行原油运移研究。同时,采集到尕斯库勒油田跃101、跃50等井浅、深层油层油砂样品。

原油样品进行了全油气相色谱(GC)、生物标志物色谱(GC/MS)绝对定量分析、中性氮化合物分离与GC/MS定量分析;油砂样品进行了含油包裹体均一温度等测定。

2 浅、深层原油地球化学差异与分类

2.1 Mango 轻烃参数

尕斯库勒油田浅层 $N_1-N_2^1$ 原油与深层 E_3^1 原油的Mango轻烃 K_1 值(Mango,1990)有明显不同的分

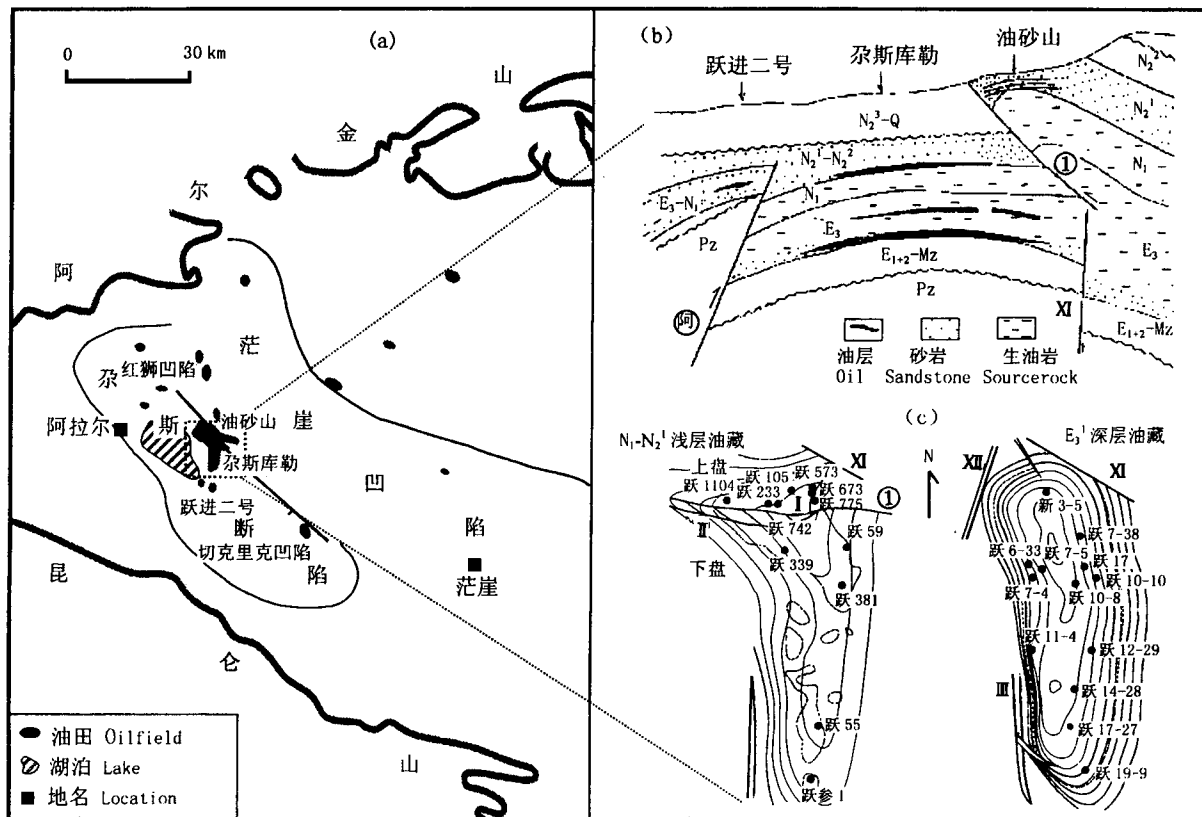


图1 柴达木盆地西部油田分布(a)与尕斯库勒油藏剖面(b)及浅、深油藏平面和取样井位图(c)
Fig.1 Sketch map showing oil fields in Western Qaidam basin (a), Gasikule reservoir section (b), distribution and sampling locations of shallow and deep reservoirs (c)

①—油砂山大逆掩断层; I~XII—断层

①—Youshashan reverse fault; I~XII—faults

布范围。浅层原油 K_1 值较高,除跃105和跃742井两个样品稍低,分别为1.13和1.14外(可能是分析方面的原因),其余各井10个原油样品 K_1 值均大于1.15,分布在1.17~1.30之间(表1);而各井深层原油的此值均较低,都在1.15以下,变化在1.07~1.14范围。

相应地,以 K_1 参数公式(Mango, 1990)中的分子和分母相应化合物的含量作纵、横坐标的分布图

上(图2a),更直观地反映出尕斯库勒油田浅、深层原油的差别。它们的浅、深层原油样品点分别分布在两条不同的斜线上,可能意味着有不同的油源。

按照 Mango (1994)提出的轻烃形成演化模式,不同结构类型的轻烃有不同的演化途径。 P_1 是 Mango 轻烃成因模式中的第一级母体,分别通过三

表1 柴达木盆地西部尕斯库勒油田原油地球化学参数表

Table 1 Geochemical parameters of crude oils from Gasikule oilfield in Western Qaidam basin

油层	井号	井段(m)	层位	K_1	PID ₁	PID ₂	Pr/Ph	Ph/nC ₁₈	G/C ₃₀	C ₃₅ /C ₃₄	C ₂₇ (%)	C ₂₈ (%)	C ₂₉ (%)	C ₂₉ S/S+R	甾/藿	烷基色甾(%)
浅层	跃742	1436.8~1562.0	N ₁ -N ₂	1.13	1.21	23.29	0.38	1.80	0.78	1.14	36.96	30.36	32.68	0.30	3.56	3.81
	跃105	1394.4~1579.4	N ₁ -N ₂	1.14	1.26	27.16	0.38	1.65	0.74	1.27	36.86	30.60	32.54	0.30	3.51	3.56
	跃1104	1774.2~1811.4	N ₁ -N ₂	1.18	1.19	29.40	0.39	1.53	0.80	1.33	37.06	30.51	32.43	0.30	3.66	3.32
	跃233	1584.0~1683.4	N ₁ -N ₂	1.17	1.26	29.71	0.37	1.57	0.82	1.07	36.84	30.68	32.48	0.30	3.62	2.52
	跃673	1608.2~1693.4	N ₁ -N ₂	1.17	1.24	29.95	0.38	1.48	0.81	1.04	36.90	30.09	33.02	0.29	3.51	2.44
	跃573	1762.6~1814.0	N ₁ -N ₂	1.19	1.20	29.53	0.37	1.56	0.76	1.12	36.45	30.47	33.08	0.29	3.62	3.25
	跃775	1836.2~1972.0	N ₁ -N ₂	1.19	1.21	29.44	0.38	1.49	0.75	1.07	37.20	30.52	32.28	0.30	3.59	1.49
	跃381	1524.0~1756.0	N ₁ -N ₂	1.21	1.54	5.97	0.47	/	0.73	0.86	38.63	30.11	31.26	0.36	2.95	1.33
	跃339	1891.2~2038.7	N ₁ -N ₂	1.20	1.24	21.85	0.37	2.26	0.68	1.02	38.33	29.60	32.07	0.33	3.09	2.01
	跃55	1846.6~2309.6	N ₁ -N ₂	1.30	1.06	27.56	0.36	1.57	0.73	0.64	36.98	31.96	31.07	0.37	2.35	0.37
	跃59	1613.4~1848.8	N ₁ -N ₂	1.22	1.32	25.73	0.44	2.23	0.70	0.94	37.60	30.00	32.40	0.32	3.05	1.71
	跃参1	2254.0~2447.2	N ₁ -N ₂	1.23	1.09	30.30	0.37	1.79	0.65	1.01	33.55	31.36	35.09	0.31	3.13	1.48
深层	新3-5	3448.4~3474.0	E ₃	1.10	1.65	37.60	0.43	0.94	0.83	1.19	35.06	34.32	30.62	0.32	2.96	1.59
	跃17	3368.2~3414.0	E ₃	1.10	1.89	39.31	0.46	0.81	0.78	1.04	34.06	35.52	30.42	0.34	2.51	0.84
	跃7-5	3382.4~3470.4	E ₃	1.14	1.77	38.05	0.44	0.87	0.77	0.94	34.87	34.54	30.59	0.33	2.55	1.00
	跃7-38	3539.2~3626.0	E ₃	1.08	1.95	35.42	0.39	1.13	0.96	1.18	39.36	30.20	30.44	0.39	2.70	0.70
	跃6-33	3565.2~3656.2	E ₃	1.12	2.34	40.43	0.45	0.81	0.90	1.09	34.06	34.48	31.46	0.35	2.36	0.70
	跃10-10	3491.0~3622.4	E ₃	1.12	2.34	38.58	0.43	1.00	1.07	1.19	35.77	33.55	30.68	0.38	2.31	0.60
	跃7-4	3395.4~3605.7	E ₃	1.07	1.72	37.28	0.45	0.91	0.90	1.17	35.65	34.05	30.29	0.35	2.63	0.81
	跃12-29	3291.1~3468.0	E ₃	1.10	3.13	41.63	0.45	0.83	1.08	1.23	36.80	31.29	31.90	0.37	2.04	0.56
	跃11-4	3310.0~3483.0	E ₃	1.12	1.85	39.42	0.45	0.80	0.83	1.19	35.41	33.81	30.78	0.33	2.65	1.44
	跃14-28	3224.0~3361.2	E ₃	1.11	1.93	38.94	0.45	0.86	0.84	1.20	35.72	33.38	30.90	0.34	2.62	1.57
	跃19-9	3552.4~3555.6	E ₃	1.12	2.49	39.41	0.45	0.92	1.04	1.29	36.56	32.14	31.30	0.38	2.32	0.70

注:G/C₃₀—伽玛蜡烷/C₃₀藿烷;C₃₅/C₃₄—C₃₅藿烷/C₃₄藿烷;C₂₇、C₂₈、C₂₉—C₂₇、C₂₈、C₂₉aaaR 甾烷相对百分含量。

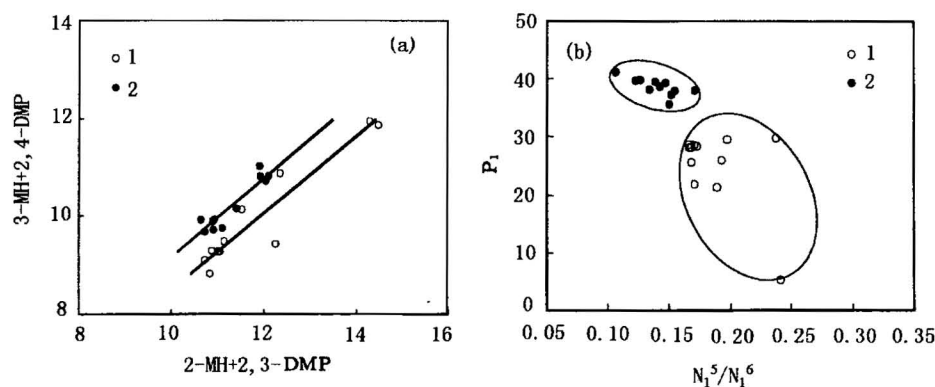


图2 尕斯库勒油田原油 Mango 轻烃参数分布图

Fig. 2 Distribution plot of Mango's light hydrocarbon parameters of crude oils in Gasikule oilfield

1—浅层原油;2—深层原油;MH—甲基己烷;DMP—二甲基戊烷

1—Oils in shallow reservoir; 2—oils in deep reservoir

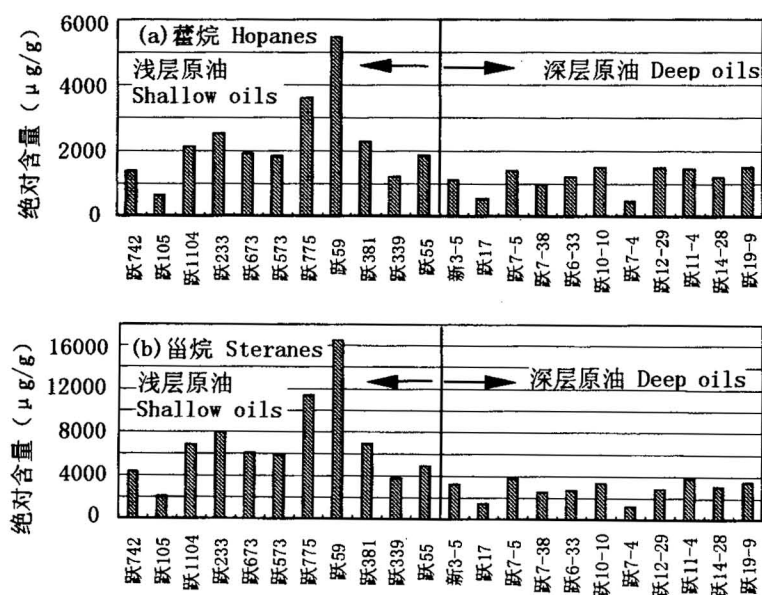


图3 尕斯库勒油田浅、深层原油生物标志物含量对比直方图

Fig. 3 Histogram diagram showing comparison of biomarker abundance between shallow and deep reservoirs in Gasikule oilfield

环、五环和六环反应可形成 $P_2(N_2, P_3)$ 、 N_1^5 和 N_1^6 子体。这些母体和子体与轻烃化合物的对应关系为: P_1 = 正庚烷, P_2 = 2-甲基己烷 + 3-甲基己烷; N_2 = 1,1-二甲基环戊烷 + 1,3-二甲基环戊烷(顺,反); P_3 = 3-乙基戊烷 + 3,3-二甲基戊烷 + 2,3-二甲基戊烷 + 2,4-二甲基戊烷 + 2,2-二甲基戊烷 + 2,2,3-三甲基丁烷; N_1^5 = 乙基环戊烷 + 1,2-二甲基环戊烷(顺,反), N_1^6 = 甲苯 + 甲基环己烷。在演化过程中,这些子体形成所涉及的关环反应不同,其反应速率常数相互独立,并随烃源岩干酪根的结构及源岩温度、压力的不同而变化,因而不同成因原油轻烃的相应化合物比值(如 N_1^5/N_1^6 等)有明显区别。

如图2b所示,尕斯库勒油田的浅、深层原油的这类比值确有不同的分布范围。与深层原油相比,浅层原油的 N_1^5/N_1^6 比值较高,也即其轻烃中五元环的环烷烃化合物含量相对较高,而六元环的环烷烃相对较少。一般认为甲基环己烷、甲苯等六元环环烷烃主要来源于高等植物中的本质素、纤维素和糖类等有机质,而二甲基环戊烷等五元环环烷烃主要来自水生藻类(林壬子,1992)。可见,浅层原油成油母质中藻类有机质比例相对较高。

2.2 甾、萜烷生标组成与分布

饱和烃生物标志物 GC/MS 定量分析结果表明,尕斯库勒油田浅层油藏原油各系列生物标志物含量均明显高于深层油藏原油。浅层原油的藿烷和

甾烷系列含量大多分别变化在1700~3000μg/g和4000~8000μg/g之间(图3);而深层原油这两系列生标含量则主要分别为1000~1500μg/g和2000~3900μg/g;表明这两层原油分别来自不同的油源。它们所含的生物标志物含量不同除了源岩因素外,可能主要与运移距离的远近有关。具有多环结构的各类甾、萜类化合物可能由于分子体积大、分子量较高而不易运移,因而随原油运移距离的增加而逐渐减少。由此可推测,该油田浅层原油的运移距离较近,而深层原油的运移距离相对较远。这种认识被后面的原油运移研究结果所证实。浅层与深层油藏原油之间的甾烷系列化合物相对组成和其他地化指标一样也存在重要的差别。与深层原油相比,浅层原油的 C_{27} 甾烷相对含量稍高,除跃参1井原油较低为33.6%外,其他11个原油均高于36%,变化在36.5%~38.6%

之间(表1),表征水生生物对有机质生源的贡献较高;而深层原油大多数样品中 C_{27} 甾烷含量在36%以下。两油层原油 C_{28} 和 C_{29} 甾烷含量也存在相应差别。这意味着两者源岩的生源构成有所不同。

总体上,浅层原油伽玛蜡烷含量低于深层原油的,其伽玛蜡烷/ C_{30} 藿烷值大多低于0.8,而深层原油的大都高于0.8,表明两者源岩沉积水体的咸度有所差别。此外,在 Pr/Ph、甾烷/藿烷、 C_{35}/C_{34} 藿烷等及芳烃有关指相和生源指标上,浅、深层原油也存在明显的系统差异(表1)。

2.3 热演化程度

尕斯库勒油田浅层与深层原油的成熟度有一定差别。浅层原油的轻烃石蜡指数 PID_1 和 PID_2 分别为1.06~1.54和21.9~30.0(部分样品受生物降解影响,此值偏低),明显低于深层原油(图4);后者的这两参数值分别为1.65~3.13和35.4~40.4,表征演化程度相对较高。

它们的甾烷异构化率也显示出浅层原油总体演化程度要低一些。位于上盘区的各井浅层原油 $C_{29}S/(S+R)$ 值在0.30左右,下盘区的各井原油该参数值稍高一些。深层原油 $C_{29}S/(S+R)$ 值相对较高,为0.32~0.39。

2.4 浅、深层原油具多种油源

如上所叙,尕斯库勒油田浅层与深层原油地球化学特征有系统的差别,两者有关的地球化学参数

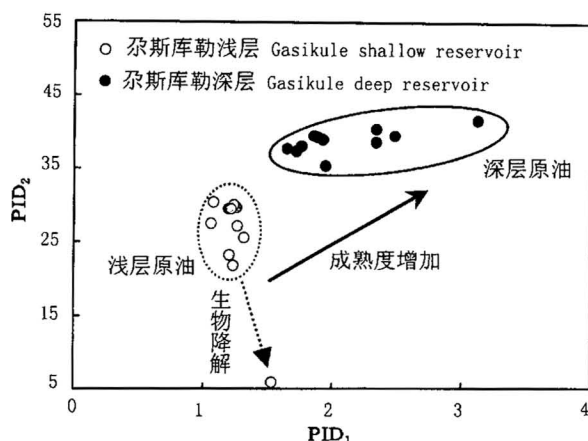
图4 尕斯库勒浅、深层原油轻烃PID₁和PID₂分布图

Fig. 4 Distribution plot of light parameter PID₁ and PID₂ of crude oils from shallow and deep reservoirs in Gasikule oilfield

变化范围与平均值列于表2。由此,可认为它们为两类不同的原油,分别来自不同的油源。

在此要进一步指出的是,该油田浅层和深层油藏内部在平面上原油性质也存在一定的变化。在浅层油藏中,尕斯库勒油田上盘区原油地球化学特征及成熟度相当一致,各油层组间也没有差别。而其下盘区原油地化参数有一定的波动,其轻烃K₁值高于1.20,大于上盘区原油(<1.20);成熟度相对较高,C₂₉S/(S+R)变化在0.31~0.37之间,高于上盘区原油(0.29~0.30),可能有同油源层的后期原油或其他油源油混入。

尕斯库勒深层油藏中各原油样品的轻烃、全色谱参数相当一致,但在饱和烃生标分布和成熟度上存在变化。油藏构造东翼一侧的跃7-38、跃12-29、跃19-9等井原油的生标分布与西翼中部原油有所不同。这几个原油的伽玛蜡烷/C₃₀藿烷值(0.96~1.08)高于其他原油(0.77~0.90)。与同油藏其他原油C₂₈甾烷含量(33.8%~35.5%)相比,其含量(30.2%~32.1%)相对较低。其成熟度参数C₂₉S/

(S+R)值(0.37~0.39)比其他原油(0.32~0.35)高。这些差异表明尕斯库勒深层油藏有两种油源油注入。

笔者曾系统地对本区原油进行过油-岩对比研究,上述原油主要来源于茫崖凹陷。

3 油藏原油运移分析

研究表明,含氮化合物含量和不同构型异构体的比值是指示原油运移方向与路径的有效指标(Li et al., 1995; Chen, 1995; Larter et al., 1996);国内也有不少这方面的应用实例(王铁冠等, 2000; 李素梅等, 2001)。本文用这类非烃化合物探讨尕斯库勒浅、深层油藏原油运移的方向与路径,追溯油源区。

3.1 浅层油藏原油运移

中性氮组分的GC/MS定量分析结果表明,尕斯库勒油田浅层原油的咪唑类含氮化合物含量较高,已定性的22个化合物总量变化在3.9~26.7μg/g范围。对研究区原油来说,这意味着这些原油总体的运移距离不大,离油源区较近。

在浅层油藏平面上,各取样井原油中性氮化合物总含量呈规律性变化(图5a)。油层下盘区各井原油其含量呈由北向南变低的趋势。地处东北角的59井原油含量最高,为26.7μg/g,其中咪唑和苯并咪唑含量分别为2.3μg/g和3.4μg/g;位于油层最南端的跃参1井原油中这些化合物含量最低,总量仅为3.9μg/g,咪唑和苯并咪唑含量分别为0.4μg/g和0.3μg/g;这意味着在本区原油总体上由北向南运移。但从图5a中可注意到,跃55井原油中这些化合物含量显得偏高,可能与局部的油源供给有关。

这几井原油的各项中性氮化合物分子运移指标也指示这种运移方向。在跃59、跃381、跃55和跃参1井一线上,其1-/4-MCA(甲基咪唑)、1,8-/2,4-DMCA(二甲基咪唑)和[a]/[c]BCA(苯并咪唑)均呈规律性变化。这4口井原油的1-/4-MCA和1,8-/2,4-DMCA总体上由北向南增高,两者从北向南分

表2 尕斯库勒油田浅、深层原油地球化学参数对照表

Table 2 Comparison of geochemical parameter of crude oils from shallow and deep reservoirs in Gasikule oilfield

油层	K ₁	Pr/Ph	Ph/nC ₁₈	G/C ₃₀	C ₃₅ /C ₃₄	C ₂₈ 甾烷(%)	甾/藿	烷基色磷含量(%)	C ₂₉ S/(S+R)
浅层	1.13~1.23 1.18(14)	0.36~0.40 0.38(14)	1.48~2.26 1.69(14)	0.65~0.82 0.75(15)	0.64~1.33 1.06(15)	29.6~31.4 30.4(15)	3.05~3.66 3.36(15)	95.8~562.7 262.6(15)	0.29~0.37 0.31(15)
深层	1.07~1.12 1.11(12)	0.42~0.46 0.44(12)	0.80~1.13 0.91(12)	0.77~1.19 0.93(12)	0.94~1.29 1.17(12)	30.2~35.5 33.1(12)	1.87~2.96 2.46(12)	22.0~119.9 50.0(12)	0.32~0.39 0.36(12)

注:表中数值为最小值~最大值/平均值(样品数);G/C₃₀—伽玛蜡烷/C₃₀藿烷;C₃₅/C₃₄—C₃₅藿烷/C₃₄藿烷。

别呈 $1.34 \rightarrow 1.00 \rightarrow 1.70 \rightarrow 1.94$ 和 $1.09 \rightarrow 1.01 \rightarrow 1.21 \rightarrow 1.32$ 变化;它们的 $[a]/[c]$ BCA 值(随运移距离增加而减小)由北向南变低,呈 $1.66 \rightarrow 1.60 \rightarrow 1.48 \rightarrow 0.79$ 变化,表明原油从北向南运移。

在油层下盘区东西方向上,跃59和跃339两井间原油的上述各项中性氮运移参数呈一致性变化。西边的跃339井原油中性氮化合物含量显著低于其东边的跃59井原油(图5a)。从跃59井到跃339井,1-4-MCA 和1,8-/2,4-DMCA 分别从1.34和1.09增至1.72和1.33;而 $[a]/[c]$ BCA 从1.66减小到0.99。这表明两井间原油由东向西方向运移。

在浅层油藏的上盘区,所分析的原油中性氮化合物总量比较接近,变化在 $16.9 \sim 20.1 \mu\text{g/g}$ 之间,但仍反映出由东向西减少的趋势。这些原油之间的中性氮分子运移参数也显示出较明显的运移趋向。如取自跃673、233、1104三个井Ⅱ油组原油的PSNs/ENs(部分屏蔽型二甲基咪唑异构体/裸露型异构

体)值由东向西逐渐增高,依次为2.53、2.56和2.59,表明油源来自东边,原油由东向西运移。

从上述分别位于油砂山大逆断层—Ⅱ号断层面上、下盘区的浅层油藏原油中性氮化合物含量和分子运移指标的变化趋势与所指示的运移方向看,该油藏原油油源来自东北方向,也即茫崖凹陷。原油可能从深部地层通过油砂山大逆断层向上运移,在构造东侧注入尕斯库勒浅层油藏,然后沿断层面两侧的储集层运移;在下盘区向南、向西运移;在上盘区向西运移。由于原油间有关参数存在一些异常变化,因而不排除有少量其他来源的原油混入。

前已指出,在所分析的原油样品中,下盘区的浅层油藏原油成熟度相对高些,表明下盘区原油注入时间稍晚或是有后期成熟度较高的同源原油混入。另外,下盘区原油成熟度有从北向南降低的趋势,进一步佐证上述对本区原油从北向南运移的分析。

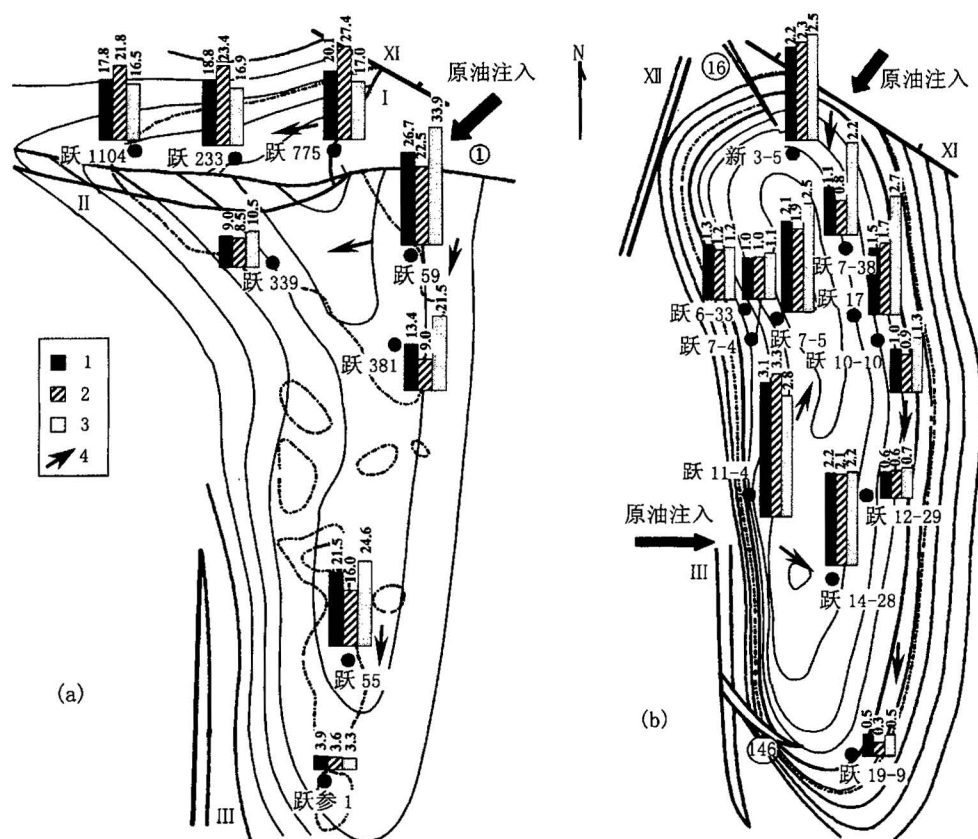


图 5 尕斯库勒浅层油藏(a)和深层油藏(b)原油中性氮化合物含量变化与运移方向

Fig. 5 Decreasing abundance of neutral nitrogen-containing compounds in oils showing migration direction in Gasikule shallow (a) and deep (b) reservoirs

1—咪唑类化合物总量($\mu\text{g/g}$); 2—咪唑含量($\times 10 \mu\text{g/g}$); 3—苯并咪唑含量(浅层, $\times 10 \mu\text{g/g}$; 深层, $\times 5 \mu\text{g/g}$); 4—原油运移方向
1—Abundance of carbazoles ($\mu\text{g/g}$); 2—carbazole concentration ($\times 10 \mu\text{g/g}$); 3—benzocarbazole concentration (shallow oils, $\times 10 \mu\text{g/g}$; deep oils, $\times 5 \mu\text{g/g}$); 4—oil migration direction

3.2 深层油藏原油运移

尕斯库勒深层油藏原油的中性氮化合物总量较低,变化在 $0.5\sim 3.1\mu\text{g/g}$ 之间,远低于成因类型相似、成熟度相差不太大的浅层油藏原油($3.9\sim 26.7\mu\text{g/g}$),表明其运移距离较长,离油源区较远;同时也进一步说明与浅层原油有不同的油源。

在油藏平面上,各取样井原油的中性氮化合物含量有较大的变化。在油藏构造东翼的新3-5、跃7-38、跃17、跃10-10、跃12-29和跃19-9井原油中,中性氮化合物含量总体上呈由北向南变低的趋势(图5b),具体数据变化为: $2.2\rightarrow 1.1\rightarrow 1.5\rightarrow 1.0\rightarrow 0.6\rightarrow 0.5\mu\text{g/g}$;它们的咔唑和苯并咔唑含量也有相同的变化趋势;意味着构造东翼的原油由北往南运移。

在构造西翼,各井原油的中性氮化合物含量变化较为复杂。从图5b可看出,位于中段西缘的跃11-4井原油中性氮化合物含量最高,其总量和咔唑、苯并咔唑含量分别为 $3.1\mu\text{g/g}$ 、 $0.33\mu\text{g/g}$ 和 $0.56\mu\text{g/g}$,远高于本油藏的其他原油,表明其运移距离相对较近,可能位于原油注入点附近。与之相距较近的跃14-28及跃7-5井原油的这些化合物含量也较高,其总量分别为 $2.2\mu\text{g/g}$ 和 $2.1\mu\text{g/g}$;而位于其北边的跃6-33和跃7-4井的原油中其含量却较低,分别为 $1.3\mu\text{g/g}$ 和 $1.0\mu\text{g/g}$ 。

这些原油的中性氮化合物分子运移参数具有相应的变化规律。在构造东翼,新3-5至跃12-29井原油的 $1\text{-}/4\text{-MCA}$ 和 $1,8\text{-}/2,4\text{-DMCA}$ 比值总体上由北向南增高, $[a]/[c]\text{BCA}$ 比值由北向南减少。只是南端的跃19-9井原油的这些参数不符合这样的变化趋势,可能是由于受到从西侧注入的原油混合所致。西侧注入的原油运移距离相对较近, $1\text{-}/4\text{-MCA}$ 和 $1,8\text{-}/2,4\text{-DMCA}$ 值较低,而 $[a]/[c]\text{BCA}$ 值较高,致使该井原油前两参数值偏低,后一参数值偏高。其他井原油可能也受到一定的影响,运移参数有一定的波动。

构造西翼各井原油的这些分子运移参数与上述中性氮化合物含量变化趋势相一致。跃11-4井原油的 $1\text{-}/4\text{-MCA}$ 和 $1,8\text{-}/2,4\text{-DMCA}$ 值最低,分别为1.08和1.38; $[a]/[c]\text{BCA}$ 值最高,为0.83,与其中性氮化合物含量最高相吻合,进一步表明其运移距离最短,离原油注入点最近。其余各井原油的 $1\text{-}/4\text{-MCA}$ 和 $1,8\text{-}/2,4\text{-DMCA}$ 值均有所增高, $[a]/[c]\text{BCA}$ 值有所下降,表明它们在油藏内运移了一定距离。

从上述原油的运移参数变化情况看,与前人的

研究结果相似(李素梅等,2001),该油藏有两个不同方向的原油注入点。其一是来源于茫崖凹陷的原油从东北方向沿XI号断层注入油藏,然后由北向南运移;其二是原油从油藏西侧的Ⅲ号断层注入,再向油藏内部沿有利的运移通道向周围运移。如前所述,本油藏东、西两翼的原油在地化特征上有所差别,演化程度也有所不同,表明两者油源不相同;进一步佐证了本油藏有两个原油注入点的认识。

然而,西侧的油源是值得进一步探讨的问题。据构造研究,Ⅲ号逆断层与尕斯库勒背斜圈闭均属同生型构造,随着断层西侧的下降和东侧的隆升,导致尕斯库勒背斜 E_3^1 储集层与断层西侧尕斯库勒的 E_3^2 生油层直接相连(图6)。当生油岩埋深达到一定深度时所生成的油气可通过“断接式”的运移关系向东侧的 E_3^1 储集层运移成藏。但问题是,据现有资料,尕斯库勒油藏西侧地区的 E_3^2 生油岩不发育,难以提供大量的油气。另一种可能是,油源来自尕斯库勒构造东边的茫崖凹陷,原油通过构造下伏的基底风化壳或 E_{1+2} 地层向西运移,当运移至Ⅲ号逆断层时再向上运移进入 E_3^1 油藏。

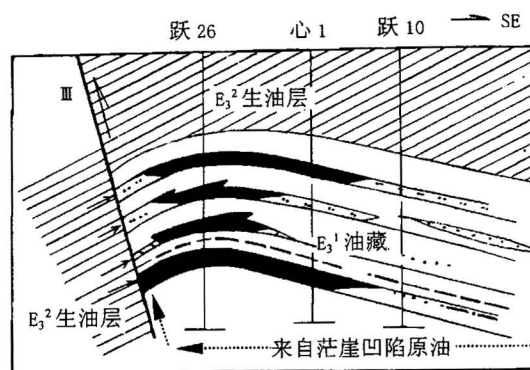


图6 尕斯库勒深层油藏横剖面与原油注入示意图
Fig.6 Section diagram of Gasikule deep reservoir showing pathway of oil charging

4 原油注入成藏期

含油包裹体的均一温度代表包裹体形成时油层流体的温度,因而可结合储集层沉降热演化史确定原油注入成藏的地质时间。本研究选择了跃50和跃101井分别代表尕斯库勒浅层和深层油藏地层,用镜质组反射率(R_o)方法正演地层的沉降热演化史;依据地层温度与深度的关系,将等温线绘在地层埋藏史曲线上(图7);最后,将油砂取样深度和含油包裹体均一温度标在图上求出原油的注入成藏时间。

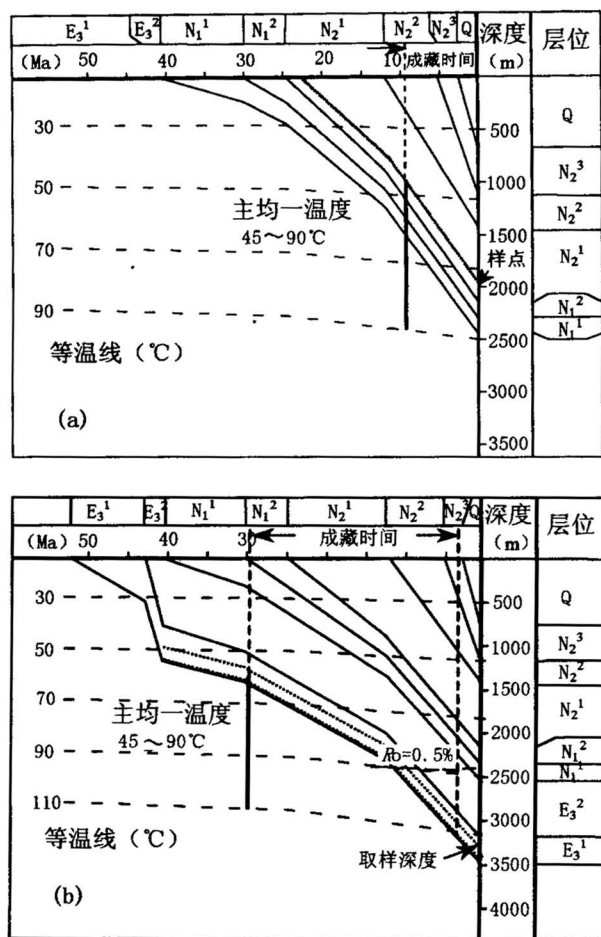


图 7 尕斯库勒油田跃50井(a)和跃101井(b)

地层埋藏演化史与浅、深层油藏原油成藏图

Fig. 7 Burial model for strata of wells Yue 50 (a) and Yue 101 (b) and oil accumulation timing of shallow and deep reservoirs in Gasikule oilfield

4.1 浅层油藏

跃50井位于尕斯库勒浅层油藏的北区,井深2500m,钻揭Q—N₁¹地层。其1987.06~1990m井段N₂¹地层油砂样品的含油包裹体均一温度变化范围为45~90℃。根据图7(a)中的地层等温线和取样地层的埋藏时温曲线,用其含油包裹体均一温度可确定出该地层所储集的原油在约9 Ma前开始注入成藏,即相当于上新世上油砂山组N₂²中部地层沉积时期开始成藏。从包裹体均一温度分布范围和地层埋藏史可以看出,N₂¹油层原油的成藏过程延续至今,表明尕斯库勒浅层油藏的原油成藏期较晚。

从图7(a)中还可看出,包裹体的部分均一温度高于地层的现今地温。按现今浅层油藏温度(t)计算公式($t = 1.676 + 0.035H$, H 为深度)计算,取样点

深度温度为72℃,低于包裹体均一温度上限值。这可能是原油的生成温度高于储集层流体温度所致。根据Mango (1997)轻烃温度参数算得的该层位原油生成温度在110~120℃之间。当原油从源岩中排出运移至本油田浅层储集岩时,温度高于地层温度,在其温度尚未能完全与地层达到平衡时就形成了部分含油包裹体,因而这些包裹体的均一温度就高于地层温度。

4.2 深层油藏

跃101井位于尕斯库勒深层油藏中部北区,井深3570m,钻揭Q—E₃¹地层。在该井E₃¹地层3300~3454.50m井段采集了三个油砂样品,测得的含油包裹体均一温度主要分布在60~110℃范围。该井地层的沉降热演化史见图7(b)。根据取样地层的时温曲线和包裹体均一温度,可认为本井E₃¹深层油藏的原油成藏期为前29.5~3Ma;即在中新世上干柴沟组上段N₂²底部地层沉积时期原油开始注入,到上新世狮子沟组N₂³地层沉积末期原油停止充注。可见,尕斯库勒深层油藏的原油成藏期比浅层油藏早。

上述尕斯库勒油藏的成藏期分析与柴达木盆地西部地区古近系一新近系生油层的成烃、排烃期和区域性构造活动期、油气大规模运移期相吻合。有研究表明,茫崖凹陷生油中心区的渐新统E₃生油层在上新世早期(N₂²)之初进入成烃高峰期,尕斯断陷E₃生油岩成烃高峰期稍晚,出现在N₂¹晚期。柴达木盆地西部地区在古近纪一新近纪有两期区域性构造活动期,即N₁²—N₂¹时期发生的南升北降构造运动和N₂³—Q₁₊₂时期发生的西升东降活动,由此引起两期相应的大规模油气运移期。尕斯库勒油田原油正是在这种区域性油气生成、运移格局下富集成藏。

5 结论

尕斯库勒浅层与深层油藏原油地球化学特征有明显差别,分别来自不同的油源;在浅层和深层油藏内部原油也并非来自单一油源。

中性氮系列化合物含量和分子运移参数表明,尕斯库勒浅层油藏原油来自茫崖凹陷,沿油砂山大逆断层从构造东侧注入油藏,然后沿断层面两侧的储集层运移;在下盘区由北向南及向西运移;在上盘区向西运移。尕斯库勒深层油藏有两个原油注入点,一是来自茫崖凹陷的原油从东北方向沿油藏北端的XI号断层注入,由北往南运移;二是从构造西侧的III号断层注入,油源可能来自其西侧的尕斯断陷,或

从东边的茫崖凹陷通过基底风化壳或经 E_{1+2} 地层运移而来。

根据含油包裹体均一温度数据和研究区构造热演化史、地层沉降时温曲线,尕斯库勒浅层油藏原油在约9 Ma 前(相当于上新世上油砂山组 N_2^2 中部地层沉积时期)开始注入成藏,延续至今;深层油藏原油成藏期较早,为前29.5~3 Ma,即在中新世上干柴沟组上段 N_1^2 底部地层沉积时期开始注入,到上新世狮子沟组 N_2^3 地层沉积末期停止充注。

参 考 文 献

- 段毅,王智平,张晓宝,张辉,周世新. 2003. 柴达木盆地西部原油极性化合物特征及其地球化学意义. 地质学报, 77(3): 414~422.
- 李本亮,王明明,魏国齐,张道伟,王金鹏. 2003. 柴达木盆地三湖地区生物气横向运聚成藏研究. 地质论评, 49(1): 93~100.
- 李素梅,刘洛夫,王铁冠,郭绍辉,黎茂稳. 2001. 利用非烃技术探讨尕斯库勒油田 E_3^3 油藏的充注模式. 地球科学—中国地质大学学报, 26(6): 621~626.
- 林壬子. 1992. 轻烃技术在油气勘探中的应用. 武汉: 中国地质大学出版社.
- 王铁冠,李素梅,张爱云,张水昌. 2000. 应用含氮化合物探讨新疆轮南油田油气运移. 地质学报, 74(1): 85~93.
- 张晓宝,徐自远,段毅,马立元,孟自芳,周世新,贺鹏. 2003. 柴达木盆地三湖地区第四系生物气的形成途径与运聚方式. 地质论评, 49(2): 168~174.
- 朱扬明,翁焕新,苏爱国,张大江,邹华耀. 2003. 柴达木盆地尕斯库勒油田原油油源特征及成藏分析. 地质学报, 77(2): 272~279.

References

- Chen M. 1995. Response of pyrrolic and phenolic compounds to petroleum migration and in-reservoir processes. Ph D thesis, University of Newcastle upon Tyne, UK.
- Duan Yi, Wang Zhiping, Zhang Xiaobao, Zhang Hui, Zhou Shixin. 2003. Characteristics and geochemical significance of polar compounds in crude oils from the western Qaidam Basin. Acta Geologica Sinica, 77(3): 414~422 (in Chinese with English abstract).
- Larter S R, Bowler B F J, Li M, et al. 1996. Molecular indicators of secondary oil migration distances. Nature, 383: 593~597.

- Li Benliang, Wang Mingming, Wei Guoqi, Zhang Daowei, Wang Jinpeng. 2003. Lateral migration and accumulation of biogenic gas in the Sanhu area, Qaidam Basin. Geological Review, 49(1): 93~100 (in Chinese with English abstract).
- Li Maowen, Larter S R, Stoddart D P, 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. London: Geological Society Special Publication 86, 103~123.
- Li Sumei, Liu Luofu, Wang Tieguan, et al. 2001. Application of non-hydrocarbon technique to charging pattern in E_3^3 pool, Gasikule oilfield, Qaidam basin. Earth Science, 26(6): 621~626 (in Chinese with English abstract).
- Lin Renzi. 1992. Light hydrocarbon techniques and it's application in oil and gas exploration. Wuhan: China University of Geosciences Press (in Chinese).
- Mango F D. 1990. The origin of light hydrocarbons in petroleum: A kinetic test of the steady-state catalytic hypothesis. Geochimica et Cosmochimica Acta, 54: 1315~1323.
- Mango F D. 1994. The origin light hydrocarbons in petroleum: Ring preference in the closure of carbocyclic rings. Geochimica et Cosmochimica Acta, 58(2): 895~901.
- Mango F D. 1997. The light hydrocarbons in petroleum: a critical review. Organic Geochemistry, 26(7/8): 417~440.
- Wang Tieguan, Li Sumei, Zhang Aiyun, et al. 2000. A discussion on petroleum migration in the Lunnan oilfield of Xinjiang based on nitrogen compounds. Acta Geologica Sinica, 74(1): 85~93 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Xiaobao, Xu Ziyuan, Duan Yi, Ma Liyuan, Meng Zifang, He Peng, Zhou Shixin, Peng Dehua. 2003a. Geochemical characteristics and origin of natural gases in the Qaidam basin, China. Acta Geologica Sinica, 77(1): 103~115.
- Zhang Xiaobao, Xu Ziyuan, Duan Yi, Ma Liyuan, Meng Zifang, Zhou Shixin, He Peng. 2003. Metabolic pathway of the Quaternary biogenetic gases and their migration and accumulation in the Qaidam Basin, China. Geological Review, 49(1): 93~100 (in Chinese with English abstract).
- Zhu Yangming, Weng Huanxin, Su Aiguo, Zhang Dajiang, Zou Huayao. 2003. Characteristics of oil source and accumulation in the Gas Hure oilfield, Qaidam Basin. Acta Geologica Sinica, 77(3): 414~422 (in Chinese with English abstract).

Characteristics of Oil Source and Accumulation in the Gas Hure Oilfield, Qaidam Basin

ZHU Yangming¹⁾, WENG Huanxin¹⁾, SU Aiguo²⁾, ZHANG Dajiang²⁾, ZOU Huayao³⁾

1) Department of Earth Sciences, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang, 310027

2) Key Oil and Gas Geochemistry Laboratory, China National Petroleum Corporation, Beijing, 100083

3) College of Resource and Information, Petroleum University, Beijing, 102249

Abstract

Based on a systematic study of geochemical characteristics and a detailed classification of the crude oils in shallow ($N_1-N_1^2$) and deep (E_1^3) reservoirs of the Gas Hure oilfield, the oil migration direction and pathway were determined using migration indicators derived from neutral organic nitrogen compounds. With the measured homogenization temperature data of oil-bearing fluid inclusions in combination with the stratigraphic

subsidence history profiles, the oil filling and accumulation timing in these reservoirs was investigated. The research results indicate that there are significant differences in geochemical features of oils between shallow and deep reservoirs in the Gas Hure oilfield, suggesting that the oils have different source rocks. Moreover, variations in biomarker parameters and /or maturity changes which exclude single oil source also exist within both the shallow and deep reservoirs. The migration indicators reveal that the oils trapped in the shallow reservoirs have migrated from the Mangnai depression and filled along the Youshashan reverse fault on the eastern side of the reservoir. This deep reservoir is considered to have two oil charging directions. The majority of oils in this reservoir could have migrated from the Mangnai depression in northeastern direction and charged to the northern part of the reservoir along the XI fault, and migrated southwards. A portion of the oils filling into the western side of the reservoir along the Ⅲ fault. The initial oil charging in the shallow reservoir could have occurred at around 9 Ma and the process continued to the present time, whereas, the period of oil charge and accumulation in the deep reservoir is believed to be between 3 and 29.5 Ma, earlier than the former.

Key words: crude oil; migration; accumulation; nitrogen-containing compound; biomarker; Gas Hure Oilfield; Qaidam Basin
