

DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2019070405

# 西湖凹陷 X 构造凝析油与蜡质油的形成机制

杨鹏程<sup>1</sup>, 李浩<sup>2</sup>, 刘峰<sup>1</sup>, 李倩<sup>1</sup>

1. 中国石油化工股份有限公司上海海洋油气分公司勘探开发研究院, 上海 200120  
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, 无锡 214126

**摘要:** X 构造的原油按照物性的差异主要分为两类: 第一类为凝析油, 具有密度低、含蜡量低的特点; 第二类为蜡质油, 具有密度中等、含蜡量高的特点。为了明确原油物性差异的原因, 对原油的地球化学特征进行了深入分析, 发现这两类原油的饱和烃色谱存在明显的差异, 但甾烷特征、萜烷特征以及碳同位素特征又比较相似, 表现出同源的特点, 推测次生作用是原油物性差异的主要原因。对这两类原油的轻烃色谱以及指纹参数进行了精细对比, 发现: ①凝析油和蜡质油的全烃色谱存在镜像关系; ②凝析油的庚烷/甲基环己烷(石蜡度)偏高, 甲苯/正庚烷(芳香度)偏低, 蜡质油则相反; ③凝析油和蜡质油的正构烷烃  $nC_{m+1}/nC_m$  存在协变关系, 且凝析油的数值更大。认为 X 构造原油遭受了气侵, 凝析油是蒸发分馏的产物, 而蜡质油则是蒸发分馏的残留油。

**关键词:** 凝析油; 蜡质油; 蒸发分馏; 西湖凹陷

**中图分类号:** P744.4, P618.130.1      **文献标识码:** A

## Formation mechanism of condensate oil and waxy oil in Structure X of Xihu Depression

YANG Pengcheng<sup>1</sup>, LI Hao<sup>2</sup>, LIU Feng<sup>1</sup>, LI Qian<sup>1</sup>

1. Institute of Exploration and Development, SINOPEC Shanghai Offshore Oil & Gas Company, Shanghai 200120, China  
2. Wuxi Petroleum Geology Research Institute of SINOPEC, Wuxi 214126, China

**Abstract:** Oil in the Structure X of the Xihu Depression can be divided into two groups based on the differences in physical properties. One is the condensate oil, which is characterized by low density and low wax content; and the other is the waxy oil, which is characterized by medium density and high wax content. Geochemical characteristics of crude oil were studied in details in order to define the causes of the differences. It is so obvious that there are great differences between condensate oil and waxy oil in saturated hydrocarbon chromatography characters. However, the characteristics of sterane, terpane, and carbon isotope of condensate oil are as the same as the waxy oil. It means that they come from same source, and secondary alteration is the real cause to the difference in physical properties. Detailed correlation of lighter hydrocarbon chromalogram and fingerprint parameters the two oils suggest the following: (1) There is a mirror image relationship of total hydrocarbon chromatography between condensate oil and waxy oil. (2) Condensate oil is characterized by high index of  $nC_7/MC_7C_6$  and low index of  $Tol/nC_7$ , whereas waxy oil shows an opposite pattern. (3) There are covariant relation of the index of  $nC_{m+1}/nC_m$  of N-alkanes between the condensate oil and the waxy oil, suggesting that oil has suffered from gas invasion. The condensate is the results of evaporative fractionation, and the waxy is the remainder.

**Key words:** condensate oil; waxy oil; evaporative fractionation; the Xihu Depression

凝析油是从凝析气田的天然气中凝析出来的液相组分, 主要由低碳数轻烃组成。从物理条件来讲, 凝析气藏的形成主要受温度、压力以及组分的影响, 其形成需要一定气油比的烃类体系以及较高的温度和压力<sup>[1-2]</sup>。凝析油气的形成机理和成因类型多样, 20 世纪 70 年代, Tissot 和 Welte<sup>[3]</sup> 提出了干酪根成烃演化模式, 认为凝析气的形成与烃源岩母

质类型和热演化程度有关。黄汝昌等<sup>[4]</sup> 提出了陆相或陆源有机质在热演化程度低到中等阶段, 也可生成大量凝析油, 或形成凝析气藏。因此, 在适当的温压和成藏条件下, 在不同的母质类型和不同的演化阶段都可以形成原生的凝析气藏。周兴熙等研究发现在油气运移、聚集和成藏过程中, 烃类体系分异、富化以及混合, 同样也可形成凝析气藏<sup>[5-6]</sup>。近

资助项目: 中国石油化工股份有限公司科技项目“西湖凹陷斜坡带油气成藏条件及目标评价”(KJ-2019-11)

作者简介: 杨鹏程(1988—), 男, 硕士, 工程师, 主要从事石油地质综合研究, E-mail: yangpch.shhy@sinopec.com

收稿日期: 2019-07-04; 改回日期: 2019-08-12. 蔡秋蓉编辑

年来,准噶尔盆地、琼东南盆地、塔里木盆地都发现了蒸发分馏型或者运移分馏型的次生凝析气藏<sup>[7-9]</sup>。

石油蜡是从石油中结晶析出的固态烃类混合物,由长链的( $>C_{16}$ )正构烷烃、异构烷烃、环烷烃和芳香烃组成,按照组分的不同又分为石蜡和地蜡<sup>[9-10]</sup>。对于蜡质的母源,目前认为陆源高等植物的蜡质、角质、孢粉质、低等水生生物的藻类体均可以生成高蜡石油<sup>[11-12]</sup>。研究显示蜡质油的形成既与母质类型有关,也与演化阶段以及次生作用有关<sup>[13-14]</sup>。

目前西湖凹陷斜坡带已发现的油气类型以凝析气(油)为主,也有正常的轻质油、中质油。对于凝析气藏的成因,傅宁<sup>[15]</sup>首次提出蒸发分馏效应是西湖凹陷凝析气藏的重要成因,认为气藏均为“蒸发分馏”作用形成的次生凝析气藏;此外,根据平北地区孔雀亭、宝云亭的油气性质和油气充注期次,单超<sup>[16]</sup>、苏奥等<sup>[17]</sup>认为混合和气侵作用是凝析气藏形成的重要机制,在向浅部运移的过程中随着温压条件变化凝析油析出,形成“上油下气”的格局,但这些研究均未涉及原油物性与蒸发分馏(气侵)作用的关系。对于X构造来讲,油气藏类型多样,包括凝析气藏、带油环的凝析气藏以及挥发油藏,且挥发油的含蜡量高,凝析油与蜡质油的形成机制与关系尚不清楚,本文从油气地球化学特征入手,分析了油气性质和油气来源,通过原油轻烃色谱以及指纹参数的精细对比,提出了凝析油和蜡质油的形成机制。

## 1 地质背景

西湖凹陷位于东海陆架盆地东北部,为新生代沉积凹陷,根据构造特征自西向东划分为保俶斜坡带、三潭深凹、中央背斜带、白堤深凹、东部断阶带共5个次级构造带。西湖凹陷新生代的构造演化主要经历了古新世—始新世的断陷期、渐新世—中新世的拗陷期、上新世以后的区域沉降3个阶段,具有先断后拗的演化特征。地层自上而下发育东海群、三潭组、柳浪组、玉泉组、龙井组、花港组、平湖组和宝石组。X构造位于保俶斜坡带中部的平北地区,平北地区受鼻隆构造和平湖主断裂的影响,具有“东西分带、南北分区”的构造格局。X构造以发育一系列西倾的反向断裂为特点,形成了多个反向断层控制的断鼻和断块,构成了典型的反向断阶半地堑型构造。

X构造目前主要有5口钻井(图1),均已钻遇油气层,油气成果丰富。油气主要富集在平湖组,

平中上段和平下段均能成藏。油气藏类型以构造—岩性复合油气藏为主。油气藏流体类型多样,有凝析气藏、带油环的凝析气藏以及油藏。

## 2 原油性质与来源

### 2.1 原油物理性质

原油的物理性质取决于生油母质、热演化程度以及次生变化因素,物理性质是化学组成的宏观表现<sup>[18]</sup>。根据原油物性的差异,X构造已发现原油主要包括两种类型(表1):第一类为凝析油,这类原油具有密度低、黏度低、含蜡量和凝固点低的特点;第二类原油为轻—中质油,这类原油具有密度、黏度较高,含蜡量和凝固点较高的特点,为中高蜡含量的蜡质油。整体来看,平面上从斜坡低部位到高部位,油气性质从凝析油过渡到凝析油、蜡质油共生;纵向上油气分布复杂,发育多个油藏、气藏以及带油环的凝析气藏,整体具有“上油下气”的特点。

### 2.2 饱和烃生物标志物特征

TIC总离子流图显示凝析油和蜡质油的正构烷烃特征不同,凝析油(图2a)表现出前峰型的特点,主峰碳为 $C_{15}$ ,高碳数的正构烷烃含量较低。蜡质油(图2b)表现出后峰型的特点,主峰碳为 $C_{23}$ ,高碳数的正构烷烃含量较高。二者均有明显的姥鲛烷优势,表明形成于弱还原—氧化的沉积环境。

从甾烷特征( $m/z=217$ )、萜烷特征( $m/z=191$ )以及二萜类特征( $m/z=123$ )来看,凝析油和蜡质油并未表现出明显的差别。藿烷系列( $m/z=191$ )检测到了奥利烷,表明原油具有高等植物生源;甾烷系列( $m/z=217$ )以 $C_{29}$ 规则甾烷为主,呈“√”型,表现出高等植物和低等生物均有贡献;二萜类化合物检测到了海松烷系列和扁枝烷系列,表明为裸子植物树脂来源<sup>[19]</sup>。凝析油甾烷异构化指数 $C_{29}\alpha\alpha\alpha 20S/20S+20R=0.46$ , $C_{29}\beta\beta/\beta\beta+\alpha\alpha=0.50$ ,说明凝析油为成熟原油;蜡质油甾烷异构化指数 $C_{29}\alpha\alpha\alpha 20S/20S+20R=0.46$ , $C_{29}\beta\beta/\beta\beta+\alpha\alpha=0.52$ ,成熟度与凝析油相当。

从凝析油和蜡质油饱和和色质谱来看,这两类原油均表现为高等植物来源为主的成熟原油,区别主要在于正构烷烃的分布形式,蜡质油以高碳数正构烷烃为主,这是其含蜡量高的主要原因。由于饱和和烃质谱特征反映了二者具有同源的特征,推测这两类原油的差异主要为次生作用形成。从其他井原油生标特征(图3)来看,凝析油和蜡质油的正构烷

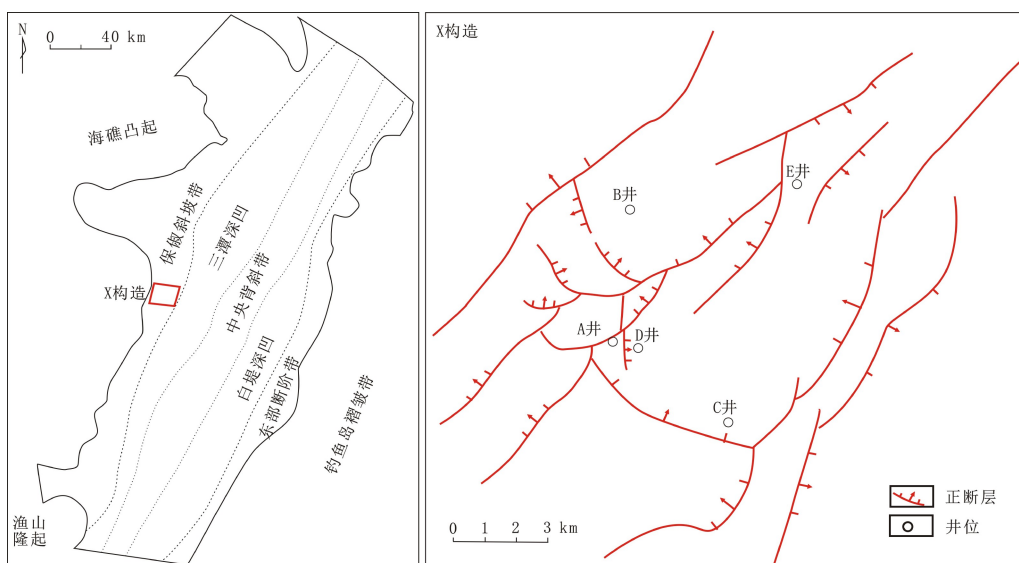


图 1 X 构造断裂分布与井位分布图  
Fig.1 Map of fault distribution and well locations on Structure X

表 1 X 构造原油物性特征  
Table 1 Character of oil properties in Structure X

井号	层位	性质	深度/m	密度 (20 °C) / (g/cm <sup>3</sup> )	动力黏度 (50 °C) / (mPa·s)	含蜡量 /%	凝固点 /°C
A	平湖组	蜡质油	3 594~3 603.6	0.88	2.13	26.81	16
B	平湖组	凝析油	3 499.8~3 505.6	0.80	0.96	3.36	-1
C	平湖组	凝析油	4 580~4 620	0.79	0.76	3.36	4
C	平湖组	凝析油	4 359~4 382	0.83	1.36	4.95	13
D	平湖组	凝析油	3 475	0.80	1.16	1.2	-9
D	平湖组	蜡质油	3 537	0.87	4.22	13.2	18
D	平湖组	蜡质油	3 614	0.86	3.25	13.7	18
D	平湖组	蜡质油	3 640.5	0.86	3.82	17.5	13
D	平湖组	蜡质油	3 743.5	0.86	4.72	12.7	17
D	平湖组	蜡质油	3 734.2~3 746.5	0.85	5.68	13	19
D	平湖组	凝析油	4 040~4 060	0.77	1.25	5.5	11
E	平湖组	蜡质油	4 212.5	0.86	3.18	9.5	18
E	平湖组	凝析油	4 508.4	0.84	2.45	0.6	9
E	平湖组	凝析油	4 634	0.83	2.26	0.7	—

烃分布也有明显的差别,但原油成熟度相近,具有同源的特征。

### 2.3 芳烃生物标志物特征

Radke 和 Welte 基于菲以及甲基菲异构体随成熟度的变化,提出了利用甲基菲指数计算原油成熟度,  $MPI1=1.5 \times [(3-MP)+(2-MP)]/[P+(1-MP)+(9-MP)]$ , 折算公式  $Rc=0.6 \times MPI1+0.64$  ( $0.6\% < Ro < 1.35\%$ )。

考虑到烃源岩母质类型可能对甲基菲指数计算有所影响,利用斜坡带自身平湖组烃源岩的  $Ro$  与甲基菲指数建立了新的折算公式,  $Rc=0.32MPI1+0.59$ 。利用该公式对原油的成熟度进行了计算(表 2),结果表明 X 构造原油均为成熟原油,成熟度  $Rc$  约为 1.0%,也与烃源岩热模拟实验生油高峰的  $Ro$  相对应<sup>[20]</sup>,因此,认为原油成熟度的计算结果是比较合理的。

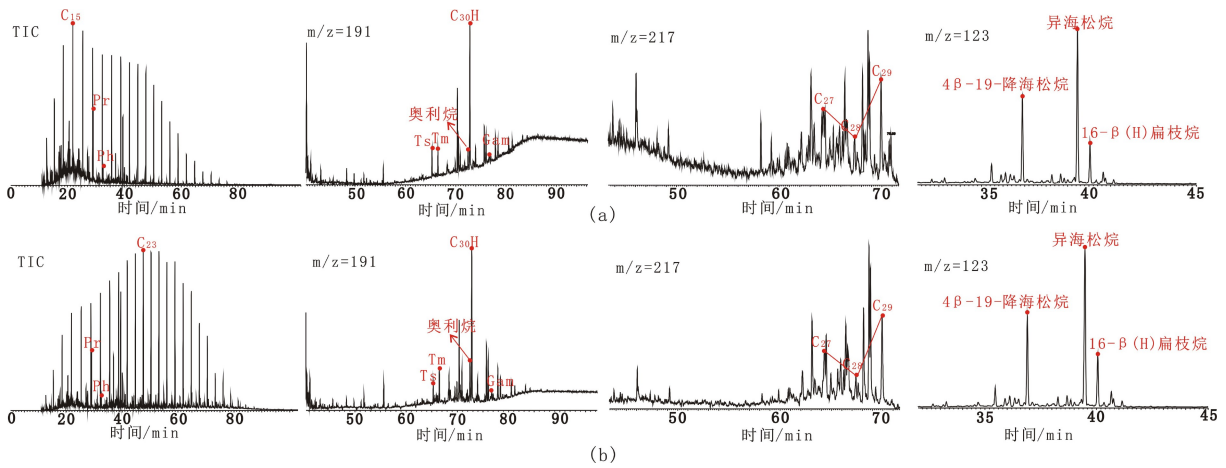


图2 X构造凝析油与蜡质油的生物标志物特征

a. D井3532m凝析油, b. D井3537m蜡质油

Fig.2 Biomarkers of condensate oil and waxy oil in Structure X

a. Condensate oil from Well D, at 3532 m, b. Waxy oil from Well D, at 3537 m

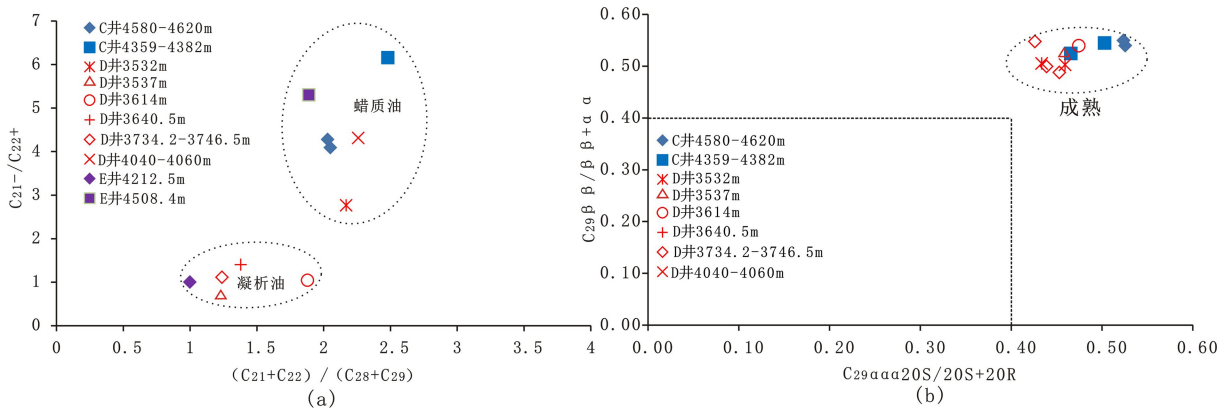


图3 X构造凝析油与蜡质油的生物标志物参数

a. 原油(C<sub>21</sub>+C<sub>22</sub>)/(C<sub>28</sub>+C<sub>29</sub>)与C<sub>21</sub>-/C<sub>22+</sub>交会图, b. 原油甾烷成熟度图版

Fig.3 Biomarker parameters of condensate oil and waxy oil in Structure X

a. Cross plot between (C<sub>21</sub>+C<sub>22</sub>)/(C<sub>28</sub>+C<sub>29</sub>) and C<sub>21</sub>-/C<sub>22+</sub>, b. Cross plot between C<sub>29</sub>ααα20S/20S+20R and C<sub>29</sub>ββ/ββ+α

表2 X构造原油成熟度计算

Table 2 Calculated values of oil maturity in Structure X

井号	层位	性质	深度/m	MPI1	Rc (Radke, 1983)	Rc (本次拟合)
A	平湖组	蜡质油	3594~3603.6	1.18	1.07	0.97
B	平湖组	凝析油	3499.8~3505.6	1.11	1.04	0.94
C	平湖组	凝析油	4580~4620	1.00	1.00	0.91
C	平湖组	凝析油	4359~4382	1.21	1.08	0.98
D	平湖组	凝析油	3475	0.98	0.99	0.90
D	平湖组	凝析油	3532	1.09	0.99	0.90
D	平湖组	蜡质油	3537	1.09	1.04	0.94
D	平湖组	蜡质油	3614	1.10	1.04	0.94
D	平湖组	蜡质油	3640.5	0.97	0.99	0.90
D	平湖组	蜡质油	3743.5	1.03	1.01	0.92



## 2.4 原油碳同位素特征

原油碳同位素是油源分析的重要指标,表 3 显示 X 构造原油碳同位素偏重,碳同位素为 $-27.31\%$ ~ $-25.9\%$ ,原油之间的碳同位素差异不大,凝析油和轻质油无明显的差别,在原油成熟度相似的情况下,推测原油来源相同。对比而言,X 构造原油的碳同位素值与东濮凹陷、冀中凹陷、四川盆地以及鄂尔多斯盆地的煤成油相当<sup>[21]</sup>,高于湖相原油。因

此,原油的形成可能有煤的贡献。

另外,西湖凹陷的原油检测出丰富的海松烷、扁枝烷等四环二萜类化合物,而这些化合物的生源主要为松科类植物的树脂,同样指示了煤的贡献。结合西湖凹陷已经证实煤有机质丰度高,有机显微组分壳质组含量相对较高,且以树脂体为主<sup>[20]</sup>,具有很好的生油潜力。综合推测原油主要来自于平湖组、宝石组的煤。

表 3 X 构造原油碳同位素特征  
Table 3 Carbon isotopes of crude oils in Structure X

井号	井深/m	性质	原油 $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}/\%$	饱和烃 $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}/\%$	芳烃 $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}/\%$	非烃 $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}/\%$	沥青质 $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}/\%$
C	4 580~4 620	凝析油	-26.2	-27.7	-24.8	—	—
C	4 359~4 382	凝析油	-25.9	-27.3	-24.5	—	—
D	3 475	凝析油	-27.31	-27.51	-27.39	-28.9	-28.28
D	3 532	凝析油	-27.25	-27.41	-27.97	-29.67	-28.12
D	3 537	蜡质油	-27.18	-28	-25.63	-26.44	-27.49
D	3 546	蜡质油	-26.96	-27.07	-26.38	-27.65	-27.5
D	3 614	蜡质油	-26.6	-27.63	-25.39	-26.06	-26.96
D	3 640.5	蜡质油	-26.77	-27.34	-25.22	-25.97	-26.93
D	3 743.5	蜡质油	-26.91	-27.37	-25.8	-26.2	-27.28
D	3 760	蜡质油	-27.24	-27.19	-26.75	-28.98	-27.98
D	3 780	蜡质油	-26.9	-27.16	-26.54	-27.85	-28.07

## 3 天然气性质与来源

### 3.1 天然气组分特征

X 构造天然气干燥系数均小于 0.95,主要为 0.85~0.93,表明天然气主要为湿气(图 4a)。X 构造平中上段(约 3 500 m)天然气相对干燥系数较高,大多都在 0.9 以上,可能具有更高的天然气成熟度。通过天然气中甲烷含量以及重烃含量的关系图(图 4b)来看,X 构造天然气为成熟的油气—高成熟的凝析气,其中 D 井平中上段重烃含量相对较低,天然气成熟度较高。

### 3.2 天然气碳同位素特征

戴金星提出了适用于湿气或湿气程度较大天然气的鉴别图版<sup>[22]</sup>,主要应用  $\delta^{13}\text{C}_1$ 、 $\delta^{13}\text{C}_2$ 、 $\delta^{13}\text{C}_3$  图版进行天然气成因的判别。利用图版(图 5)可以看出 X 构造天然气主要处于煤型气、油型气和混合气

区。比起本区煤成油来讲,天然气的同位素偏轻,表现出了混合气的特点,煤和泥岩可能都有贡献。对比而言,鄂尔多斯盆地上古生界煤成气的天然气碳同位素普遍偏重, $\delta^{13}\text{C}_1$  为 $-35\%$ ~ $-29\%$ <sup>[23]</sup>。

由于天然气  $\delta^{13}\text{C}_1$  随 Ro 增大而增大,Stahl、戴金星、沈平、刘文汇等先后建立了油型气以及煤型气的  $\delta^{13}\text{C}_1$ -Ro 的定量关系,并取得了良好的应用效果<sup>[24-25]</sup>。另外,胡惕麟利用模拟实验结果建立的天然气同位素差值与镜质体反射率回归方程,同样实现了对天然气成熟度的定量预测。应用戴金星、刘文汇以及胡惕麟的计算公式对 X 构造天然气的成熟度进行了计算,计算结果(表 4)显示不同公式的计算结果差别较大,按照戴金星和刘文汇对煤型气的计算公式可以得出天然气主要处于成熟阶段的结论,而利用胡惕麟的公式则认为天然气出于高成熟阶段。考虑到 X 构造主要为混合成因气,戴金星和刘文汇的煤型气计算结果可能偏小,并且西湖凹陷烃源岩模拟实验表明天然气大量生成阶段对应 Ro 大于 1.2,因此,认为胡惕麟公式的计算结果可能

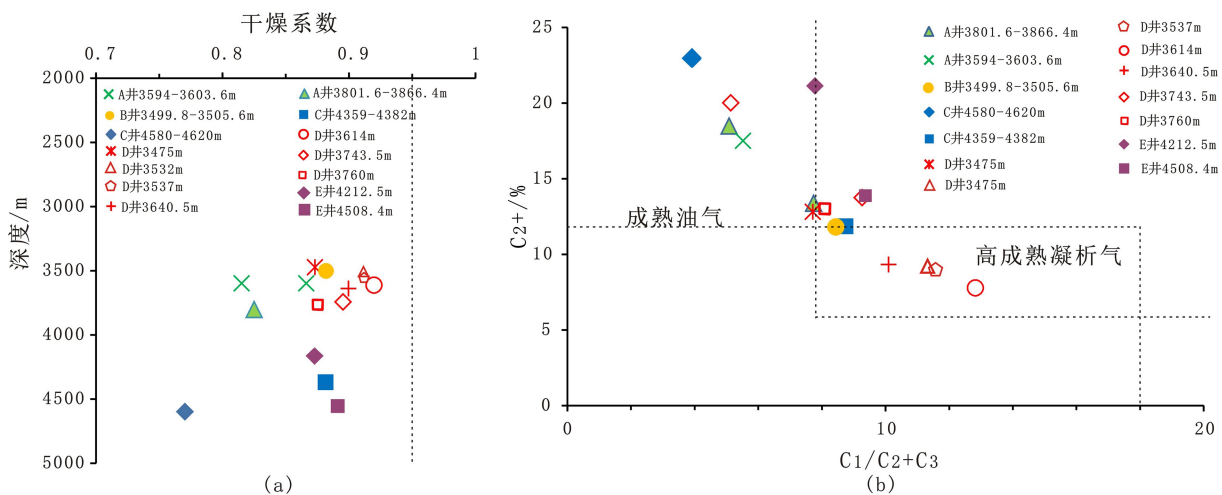


图4 X构造天然气组分特征

a. 干燥系数与深度关系, b.  $C_{2+}$ 与  $C_1/C_2+C_3$  交会图

Fig.4 Character of gas composition in Structure X

a. Cross plot between dry coefficient and depth, b. Cross plot between  $C_{2+}$  and  $C_1/C_2+C_3$

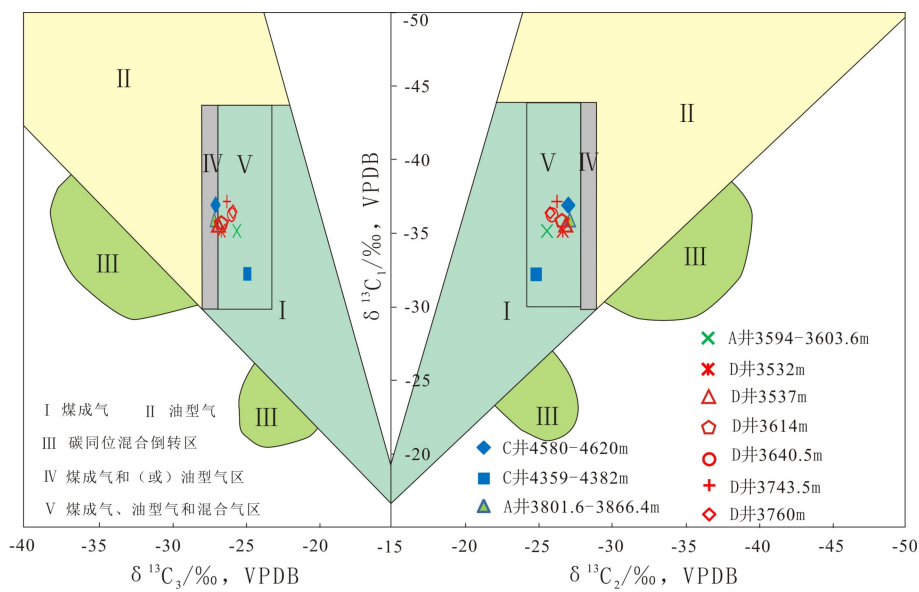


图5 X构造天然气成因判别(图版引自戴金星, 1992)

Fig.5 Origin of natural gas in Structur X(plates by Dai, 1992)

更符合实际, X构造天然气成熟度高于原油, 集中为1.4%~1.7%。

## 4 凝析油与蜡质油形成机制

### 4.1 蒸发分馏的轻烃证据

蒸发分馏(气侵分馏)效应是早期油藏中的原油与后期注入的高成熟天然气混合, 使得原油成分发生变化, 轻质组分更多的溶解到气相, 饱和轻组分的气体继续运移, 在较低温压条件下反凝析形成

凝析油的过程<sup>[26-27]</sup>。Thompson<sup>[28]</sup>研究认为蒸发分馏效应会随着分馏程度的增强导致残留油中的低碳数烃类含量降低, 高碳数烃类的相对含量增高, 而凝析油呈现相反的特征。同时, 分馏作用的最终结果会导致凝析油和残留油中的芳烃、环烷烃浓度增大。从图6凝析油和蜡质油的全烃色谱来看, 凝析油以低碳数的正构烷烃为主, 随着碳数的增高正构烷烃的相对含量逐渐降低, 而蜡质油的全烃谱明显表现出了完全相反的特征, 以高碳数正构烷烃为主, 分布形式与凝析油呈镜像关系。从图6原油的轻烃色谱可以看出, 无论是凝析油还是蜡质油都有

表 4 X 构造天然气成熟度计算  
Table 4 Calculated values of natural gas maturity in Structure X

井号	深度/m	CH <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	Rc1 (戴金星)	Rc2 (刘文汇)	Rc3 (胡惕麟)
C井	4 580~4 620	-36.9	-27.1	-25.1	0.66	0.88	1.56
C井	4 359~4 382	-32.2	-24.9	-24.5	1.43	1.31	1.83
B井	3 499.8~3 505.6	-35.74	-26.68	-25.56	0.80	0.91	1.66
B井	3 705.5~3 710.6	-36.13	-26.52	-28.18	0.75	0.91	1.72
A井	3 594~3 603.6	-35.13	-25.63	-23.64	0.89	0.97	1.58
A井	3 801.6~3 806.4	-35.88	-27.19	-24.8	0.78	0.92	1.64
D井	3 532	-35.15	-26.71	-24.50	0.88	0.96	1.66
D井	3 537	-35.36	-26.89	-24.71	0.85	0.94	1.66
D井	3 614	-35.63	-26.72	-24.61	0.82	0.92	1.63
D井	3 640.5	-36.23	-25.99	-23.70	0.74	0.90	1.51
D井	3 743.5	-37.13	-26.32	-23.70	0.64	0.87	1.45
D井	3 760	-36.44	-25.90	-23.34	0.72	0.90	1.48
D井	3 734.2~3 746.5	-36.59	-28.53	-25.91	0.70	0.89	1.68
D井	4 040~4 060	-39.92	-29.51	-27.29	0.41	0.76	1.50

计算公式: 戴金星:  $\delta^{13}C_1 \approx 14.12 \times \lg Ro - 34.39$ ; 刘文汇:  $\delta^{13}C_1 \approx 48.77 \times \lg Ro - 34.10$ , ( $Ro \leq 0.9$ ),  $\delta^{13}C_1 \approx 22.42 \times \lg Ro - 34.80$ , ( $Ro > 0.9$ ); 胡惕麟:  $Ro = (R_2 + R_3) / 2$ , 其中  $R_2 = -0.0891 (\delta^{13}C_2 - \delta^{13}C_1) + 2.4044$ ;  $R_3 = -0.0775 \times (\delta^{13}C_3 - \delta^{13}C_1) + 2.5024$ 。

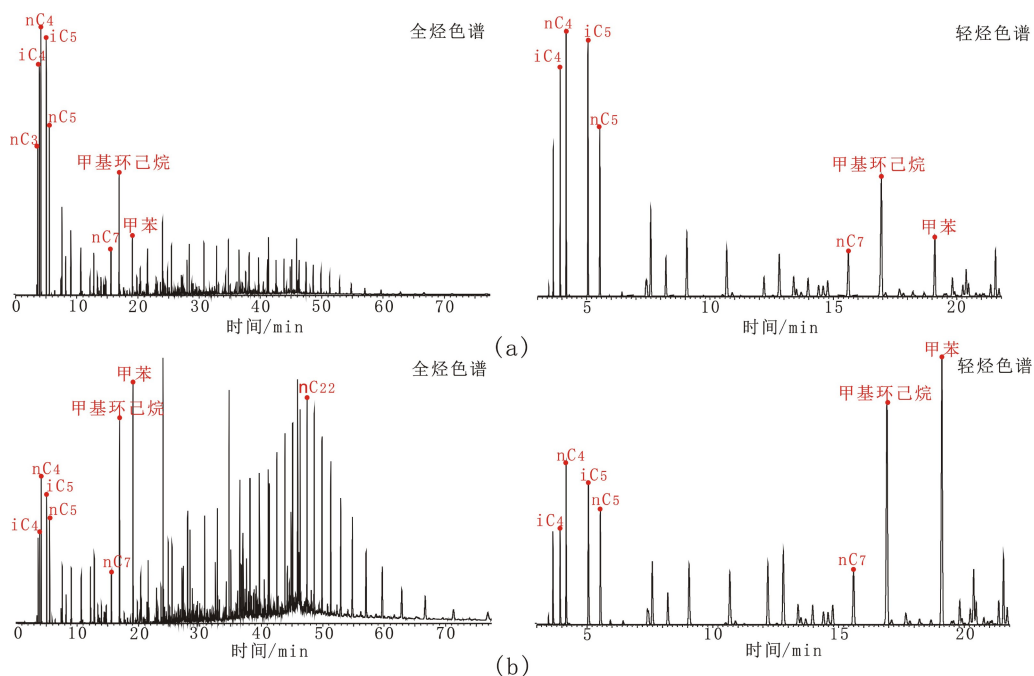


图 6 X 构造凝析油与蜡质油全烃及轻烃特征  
a. 4 040~4 060 m 凝析油, b. 3 734.2~3 746.5 m 蜡质油

Fig.6 Character of total hydrocarbon and light hydrocarbon of condensate oil and waxy oil in Structure X  
a. Condensate oil from Well D, 4 040~4 060 m, b. Waxy oil from Well D, 3 734.2~3 746.5 m

较高含量的甲基环己烷以及甲苯, 但凝析油仍然以低碳数正构烷烃为主。因此, 推测 X 构造的凝析油

为蒸发分馏效应产生的凝析油, 而蜡质油则为蒸发分馏效应的残留油。

基于蒸发分馏效应的影响, Thompson<sup>[28]</sup>提出了利用正庚烷/甲基环己烷(石蜡度)和甲苯/正庚烷(芳香度)比值图版进行分馏效应的判别,因为气洗作用会导致残留油中芳构化富集、正构化富集以及链烷烃贫化,所以残留油中石蜡度逐渐减小,芳香度逐渐增大,而凝析油则表现为相反的趋势。X构造的凝析油主要位于图版(图7a)的右下方,而蜡质油主要位于图版的左上方,符合蒸发分馏效应的作用。Kissin Y<sup>[29]</sup>指出,未发生次生改造的基态原油正构烷烃的摩尔分数的对数与其对应的碳原子数呈线性分布关系,经过气洗作用改造的原油其分布曲线则明显分为两部分:高碳数正构烷烃部分曲线仍能保持原有线性分布关系,气洗作用则造成低碳数正构烷烃部分线性曲线偏离。从图7b可以看出,蜡质油正构烷烃摩尔分数的对数与其对应的碳原子数分布明显分成两个部分,中低碳数的正构烷烃曲线明显偏离趋势。由于低碳数化合物在气相中的溶解度始终大于高碳数化合物,即同一次形成的凝析油中正构组分 $nC_m/nC_{m+1}$ 值必然大于残留油中的 $nC_m/nC_{m+1}$ 值,这种现象称为协变关系<sup>[30]</sup>。从图7c可以看出,凝析油和蜡质油的 $nC_7/nC_8$ 到 $nC_{23}/nC_{24}$ 数值有明显的协变关系,表现为凝析油比值明显高

于蜡质油。

## 4.2 蒸发分馏的地质过程

西湖凹陷发育宝石组和平湖组两套烃源岩层系,主要发育煤和暗色泥岩两种生烃物质,同时斜坡带低部位和三潭深凹均可向斜坡带供烃,具有多源供烃的特点。油气源对比结果表明原油主要来自于煤,且为成熟原油;天然气则是来煤和暗色泥岩来源的混源气,天然气成熟度高于原油,至少存在两期烃类充注。前人研究认为斜坡带油气存在两期充注<sup>[16-17]</sup>,第一期为中中新世,以油为主,第二期为中新世末—现今,以气为主。

X构造油气成藏过程概括如下:中中新世时期,X构造接受了第一期原油充注,主要为煤成油,形成早期的油藏;在中新世晚期开始,接受煤和泥岩生成天然气的大量充注,天然气充注到早期形成的油藏之后,受蒸发分馏效应的影响,油藏中的轻组分更多的溶解到天然气中,导致天然气石蜡度增大、芳香度减低。随着天然气的持续充注,蒸发分馏的天然气会继续向高部位运移,并继续对高部位的油藏进行气洗,纵向上形成多个带油环的凝析气藏。残余油由于轻组分损失严重从而形成高分子

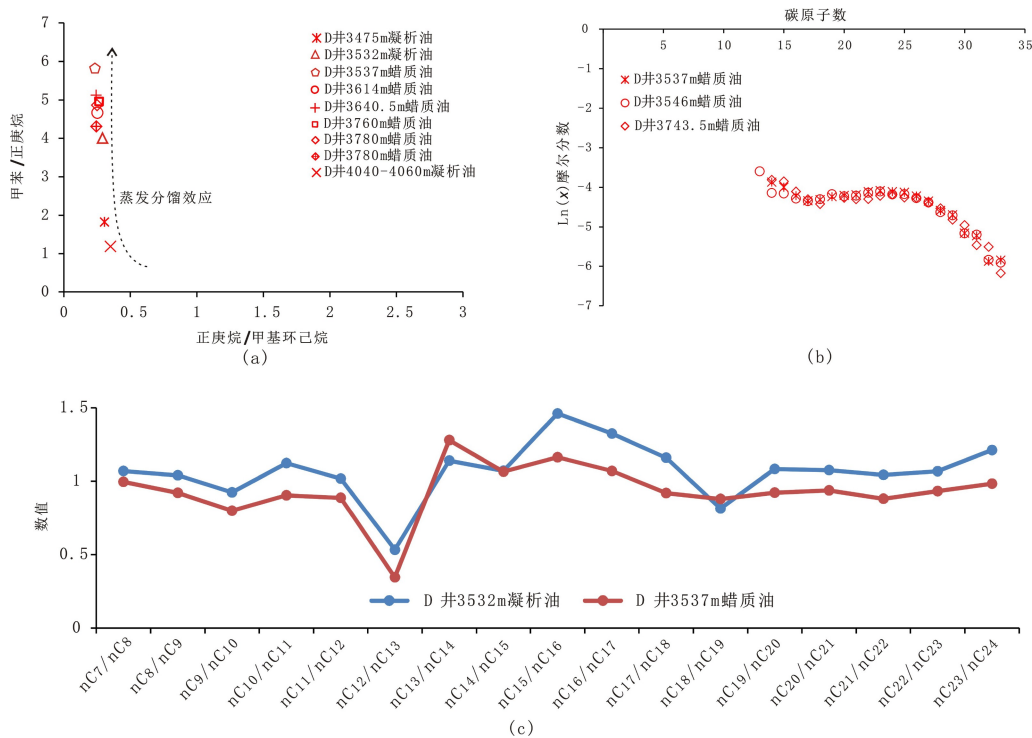


图7 X构造凝析油与蜡质油蒸发分馏效应

a. 正庚烷/甲基环己烷与甲苯/正庚烷交会图, b. 正构烷烃摩尔浓度与碳原子数关系图, c. 凝析油与蜡质油的正构烷烃组分协变关系

Fig.7 Evaporating fractionation effect of condensate oil and waxy oil in Structure X

a. Cross plot of  $nC_7/MC_7C_6$  and  $Tol/nC_7$ , b. Cross plot between molar concentration of n-alkanes and carbon number, c. Covariation relationships of n-alkanes of condensate oil and waxy oil



烃类富集的蜡质原油(图8)。

除了蒸发分馏作用外,油气在运移过程中还发生了运移分馏作用,饱和油的天然气在向上运移的过程中,随着温度、压力的降低,同样会发生相态的

转变,液态组分会逐渐析出,形成带油环的凝析气藏,继续向浅层运移会形成带气顶的油藏或纯油藏,这也是保俶斜坡整体“上油下气”格局的主要原因。

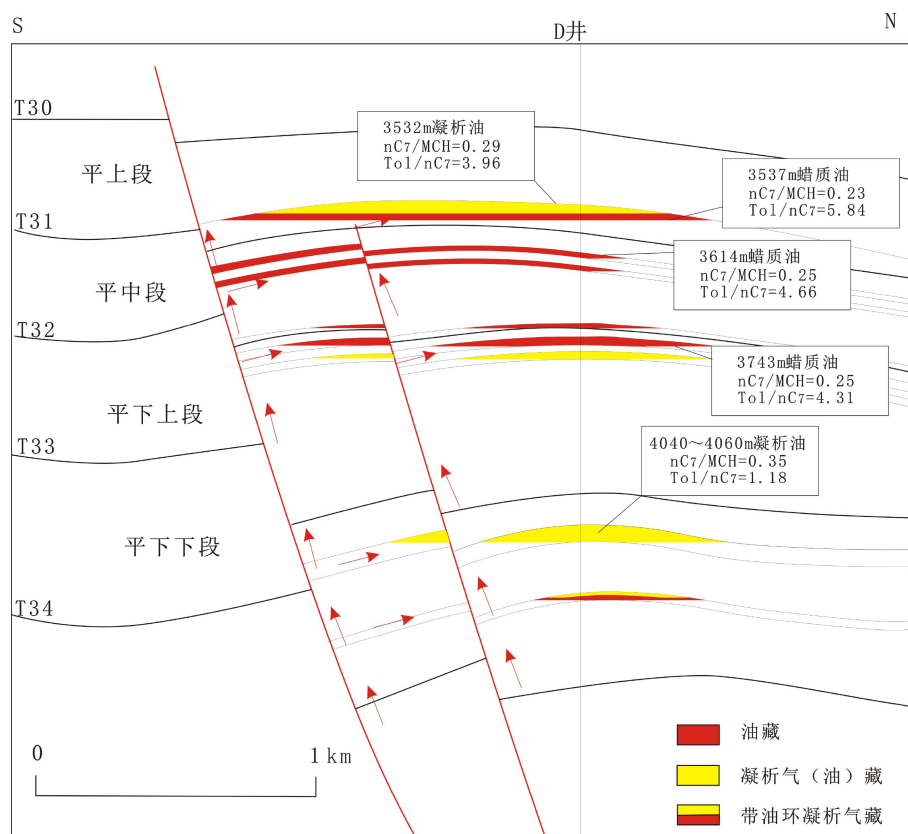


图8 X构造D井油气藏剖面

Fig.8 Oil and gas accumulation profile in Structure X

## 5 结论

(1) X构造原油按照物性可以分为两类,第一类为凝析油,具有密度、黏度及含蜡量低的特点,第二类为蜡质油,具有密度、黏度中等,含蜡量较高的特点。两类原油族组分均以饱和烃和芳烃为主,非烃及沥青质含量较低。

(2)凝析油和蜡质油的饱和烃色谱具有较大的差别,凝析油以前峰型为主,富含低碳数分子,蜡质油以后峰型为主,富含高碳数分子。但甾烷、二萜烷生标特征以及原油碳同位素都比较相似,推测为同源,主要来自于煤岩。

(3)天然气主要为湿气,组分碳同位素显示主要为油型气和煤型气的混源,主要来自于泥岩和煤。演化处于成熟油气—高成熟凝析气阶段,成熟度计算结果高于原油。

(4)通过两类原油的轻烃色谱对比,结合石蜡度—芳香度指数、正构烷烃摩尔浓度随碳数的变化以及正构烷烃组分比值的协变关系,认为X构造原油普遍遭受了气侵,凝析油是蒸发分馏作用的产物,蜡质油为蒸发分馏作用的残留油,并恢复了X构造的油气成藏过程,认为蒸发分馏和运移分馏共同形成了“上油下气”的油气分布情况。

## 参考文献 (References)

- [1] 陈义才, 沈忠民, 李延军, 等. 塔里木盆地轮南低隆凝析气藏特征及成藏机理分析[J]. 成都理工学院学报, 2002, 29(5): 481-486. [CHEN Yicai, SHEN Zhongmin, LI Yanjun, et al. Formation mechanism and formation conditions of condensate pools in Lunnan low-uplift of Tarim Basin [J]. Journal of Chengdu University of Technology, 2002, 29(5): 481-486.]
- [2] 武晓玲. 东濮凹陷深层凝析气藏成藏模式研究[D]. 中国地质大学(北京), 2006: 1-93. [WU Xiaoling, Study on forming models of deep

- condensate gas pool in Dongpu Depression [D]. Beijing: China University of Geosciences, 2006: 1-93.]
- [3] Tissot B P, Welte D H. Petroleum Formation and Occurrence [M]. New York: Springer Verlag, Heidelberg, 1978.
- [4] 黄汝昌. 中国低熟油及凝析气藏形成与分布规律 [M]. 北京: 石油工业出版社, 1997. [HUANG Ruchang. Formation and Distribution of Low Maturity Oil and Condensate Gas Reservoirs in China [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1997.]
- [5] 周兴熙. 塔里木盆地凝析气的相态成因 [J]. 天然气工业, 1996, 16 (2): 5-8, 100. [ZHOU Xingxi. Phase genesis of condensate gas in Talimu Basin [J]. Natural Gas Industry, 1996, 16 (2): 5-8, 100.]
- [6] 蒋有录, 常振恒, 鲁雪松, 等. 东濮凹陷古近系凝析气藏成因类型及其分布特征 [J]. 中国石油大学学报: 自然科学版, 2008, 32 (5): 28-34. [JIANG Youlu, CHANG Zhenheng, LU Xuesong, et al. Genetic types and distribution of paleogene condensate gas pools in Dongpu Depression [J]. Journal of China University of Petroleum, 2008, 32 (5): 28-34.]
- [7] 吴楠, 蔡忠贤, 杨海军, 等. 轮南低凸起气洗作用响应及定量评价 [J]. 地球科学—中国地质大学学报, 2009, 34 (3): 486-492. [WU Nan, CAI Zhongxian, YANG Haijun, et al. Quantitative evaluation and the geochemical responses of gas washing in Lunan Petroleum Province [J]. Earth Science—Journal of China University of Geosciences, 2009, 34 (3): 486-492.]
- [8] 黄合庭, 黄保家, 黄义文, 等. 南海西部深水区大气田凝析油成因与油气成藏机制——以琼东南盆地陵水17-2气田为例 [J]. 石油勘探与开发, 2017, 44 (3): 380-388. [HUANG Heting, HUANG Baojia, HUANG Yiwen, et al. Condensate origin and hydrocarbon accumulation mechanism of the deepwater giant gas field in Western South China Sea: A case study of Lingshui 17-2 gas field in Qiongdongnan Basin, South China Sea [J]. Petroleum Exploration and Development, 2017, 44 (3): 380-388.]
- [9] 苏洲, 张慧芳, 韩剑发, 等. 塔里木盆地库车坳陷中、新生界高蜡凝析油和轻质油形成及其控制因素 [J]. 石油与天然气地质, 2018, 39 (6): 1255-1269. [SU Zhou, ZHANG Hui Fang, HAN Jianfa, et al. Origin and controlling factors of Mesozoic-Cenozoic gas condensates with high wax content and high-gravity oil in Kuqa Depression [J]. Oil & Gas Geology, 2018, 39 (6): 1255-1269.]
- [10] 陈大钧. 油气田应用化学 [M]. 北京: 石油工业出版社, 2006: 308-310. [CHEN Dajun. Applied Chemistry in Oil and Gas Field [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2006: 308-310.]
- [11] Hedberg H D. Significance of high-wax oils with respect to genesis of petroleum [J]. AAPG Bulletin, 1968, 52 (5): 736-750.
- [12] 王飞宇, 郝石生, 何萍, 等. 泌阳凹陷湖相藻类体中藻质素作为高蜡油母质 [J]. 科学通报, 1997, 42 (11): 1193-1197. [WANG Feiyu, HAO Shisheng, HE Ping, et al. Alginin as parent material of high wax oil in lacustrine algae of Biyang Depression [J]. Chinese Science Bulletin, 1997, 42 (11): 1193-1197.]
- [13] 李素梅, 庞雄奇, 邱桂强, 等. 东营凹陷南斜坡特高蜡油的成因 [J]. 石油与天然气地质, 2005, 26 (4): 480-486. [LI Sumei, PANG Xiongqi, QIU Guiqiang, et al. Origin of superhigh wax content oils in southern slope zone of Dongying Depression [J]. Oil & Gas Geology, 2005, 26 (4): 480-486.]
- [14] 陈建平, 邓春萍, 王绪龙, 等. 准噶尔盆地南缘凝析油、蜡质油与稠油的形成机理 [J]. 中国科学: 地球科学, 2017, 60 (5): 972-991. [CHEN Jianping, DENG Chunping, WANG Xulong, et al. Formation mechanism of condensates, waxy and heavy oils in the southern margin of Junggar Basin, NW China [J]. Science China Earth Sciences, 2017, 60 (5): 972-991.]
- [15] 傅宁, 李友川, 陈桂华, 等. 东海西湖凹陷油气“蒸发分馏”成藏机制 [J]. 石油勘探与开发, 2003, 30 (2): 39-42. [FU Ning, LI Youchuan, CHEN Guihua, et al. Pooling mechanisms of “Evaporating Fractionation” of oil and gas in the Xihu Depression, East China Sea [J]. Petroleum Exploration and Development, 2003, 30 (2): 39-42.]
- [16] 单超, 叶加仁, 曹强, 等. 西湖凹陷孔雀亭气田成藏主控因素 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 2015, 35 (1): 135-144. [SHAN Chao, YE Jiaren, CAO Qiang, et al. Controlling factors for gas accumulation in Kongqueting gas field of Xihu Sag [J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2015, 35 (1): 135-144.]
- [17] 苏奥, 陈红汉. 东海盆地西湖凹陷宝云亭气田油气成藏史——来自流体包裹体的证据 [J]. 石油学报, 2015, 36 (3): 300-309. [SU Ao, CHEN Honghan. Accumulation history of Baoyunting gas field in the Xihu Sag, East China Sea Basin: from evidence of fluid inclusions [J]. Acta Petrolei Sinica, 2015, 36 (3): 300-309.]
- [18] 李水福, 何生, 张冬梅. 南阳凹陷高蜡原油的地球化学特征 [J]. 新疆石油地质, 2006, 27 (4): 414-418. [LI Shuifu, HE Sheng, ZHANG Dongmei. Organic geochemical characteristics of high wax oils in Nanyang Sag [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2006, 27 (4): 414-418.]
- [19] 傅宁. 东海盆地西湖凹陷煤系烃源岩及凝析油中的二萜化合物 [J]. 中国海上油气(地质), 1994, 8 (1): 21-28. [FU Ning. Diterpenoid compounds in coal measures and condensates in Xihu Sag of East China Sea Basin [J]. China Offshore Oil and Gas (Geology), 1994, 8 (1): 21-28.]
- [20] 钱门辉. 西湖凹陷煤系烃源岩生烃特征研究 [D]. 中国地质大学(北京), 2010. [QIAN Menhui. Model research of generation of hydrocarbon coal source rock in Xihu Depression [D]. Beijing: China University of Geosciences, 2010.]
- [21] 戴金星, 宋岩. 煤成油的若干有机地球化学特征 [J]. 石油勘探与开发, 1987, 14 (5): 38-45. [DAI Jinxing, SONG Yan. Some geochemical characteristics of the coaliferous oil [J]. Petroleum Exploration and Development, 1987, 14 (5): 38-45.]
- [22] 戴金星. 各类烷烃气的鉴别 [J]. 中国科学 B 辑, 1992, 22 (2): 185-193. [DAI Jinxing. Identification of alkane gases [J]. Science in China Series B: Chemistry, 1992, 22 (2): 185-193.]
- [23] 戴金星, 李剑, 罗霞, 等. 鄂尔多斯盆地大气田的烷烃气碳同位素组成特征及其气源对比 [J]. 石油学报, 2005, 26 (1): 18-26. [DAI Jinxing, LI Jian, LUO Xia, et al. Alkane carbon isotopic composition and gas source in giant gas fields of Ordos Basin [J]. Acta Petrolei Sinica, 2005, 26 (1): 18-26.]
- [24] 戴金星. 煤成气及鉴别理论研究进展 [J]. 科学通报, 2018, 63 (14): 1291-1305. [DAI Jinxing. Coal-derived gas theory and its discrimination [J]. Chinese Science Bulletin, 2018, 63 (14): 1291-1305.]

- [25] 叶军, 郭迪孝. 东海西湖凹陷天然气地化特征[J]. *石油实验地质*, 1996, 18(2): 174-181, 145. [YE Jun, GUO Dixiao. Geochemical characters of the natural gas in West Lake Depression, the East China Sea [J]. *Experimental Petroleum Geology*, 1996, 18(2): 174-181, 145.]
- [26] Meulbroek P, Cathles III L, Whelan J. Phase fractionation at South Eugene Island Block 330 [J]. *Organic Geochemistry*, 1998, 29(1-3): 223-239.
- [27] 黄海平, 张水昌, 苏爱国. 油气运移聚集过程中的地球化学作用[J]. *石油实验地质*, 2001, 23(3): 278-284. [HUANG Haiping, ZHANG Shuichang, SU Aiguo. Geochemical processes in petroleum migration and accumulation [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2001, 23(3): 278-284.]
- [28] Thompson K F M. Fractionated aromatic petroleums and the generation of gas-condensates [J]. *Organic Geochemistry*, 1987, 11(6): 573-590.
- [29] Kissin Y V. Catagenesis and composition of petroleum: Origin of *n*-alkanes and isoalkanes in petroleum crudes [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1987, 51(9): 2445-2457.
- [30] 申家年, 卢双舫. 气洗作用对油气组分影响的理论探讨[J]. *地球化学*, 2005, 34(2): 161-172. [SHEN Jianian, LU Shuangfang. Influence of gas washing on oil-gas composition [J]. *Geochimica*, 2005, 34(2): 161-172.]