

文章编号:1672-9854(2008)-03-0049-06

## 雅克拉凝析气田油气地球化学特征

高波<sup>1</sup>, 刘文汇<sup>1,2</sup>, 张殿伟<sup>1</sup>, 范明<sup>2</sup>

(1 中国石油化工股份有限公司石油勘探开发研究院)

(2 中国石油化工股份有限公司石油勘探开发研究院无锡石油地质研究所)



高波

**摘要** 雅克拉凝析气田天然气组分以甲烷为主, 含量 79.13%~89.30%; 重烃含量较高, 平均占 9.67%; 干燥系数 ( $C_1/C_{1-5}$ ) 介于 0.89~0.92 之间, 属典型的湿气。  $\delta^{13}C_1$  为 -40.8‰~-39.4‰,  $\delta^{13}C_2$  为 -32.0‰~-30.2‰,  $\delta^{13}C_3$  为 -30.5‰~-28.9‰, 表明天然气为典型的油型气。原油及其族组分的碳同位素组成和生物标志化合物呈现出典型的海相原油特征。原油成熟度较高, 与天然气的成熟度基本相同, 表明油气同源、同阶, 为一次油气充注的产物, 而与塔河油田存在较大差异。

**关键词** 雅克拉气田; 原油; 天然气; 地球化学特征; 成熟度

**中图分类号**: TE125.2 **文献标识码**: A

**高波** 1969年生, 高级工程师。1992年毕业于中国地质大学(武汉)地质系, 获学士学位; 2003年毕业于中国科学院研究生院, 获博士学位。2005年12月—2008年1月在中国地质大学(北京)地质资源与地质工程学科从事博士后研究工作。主要从事油气地质与地球化学研究。通讯地址: 100083 北京市学院路31号; 电话: (010)82282437

雅克拉凝析气田位于新疆库车县和轮台县境内, 其构造位置属于塔里木盆地沙雅隆起雅克拉断凸中段(图1)。雅克拉构造是在前中生界隆起遭受剥蚀形成的侵蚀断块残丘的基础上, 接受中、新生代沉积, 进一步发展而形成的一个复合型构造单元。该地区钻遇震旦系、寒武系和奥陶系, 但普遍缺失志留系和上古生界。目前已在上震旦统、中寒武统、下奥陶统、下侏罗统、下白垩统等多个层位获得工业性油气流。雅克拉气田位于塔北隆起南北海相、陆相含油气系统的交界部位<sup>[1]</sup>, 油气成藏条件复杂, 对其进行油气地球化学研究将有助于加深对该区油气成藏过程的认识。本次研究中, 采集了雅克拉凝析气田的4个天然气样品和2个原油样品, 进行了系统的地球化学测试分析, 结合前人成果, 对该气田的油气

地球化学特征进行了研究。

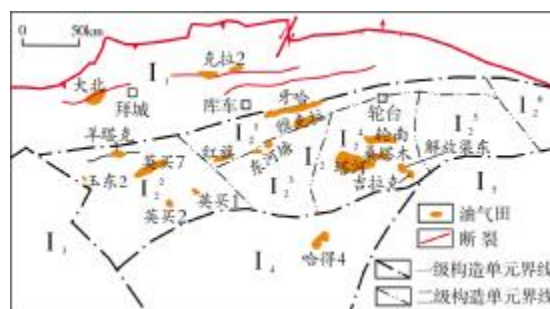


图1 雅克拉凝析气田构造位置

I<sub>1</sub> 库车坳陷; I<sub>2</sub> 沙雅隆起; I<sub>2</sub><sup>1</sup> 雅克拉断凸;  
I<sub>2</sub><sup>2</sup> 沙西隆起; I<sub>2</sub><sup>3</sup> 哈拉哈塘凹陷; I<sub>2</sub><sup>4</sup> 阿克库勒凸起;  
I<sub>2</sub><sup>5</sup> 草湖凹陷; I<sub>2</sub><sup>6</sup> 库尔勒鼻凸; I<sub>3</sub> 阿瓦提凹陷;  
I<sub>4</sub> 顺托果勒隆起; I<sub>5</sub> 满加尔凹陷

收稿日期:2008-01-17

本文为“第十一届全国有机地球化学学术会议”(2007.10.20—28)交流论文

基金项目: 本文为中国石油化工股份有限公司科技项目(编号:P04090)

## 1 天然气地球化学特征

### 1.1 组分特征

雅克拉凝析气田天然气组分以烃类气体为主,

平均占气体总体积的94.37%;非烃气体以 $N_2$ 和 $CO_2$ 为主,其平均含量分别占2.64%和2.99%。甲烷含量为79.13%~89.30%,平均84.70%;重烃含量较高,平均9.67%;干燥系数( $C_1/C_{1-5}$ )介于0.89~0.92之间,平均0.91,整体上属典型的湿气(表1)。

表1 雅克拉气田天然气的地球化学特征

井号	层位	组 分 特 征						$\delta^{13}\text{C}(‰)$			$^3\text{He}/^4\text{He}$ ( $\times 10^{-7}$ )	$^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$
		CH <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	N <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	C <sub>1</sub> /C <sub>1-5</sub>	CH <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>		
		(%)						CH <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>		
雅开 1(YK1)	卡普沙良群(K <sub>1</sub> kp)	87.92	5.27	1.77	1.63	2.02	0.91	-40.8	-31.0	-29.1	2.56	2099
雅开 2(YK2)	卡普沙良群(K <sub>1</sub> kp)	89.30	5.35	1.77	0.77	1.48	0.92	-40.8	-31.0	-29.2	2.58	2052
雅开 8(YK8)	侏罗系	82.44	4.07	1.54	3.95	3.61	0.92	-40.2	-30.2	-28.9	—	—
沙 4(S4)	侏罗系	79.13	3.25	3.07	4.22	4.83	0.89	-39.4	-32.0	-30.5	—	—

### 1.2 碳同位素特征

天然气中的甲烷及其同系物的碳同位素组成是划分天然气成因类型、进行气源判识的重要指标。由于重烃气受生气母质类型和成熟度的影响,它主要反映母质碳同位素的继承效应。一般将 $\delta^{13}C_2 < -28‰$  (或 $-29‰$ )作为天然气成因类型的重要判识指标<sup>[2-4]</sup>。对于油型气而言,统计结果显示,正常原油伴生气的 $\delta^{13}C_1$ 介于 $-48‰$ ~ $-40‰$ 之间,凝析油伴生气的 $\delta^{13}C_1$ 为 $-40‰$ ~ $-36‰$ ,高温裂解干气的 $\delta^{13}C_1$ 大于 $-36‰$ <sup>[4]</sup>。由表1可以看出,雅克拉气田天然气 $\delta^{13}C_2 < -29‰$ ,  $\delta^{13}C_3 < -25‰$ ,属于典型的油型气范畴。 $\delta^{13}C_1$ 介于 $-40.8‰$ ~ $-39.4‰$ 之间,接近或达到了凝析油伴生气范围值下限( $-40‰$ )。天然气 $\delta^{13}C_1 < \delta^{13}C_2 < \delta^{13}C_3$ ,呈正序排列,显示天然气为典型的有机成因。

### 1.3 稀有气体同位素特征

稀有气体具有化学性质不活泼、丰度很低的显著特征。近年来,随着稀有气体同位素质谱计的开发和应用,稀有气体同位素已成为一种非常有效的示踪手段,在气源示踪、烃源岩年代判识、母质环境确定,尤其是在判断是否存在深部物质参与等方面得到越来越多的应用<sup>[4-6]</sup>。目前,在稀有气体诸元素中,又以氦、氩同位素组成应用较为广泛。

氦有 $^3He$ 和 $^4He$ 两个具有不同成因的稳定同位素,

$^4He$ 为放射性成因, $^3He$ 为原始成因。地球不同圈层具有不同的氦同位素值。大气型氦(A型)同位素比值 $R_a = ^3He/^4He = 1.4 \times 10^{-6}$ ,地壳型氦(C型)同位素比值 $R_c = 2 \times 10^{-8}$ ,地幔型氦(包括M型和P型)同位素比值大于 $1.1 \times 10^{-5}$ 。因此,应用 $^3He/^4He$ 可探讨天然气中氦的来源。从表1中可以看出,此次测试分析的雅开1(YK1)井和雅开2(YK2)井两个天然气样品的 $^3He/^4He$ 介于 $(2.56 \sim 2.58) \times 10^{-7}$ , $R/R_a$ 均为0.18,为典型的壳源成因,无幔源物质的加入。

天然气中氩普遍由空气氩和放射性成因氩组成。天然气中的 $^{40}Ar$ 主要来源于 $^{40}K$ 的蜕变,具有明显的年代积累效应,随着源岩年代的变老,岩石中 $^{40}K$ 形成 $^{40}Ar$ 增多, $^{40}Ar/^{36}Ar$ 比值增大。本次研究中分析的两个天然气样品的 $^{40}Ar/^{36}Ar$ 比值介于2052~2099,根据刘文汇等<sup>[6]</sup>提出的天然气的 $^{40}Ar/^{36}Ar$ 与气源岩年代回归公式估算,其相应的源岩年代较老,形成于早古生代。

## 2 原油地球化学特征

在本次研究中,对雅开1井和雅开2井产自白垩系的两个凝析油样品进行了原油及其族组分的碳同位素和生物标志化合物的测试分析。

### 2.1 饱和烃的气相色谱特征

两个原油饱和烃气相色谱特征非常相似,碳数分布范围为 $C_{10}$ — $C_{37}$ ,均为单峰型分布(图2),主峰

碳以  $C_{14}$ 、 $C_{15}$  为主,表明低等浮游藻类对原油具有较大贡献,有机质类型以偏腐泥型为主。正构烷烃具有微弱的奇碳优势,CPI 值均为 1.07,OEP 值介于 1.03~1.06,表明原油的成熟度较高,均已进入生油高峰阶段。两个原油 Pr/Ph 值分别为 0.89 和 0.96,具有明显的植烷优势,表明原油的成烃母质沉积于还原环境。原油 Pr/ $C_{17}$  和 Ph/ $C_{18}$  较低,分别为 0.3 和 0.4,也反映原油具有较高的成熟度。

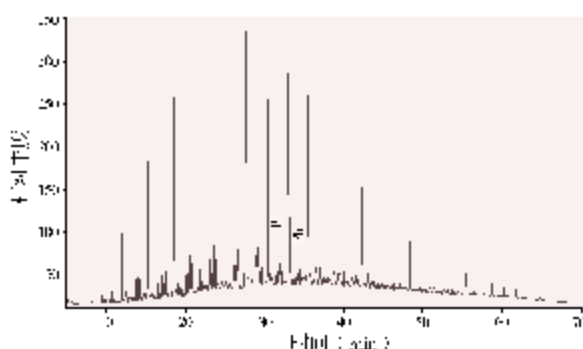


图2 雅开1井原油饱和和芳烃谱特征

## 2.2 原油及其族组成的碳同位素

原油及其族组分的碳同位素主要与原油的母质类型和性质以及热演化程度有关。一般而言,海相原油以富集轻碳同位素为其特征。雅开1井和雅开2井两个原油的  $\delta^{13}C$  值分别为  $-31.6\text{‰}$  和  $-31.7\text{‰}$ ,显示了海相凝析油的碳同位素特征,而与陆相凝析油特征存在较大差异<sup>[7]</sup>。雅克拉凝析油碳同位素值与塔河油田原油非常接近,揭示了这些原油的母质来源比较相似。然而雅克拉凝析气田原油族组成碳同位素表现为  $\delta^{13}C_{\text{饱和烃}} < \delta^{13}C_{\text{芳烃}} < \delta^{13}C_{\text{非烃}} < \delta^{13}C_{\text{沥青质}}$ ,而塔河油田主体原油都不同程度

地显示了上述正常序列的反转(图3),揭示雅克拉原油为正常充注,而塔河油田原油至少发生过两期原油的充注过程<sup>[8]</sup>。

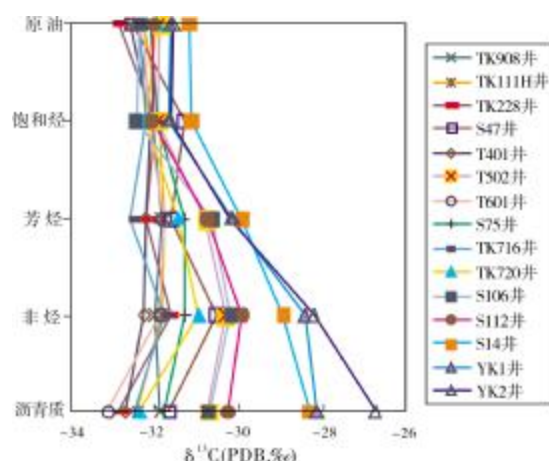


图3 雅克拉凝析气田和塔河油田原油碳同位素类型曲线

## 2.3 生物标志化合物特征

### (1) 萜烷类

原油三环萜烷含量高,两个样品三环萜烷/五环萜烷分别达2.53和2.71,这与原油具有较高的成熟度相一致。 $C_{21}$ 、 $C_{23}$ 、 $C_{24}$ 三个化合物呈倒“V”字型分布(图4),两个油样的  $C_{21}/C_{23}$  分别为0.59和0.62;  $(C_{19}+C_{20}+C_{21})/(C_{23}+C_{24})$  分别为0.67和0.68。一般认为, $C_{19}$ — $C_{21}$ 三环萜可能来源于高等植物中的二萜类先质,本区原油 $C_{19}$ — $C_{21}$ 三环萜类含量较低,表明陆源高等植物的贡献非常有限,这与库车坳陷来自三叠系—侏罗系的陆相原油存在很大的差异<sup>[9]</sup>。这从侧面说明,低等浮游生物对本区原油贡献较大,本区原油应源自早古生代的海相烃源岩。

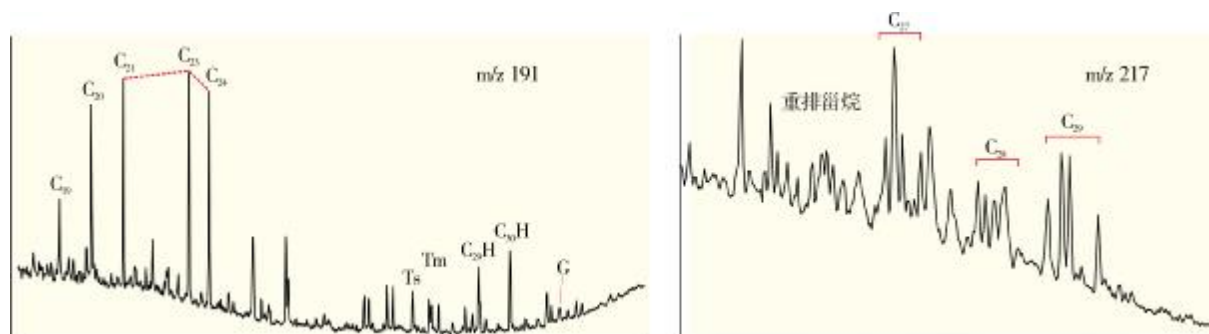


图4 雅开1井萜烷和甾烷质量色谱图

藿烷系列中,  $C_{29}$ 藿烷含量较高, 两个原油 $C_{29}$ 降藿烷/ $C_{30}$ 藿烷分别为0.91和0.82;  $C_{31}$ 藿烷/ $C_{30}$ 藿烷均为0.48。 $C_{29}$ Ts含量较低,  $C_{29}$ Ts/ $C_{30}$ 藿烷分别为0.30和0.25。 $C_{31}$ 藿烷22S/(22S+22R) 分别为0.69和0.65, 已超过了异构化终点; Ts/(Ts + Tm) 比值较高, 分别为0.59和0.49;  $C_{30}$ 莫烷和 $C_{29}$ 降莫烷含量较低,  $C_{30}$ 莫烷/ $C_{30}$ 藿烷分别为0.16和0.14, 反映原油具有较高的成熟度。原油伽马蜡烷指数(伽马蜡烷/ $C_{30}$ 藿烷)分别为0.30和0.23, 指示母质沉积于具有一定咸度的微咸—半咸水还原环境, 对有机质的保存较为有利。

### (2) 甾烷类

原油  $C_{27}$ 、 $C_{28}$ 、 $C_{29}$  甾烷均呈不对称的“V”字型分布(图4), 且  $C_{27} > C_{29} > C_{28}$ , 反映低等水生生物在母质构成中占有较大比例。原油孕甾烷和重排甾烷比较发育, 两个样品的孕甾烷/规则甾烷分别为 0.61 和 0.44, 重排甾烷/规则甾烷均在 0.60 左右。一般认为孕甾烷主要是由热降解作用形成的, 其含量随着热演化程度的加深而增加。本区较高的孕甾烷含量可能与原油具较高的成熟度有关。重排甾烷/规则甾烷主要受热成熟度和源岩的无机特征的影响, 粘土中酸性物质的催化作用被认为是沉积物中重排甾烷形成的机理<sup>[10]</sup>。本区原油较高的重排甾烷/规则甾烷一方面与原油具有较高的成熟度有关, 另一方面可能反映其源岩为泥质岩。从甾烷、孕甾烷和重排甾烷相对组成来看(图5), 无论是雅克拉凝析气田的凝析油, 还是塔河油田不同比重的各种原油, 均集中分布在很小的范围, 表明原油具有相似的母质来源。雅克拉两个原油的  $C_{29}$  甾烷 20S/(20S+20R) 都大于 0.55, 已达到平衡的终点值, 表明原油的成熟度较高, 为生油高峰及其之后的产物。

### (3) 芳烃色质特征

相对于原油的饱和和烃而言, 芳烃馏分组成复杂, 常受烃源岩沉积环境、有机质生源构成、成熟度以及油气运移和次生变化等多种因素的控制。对雅克拉气田两个原油芳烃馏分的检测表明, 原油的多环芳烃中, 萘、菲和硫蒽系列化合物占优势, 平均含量分别占到多环芳烃的 22.74%、37.84%和20.51%, 三芳甾烷含量较低。在三芳系列化合物中, 原油硫蒽含量明显偏高, 平均占到三芳系列化合物的68.80%, 显示了典型的海相原油的分布特征。

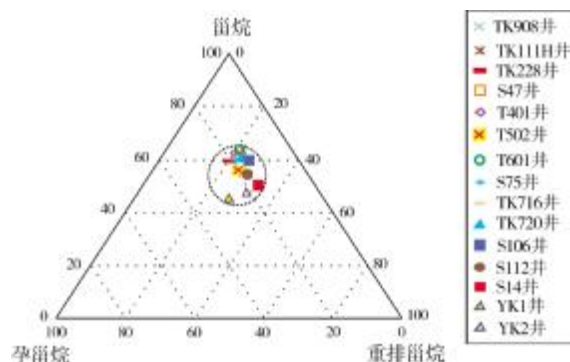


图5 雅克拉凝析气田和塔河油田原油甾烷、孕甾烷和重排甾烷组成三角图

## 3 油气成熟度估算

天然气的 $\delta^{13}C_1$ 主要受母质类型和成熟度的影响, 是进行天然气成因判别的一项重要地球化学指标。20世纪70年代以来, 国内外学者通过大量的研究, 先后提出了基于天然气碳同位素与其母质类型及演化程度的相关模式, 并以此来进行天然气的成因判别, 在天然气的成因研究中得到很好的应用。根据戴金星等<sup>[11]</sup>的油型气回归方程

$$\delta^{13}C_1 \approx 15.80 \lg R_o - 42.20$$

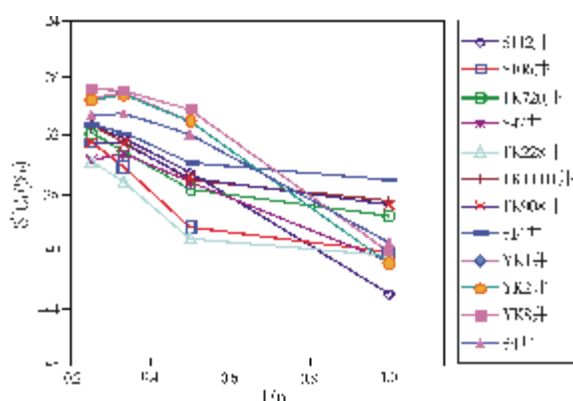
计算, 雅克拉气田 4 个天然气样品相应的  $R_o$  介于 1.22%~1.50%(平均 1.32%), 而根据沈平等<sup>[12]</sup>提出的油型气回归方程

$$\delta^{13}C_1 = 21.72 \lg R_o - 43.31$$

计算, 雅克拉气田天然气相应的  $R_o$  介于 1.30%~1.50%(平均 1.38%), 表明天然气处于高成熟阶段, 与其伴生液态烃为凝析油基本一致。天然气烃类气体碳同位素组成由 C—C 键断裂过程的动力学分馏效应控制, 受同位素平衡效应的影响较小。从理论上来说, 对于具有单一来源的天然气, 其烃类气体组分的  $\delta^{13}C_n$  与  $1/n$  之间呈线性关系<sup>[13]</sup>。在地质条件下, 由于成气地质营力较为复杂,  $\delta^{13}C_n$  与  $1/n$  之间多表现出准线性关系。由图 6 可见, 雅克拉凝析气田天然气  $\delta^{13}C_n$  与  $1/n$  之间具有很好的线性关系, 表明该区天然气是相同母质在单一外生营力作用下的产物, 与塔河油田主体天然气碳同位素分布曲线呈现两段模式存在着明显的差异。

长期以来, 原油的成熟度主要是根据原油中生物标志化合物的异构化参数来进行估算, 这些参数包括:  $C_{31}$ 升藿烷 22S/(22S+22R)、 $C_{29}$ 甾烷 20S/(20S+



图6 雅克拉气田天然气烃类组分  $1/n$  与  $\delta^{13}C_n$  关系图

20R)、 $C_{29}$ 甾烷 $\beta\beta/(\alpha\alpha+\beta\beta)$ 、 $Ts/(Tm+Ts)$ 、重排甾烷/规则甾烷、甲基菲指数以及二甲苯二苯并噻吩异构化参数(4,6-/1,4-DMDBT)等。但这些异构化参数在达到平衡后(如 $C_{31}$ 藿烷 $22S/(22S+22R)$ 在 $R_o=0.6\%$

左右达到平衡),不能提供进一步的成熟度信息,加之生物标志化合物参数受成熟度、油气运移距离以及次生变化等多种因素的控制,致使利用生物标志物进行高成熟阶段原油成熟度研究目前仍有一定难度<sup>[10,14]</sup>。在本次研究中,计算了多项表示原油成熟度的指标,包括 $C_{29}$ 甾烷的异构化参数和甲基菲指数( $MPI_1$ )以及甲基菲分布指数( $F_1$ 和 $F_2$ )等,并应用 $F_1$ 和 $MPI_1$ 与 $R_o$ 回归公式进行了原油成熟度的计算,结果发现,本区原油成熟度较高,为原油生烃高峰以后阶段的产物,其相应的 $R_o$ 为 $1.16\%\sim 1.20\%$ (表2),与原油为凝析油相态特征基本一致,也与伴生天然气的成熟度大致相当,揭示该区原油和天然气应为同阶段演化、同期充注的产物,而与沙雅隆起东段吉拉克、桑塔木以及塔河东区凝析油为正常原油遭受气侵而发生运移分馏作用形成的凝析油存在较大差异<sup>[15-16]</sup>。

表2 雅克拉原油的成熟度指标

井号	$Ts/(Ts+Tm)$	$C_{29}$ 甾烷 $20S/(20S+20R)$	$C_{29}$ 甾烷 $\beta\beta/(\alpha\alpha+\beta\beta)$	$MPI_1$	$MPI_2$	$F_1$	$F_2$	$R_o$
雅开1(YK1)	0.59	0.58	0.57	1.02	1.09	0.55	0.30	1.16
雅开2(YK2)	0.49	0.57	0.60	0.99	1.08	0.57	0.31	1.20

注:  $R_o$ 根据包建平<sup>[14]</sup>回归公式计算:  $R_o=2.598F_1-0.2749$ ;  $r^2=0.8836$ 。

## 4 结论

(1)雅克拉凝析气田天然气的 $\delta^{13}C_1$ 为 $-40.8\%\sim -39.4\%$ ,  $\delta^{13}C_2$ 为 $-32.0\%\sim -30.2\%$ ,  $\delta^{13}C_3$ 为 $-30.5\%\sim -28.9\%$ ,  $\delta^{13}C_1<\delta^{13}C_2<\delta^{13}C_3$ , 因此天然气为典型的油型气;

(2)从稀有气体同位素特征来看,雅克拉气田

天然气为典型的壳源成因,无幔源气的混入;氩同位素特征揭示其气源岩年代较老,应为早古生代;

(3)从原油及其族组分的碳同位素和生物标志化合物特征来看,雅克拉气田原油为典型的海相成因,与塔河油田原油具有相似的母质来源;

(4)雅克拉凝析气田油气同源、同阶,为一次油气充注的产物,与塔河油田存在较大的差异。

## 参考文献

- [1] 梁狄刚,顾乔元,皮学军. 塔里木盆地塔北隆起凝析气藏的分布规律[J]. 天然气工业, 1999, 18(3): 5-9.
- [2] 张士亚, 郜建军, 蒋泰然. 利用甲、乙烷碳同位素判识天然气类型的一种新方法[M]. 石油与天然气地质文集(第1集)——中国煤成气研究. 北京:地质出版社, 1988: 48-58.
- [3] 戴金星. 各类天然气的成因鉴别[J]. 中国海上油气(地质), 1992, 6(1): 11-19.
- [4] 徐永昌. 天然气成因理论及应用[M]. 北京:科学出版社, 1994: 84-222.
- [5] 徐永昌, 王先彬, 吴仁铭, 等. 天然气中稀有气体同位素[J]. 地球化学, 1979, (4): 271-282.
- [6] 刘文汇, 徐永昌. 天然气中氩同位素组成的意义[J]. 科学通报, 1993, 38(9): 818-821.
- [7] 沈平. 轻烃中碳、氢同位素组成特征[J]. 中国科学(B辑), 1993, 23(11): 1216-1226.
- [8] 高波, 刘文汇, 范明, 等. 塔河油田成藏期次的地球化学示踪研究[J]. 石油实验地质, 2006, 28(6): 276-280.
- [9] 朱扬明, 梅博文, 傅家谟, 等. 塔里木原油饱和烃生物标志物分布特征[J]. 江汉石油学院学报, 1997, 19(3): 14-29.
- [10] 皮特斯 K E, 莫尔多万 J M. 生物标志化合物——古代沉

- 积物和石油中分子化石的解释[M]. 姜乃黄,等,译. 北京:石油工业出版社,1995:178-187.
- [11] 戴金星,戚厚发. 鉴别煤成气和油型气等指标的初步探讨[J]. 石油学报,1985,6(2):31-38.
- [12] 沈平,徐永昌,王先彬,等. 气源岩和天然气地球化学特征及成气机理研究[M]. 兰州:甘肃科学技术出版社,1991.
- [13] Chung H M, Gormly J R, Squires R M. Origin of gaseous hydrocarbons in subsurface environments: Theoretical considerations of carbon isotope[J]. Chemical Geology, 1988, 71: 71-103.
- [14] 包建平,王铁冠,周玉琦,等. 甲基菲比值与有机质热演化的关系[J]. 江汉石油学院学报,1992,14(4):8-13.
- [15] 周兴熙. 塔里木盆地天然气形成条件及分布规律[M]. 北京:石油工业出版社,1998, 127-154.
- [16] 张水昌,梁狄刚,张宝民,等. 塔里木盆地海相油气的生成[M]. 北京:石油工业出版社,2004,161-298.

编辑:金顺爱

## Geochemical Characteristics of hydrocarbon in Yakela Gas Condensate Field, Tarim Basin

Gao Bo, Liu Wenhui, Zhang Dianwei, Fan Ming

**Abstract:** Geochemical analysis of hydrocarbon in Yakela Field shows that natural gas is characterized by dominant methane in content with a range of 79.13%~89.30% and by high content of heavy hydrocarbon with of average 9.67% and low dry coefficient ( $C_1/C_{1-5}$ ) of 0.89~0.92, which suggests it is a typical wet gas. Carbon isotopic values of heavy gaseous hydrocarbon in which  $\delta^{13}C_1$  is -40.8‰ ~ -39.4‰,  $\delta^{13}C_2$  is -32.0‰ ~ -30.2‰ and  $\delta^{13}C_3$  is -30.5‰ ~ -28.9‰ demonstrate that the gas is oil-prone. According to the chemical and carbon isotopic compositions of crude oil and the biomarker characteristics, the crude oil in the field derived from marine sources. The crude oil has been at high stage of maturity that is almost consistent with natural gas, which is inferred that both the oil and the gas are the products during one time of hydrocarbon-filling history so that the hydrocarbon in Yakela Condensate Field is distinct from that in Tahe oil Field.

**Key words:** Crude oil; Natural gas; Geochemistry; Hydrocarbon maturity; Yakela Gas Field; Tarim Basin

**Gao Bo:** male, Doctor, Senior Engineer. Add: Exploraton & Production Research Institute, SINOPEC, 31 Xueyuan Rd., Beijing, 100083 China