

# 混源油色谱指纹定量判析及其勘探意义

——以高邮凹陷南部断裂带为例

叶绍东, 钱诗友, 李兴丽

(中国石化 江苏油田分公司 勘探开发研究院, 江苏 扬州 225009)

**摘要:**高邮凹陷南部断裂带油气主要来自古近系阜二段和阜四段源岩。选择典型端元油的混合配比实验表明,按不同比例配置的混源油,其色谱指纹参数与混油比例呈线性关系。对于二元混合的混源油,利用色谱指纹判别混合比例是行之有效的办法,其关键环节是色谱指纹峰的筛选。通过配比实验创建的混源油定量判析图版,能定量判别其混合比例,从而判别不同来源油的贡献大小以及油气运移路径。通过实际图版验证,许庄油田 X33 井、X5-5 井原油的阜四段来源油比例分别为 80% 和 30% 左右,方巷油田 F4-9 井、F5 井的阜四段来源油比例分别在 40% 和 10% 左右。南部断裂带具备较大的混源油勘探潜力,特别是高台阶具备以阜二段来源油为主的油气成藏条件,不仅可形成阜一段油藏,还有利于白垩系泰一段成藏。

**关键词:**混源油; 色谱指纹; 混源实验; 油气勘探; 高邮凹陷

中图分类号: TE122.1

文献标志码: A

## Quantification of chromatographic fingerprints of mixed crude oils and its exploration significance:

A case study of the southern fault zone in Gaoyou Sag

Ye Shaodong, Qian Shiyu, Li Xingli

(Exploration and Development Research Institute, SINOPEC Jiangsu Oilfield Company, Yangzhou, Jiangsu 225009, China)

**Abstract:** The discovered crude oils in the southern fault zone of Gaoyou Sag are binary mixtures mainly derived from the second and fourth members of the Funing Formation. An artificial mixing experiment of two typical end-member oils in the laboratory indicates that the chromatographic fingerprint of artificially mixed oil samples changes linearly with mixing proportions, so it is an effective method to quantify mixture proportions. An important key is to screen the fingerprint peaks. The application of a quantitative identification model created using an artificial oil mixing experiment can quantify the contribution of different oil sources and its migration path way. The model shows that the contribution rate of source rocks from the fourth member of Funing Formation is 80% in well X33, 30% in well X5-5, 40% in well F4-9, and 10% in well F5. Results indicate that the model has broad exploration applications for mixed crude oils in the southern fault zone of Gaoyou Sag. Source rocks from the second member of Funing Formation contribute more oil in the higher locations of the sag. Reservoirs are found in the first member of Funing Formation and the first member of Taizhou Formation.

**Key words:** mixed crude oils; chromatographic fingerprint; artificial oil mixing experiment; petroleum exploration; Gaoyou Sag

高邮凹陷位于苏北盆地东台拗陷中部,由南往北分为南部断裂带、深凹带、北斜坡 3 个构造带,其中受真①、真②大断层控制的南部断裂带,已发现方巷、许庄、邵伯等油田,含油层位主要包括白垩系的泰一段( $K_2t_1$ ),古近系的阜一段( $E_1f_1$ )、阜二段( $E_1f_2$ )、阜三段( $E_1f_3$ ),新近系的戴南组( $E_2d$ )和三

垛组( $E_2s$ )。高邮凹陷主要发育  $E_1f_2$  和  $E_1f_4$  2 套烃源岩,2 种不同来源的原油在生物标志物和气相色谱特征方面具有明显的差异,易于区分<sup>[1]</sup>。向南部断裂带供烃的烃源岩包括深凹带  $E_1f_4$  烃源岩和断裂带本地  $E_1f_2$  烃源岩,但断裂带本地  $E_1f_2$  烃源岩的供烃能力和贡献大小一直存在争议。南部断裂

带断层发育,油气沿断层运移聚集<sup>[2-4]</sup>,部分样品点原油地化特征介于 E<sub>1</sub>f<sub>2</sub> 来源油和 E<sub>1</sub>f<sub>4</sub> 来源油之间,具有混源油特征<sup>[5]</sup>。近年来,国内外许多学者在混源油方面进行了大量的研究,主要包括混源油的定性判识及混源比例的定量计算<sup>[6-8]</sup>,一般根据稳定碳同位素值和一些特殊生物标志化合物随混合比例的变化规律来确定混源比例<sup>[9-13]</sup>。色谱指纹作为定量分析手段在石油勘探与开发、石油化工、生物学等研究领域已广泛地应用,本研究通过典型端元油的混合配比实验,运用色谱指纹参数判断混源油的混合比例,并探讨这种方法的适用性。利用混源油定量判析图版可以判别许庄、方巷油田已钻井的混源比例,证实了南部断裂带本地 E<sub>1</sub>f<sub>2</sub> 烃源岩的供烃能力,为拓展勘探领域和深化油气成藏规律提供依据。

## 1 样品与实验

### 1.1 典型原油地球化学特征

高邮凹陷南部断裂带典型原油主要有 2 类: E<sub>1</sub>f<sub>2</sub> 来源油和 E<sub>1</sub>f<sub>4</sub> 来源油,2 类原油的饱和烃生物标志物及其相关参数的分布特征具有明显的差异<sup>[1,5]</sup>(表 1)。

E<sub>1</sub>f<sub>2</sub> 来源油特征:强植烷优势,Pr/Ph 一般小于 0.6, (Ph/nC<sub>18</sub>)/(Pr/nC<sub>17</sub>) 比值大,主峰碳 C<sub>22</sub>;一般含有较高丰度的 β-胡萝卜素, C<sub>30</sub> 藿烷/αααC<sub>29</sub>(20R) 比值低;规则甾烷含量 C<sub>29</sub>>C<sub>28</sub>>C<sub>27</sub>, αααC<sub>27</sub>(20R)/αααC<sub>29</sub>(20R) 一般小于 0.7。

表 1 高邮凹陷南部断裂带 2 类原油地球化学特征

Table 1 Geochemical characteristics of two crude oil samples from the southern fault zone of Gaoyou Sag

参数与化合物	E <sub>1</sub> f <sub>2</sub> 来源油	E <sub>1</sub> f <sub>4</sub> 来源油
主峰碳	C <sub>22</sub>	C <sub>23</sub> 或 C <sub>22</sub>
Pr/Ph	<0.6	>0.6
(Ph/nC <sub>18</sub> )/(Pr/nC <sub>17</sub> )	1.7~6	0.9~1.6
β-胡萝卜素	富	贫
αααC <sub>27</sub> (20R)/αααC <sub>29</sub> (20R)	<0.7	>0.7
C <sub>30</sub> 藿烷/αααC <sub>29</sub> (20R)	低	高
规则甾烷含量	C <sub>29</sub> >C <sub>28</sub> >C <sub>27</sub>	C <sub>29</sub> , C <sub>27</sub> >C <sub>28</sub>

E<sub>1</sub>f<sub>4</sub> 来源油特征:弱植烷优势至姥植均势, (Ph/nC<sub>18</sub>)/(Pr/nC<sub>17</sub>) 比值小,主峰碳 C<sub>23</sub> 或 C<sub>22</sub>; β-胡萝卜素含量低, C<sub>30</sub> 藿烷/αααC<sub>29</sub>(20R) 比值较大;规则甾烷 C<sub>27</sub>、C<sub>28</sub>、C<sub>29</sub> 呈现典型的“V”型分布, C<sub>29</sub> 和 C<sub>27</sub>>C<sub>28</sub>, αααC<sub>27</sub>(20R)/αααC<sub>29</sub>(20R) 一般大于 0.7。

### 1.2 端元油的选择

根据高邮凹陷南部断裂带构造特征,分别在许庄、方巷油田优选 X38 井、C13 井、F6 井、S20 井作为端元油,其中 X38 井、F6 井为 E<sub>1</sub>f<sub>2</sub> 来源油的端元油, S20 井、C13 井为 E<sub>1</sub>f<sub>4</sub> 来源油的端元油(图 1)。端元油具有典型 E<sub>1</sub>f<sub>2</sub> 和 E<sub>1</sub>f<sub>4</sub> 来源油的特征(表 2)。

### 1.3 实验方法

以许庄油田 C13 井、X38 井为第一组,2 种端元油分别按照 1:9, 2:8, 3:7, 4:6, 5:5, 6:4, 7:3, 8:2, 9:1 混合配比,得到 9 种混源油样品(样品编号 C13:X38-1—C13:X38-9),对端元油及配比的混源油样品进行全烃气相色谱分析;方巷油田 S20 井、F6 井为第二组,同样按照 1:9, 2:8, 3:7, 4:6, 5:5, 6:4, 7:3, 2:8, 1:9 混合配比进行实验(样品编号 S20:F6-1—S20:F6-9)。另外,选取许庄油田 X33、X5-5 井和方巷油田 F4-9、F5 井作为研究样本点。

全烃气相色谱分析:HP6890N 气相色谱仪, HP-PONA 毛细柱, 0.23 mm×50 m, 膜厚 0.5 μm, 初始温度 50 °C, 恒温 3 min, 以 5 °C/min 速率升温至 300 °C 后恒温 25 min, 氮气流速为 1.0 mL/min, 进

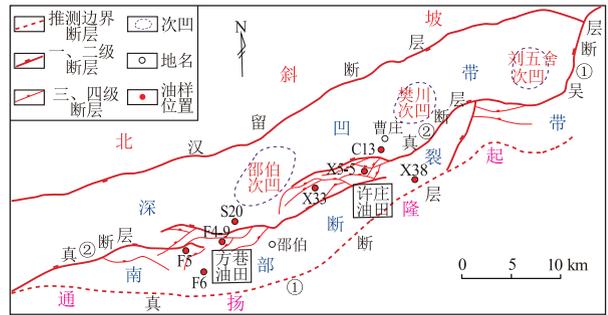


图 1 高邮凹陷构造纲要及样品位置

Fig.1 Tectonic sketch map and location of crude oil samples in the Gaoyou Sag

表 2 高邮凹陷端元油生物标志物参数

Table 2 Biomarker parameters of end-member crude oil samples from the Gaoyou Sag

井号	深度/m	层位	1	2	3	4	5	6	7	8	9
X38	3 019~3 080	E <sub>1</sub> f <sub>2</sub>	C <sub>22</sub>	0.37	2.72	1.05	0.26	0.29	0.46	0.56	0.38
F6	1 077.4~1 079.4	E <sub>1</sub> f <sub>2</sub>	C <sub>22</sub>	0.53	1.80	1.07	0.27	0.30	0.43	0.63	0.28
C13	3 119.4~3 436	E <sub>2</sub> d <sub>1</sub>	C <sub>22</sub>	0.76	1.23	2.77	0.42	0.27	0.31	1.37	0.51
S20	3 611.5~3 621.3	E <sub>2</sub> d <sub>1</sub>	C <sub>23</sub>	0.73	1.32	2.65	0.41	0.21	0.37	1.11	0.45

注:1. 主峰碳; 2. Pr/Ph; 3. (Ph/nC<sub>18</sub>)/(Pr/nC<sub>17</sub>); 4. C<sub>30</sub> 藿烷/αααC<sub>29</sub>(20R); 5. C<sub>27</sub>; 6. C<sub>28</sub>; 7. C<sub>29</sub>; 8. αααC<sub>27</sub>(20R)/αααC<sub>29</sub>(20R); 9. SM: αααC<sub>29</sub>[20S/(20S+20R)]。

样温度 300 ℃, FID 检测器温度为 300 ℃。

## 2 混源油色谱指纹特征

气相色谱分离技术能有效地对混合物中不同痕量的化合物进行分离并对不同组分进行定量, 采用气相色谱分析技术, 利用色谱指纹峰进行混源油的对比分析。色谱指纹峰是指正构烷烃之间相对丰度不同、化合物定性有一定困难的相对细小的色谱峰。为便于比较, 将正构烷烃之间的色谱峰进行系统编号, 为消除实验的系统误差, 选择相邻或相近的指纹峰组成指纹峰对, 用指纹峰对的比值作为色谱指纹参数用于对比分析。

原油中并非所有色谱指纹都能用于对比分析, 必须具有可配比性, 即色谱指纹参数具有随混合比例呈线性变化的规律。色谱指纹的可配比性不仅取决于化合物的性质和化合物的色谱分离度, 而且还与化合物的浓度、定量方法以及原油的地质背景等因素有关<sup>[14]</sup>, 且低碳数色谱指纹峰具有更好的对比性<sup>[15]</sup>。气相色谱峰的提取遵循 4 个原则: (1) 剔除正构烷烃峰, 保留特有峰; (2) 不同来源油

目的峰应具备差异性; (3) 相同来源油目的峰应具备同一性; (4) 配比油样中目的峰应具备可配比性。本次研究, 共选取了  $nC_6-nC_{13}$  之间 25 个单色谱峰, 将选取的目的峰进行归一化处理, 最后得到 11 对归一化峰对 (图 2)。对实验配置的 2 组样品和研究区混源油样品进行全烃气相色谱指纹分析, 统计 11 对指纹峰色谱指纹参数 (表 3)。

利用指纹峰对绘制色谱指纹对比图 (图 3), 从

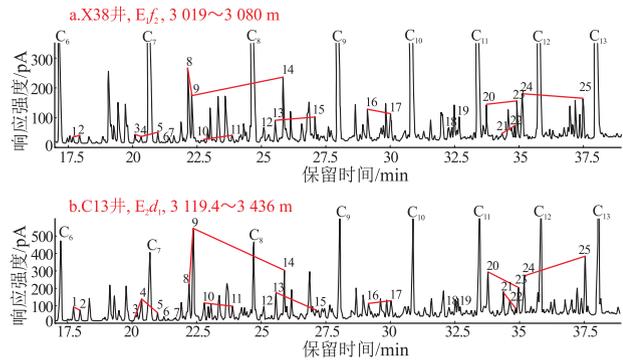


图 2 高邮凹陷典型色谱指纹峰对筛选

Fig.2 Screening of typical chromatographic fingerprint peaks of samples from the Gaoyou Sag

表 3 高邮凹陷色谱指纹参数统计

Table 3 Chromatographic fingerprint parameters of artificial mixing samples and mixed crude oils from the Gaoyou Sag

样品	来源油比例 ( $E_{1f4} : E_{1f2}$ )	归一化色谱指纹峰对										
		1/2	3/4	4/5	8/9	9/14	10/11	13/15	16/17	20/23	21/22	24/25
X38	0 : 10	1.00	0.09	1.00	0.22	1.00	0.86	0.83	0.68	0.96	0.62	0.44
C13; X38-1	1 : 9	0.97	0.11	0.93	0.18	0.88	0.85	0.67	0.71	0.92	0.51	0.45
C13; X38-2	2 : 8	0.92	0.10	0.81	0.24	0.91	0.86	1.00	0.73	0.97	0.32	0.48
C13; X38-3	3 : 7	0.89	0.14	0.77	0.29	0.82	0.82	0.74	0.77	0.85	0.38	0.47
C13; X38-4	4 : 6	0.85	0.16	0.66	0.34	0.72	0.80	0.62	0.80	0.82	0.34	0.49
C13; X38-5	5 : 5	0.80	0.18	0.59	0.38	0.65	0.78	0.50	0.82	0.79	0.29	0.51
C13; X38-6	6 : 4	0.74	0.23	0.51	0.44	0.59	0.75	0.40	0.87	0.74	0.23	0.55
C13; X38-7	7 : 3	0.64	0.55	0.39	0.46	0.53	0.69	0.39	0.90	0.80	0.44	0.61
C13; X38-8	8 : 2	0.61	0.38	0.35	0.62	0.45	0.40	0.28	0.93	0.63	0.15	0.63
C13; X38-9	9 : 1	0.54	0.35	0.27	0.75	0.38	0.31	0.24	0.96	0.58	0.12	0.69
C13	10 : 0	0.45	1.00	0.18	1.00	0.30	0.17	0.20	1.00	0.53	0.07	0.76
F6	0 : 10	0.79	0.16	0.47	0.39	0.62	0.98	0.31	0.83	0.63	0.25	0.65
S20; F6-1	1 : 9	0.76	0.17	0.45	0.40	0.58	0.94	0.29	0.83	0.64	0.21	0.67
S20; F6-2	2 : 8	0.72	0.05	0.42	0.39	0.56	0.91	0.31	0.86	0.94	1.00	0.89
S20; F6-3	3 : 7	0.72	0.22	0.46	0.44	0.50	0.87	0.24	0.85	0.58	0.13	0.68
S20; F6-4	4 : 6	0.69	0.24	0.43	0.46	0.46	0.80	0.22	0.85	0.57	0.13	0.68
S20; F6-5	5 : 5	0.64	0.26	0.40	0.48	0.44	0.76	0.21	0.86	0.57	0.13	0.69
S20; F6-6	6 : 4	0.58	0.33	0.31	0.44	0.23	0.74	0.18	0.96	1.00	0.92	1.00
S20; F6-7	7 : 3	0.54	0.41	0.32	0.54	0.38	0.34	0.19	0.87	0.58	0.13	0.72
S20; F6-8	8 : 2	0.37	0.48	0.29	0.57	0.36	0.28	0.18	0.87	0.60	0.13	0.73
S20; F6-9	9 : 1	0.42	0.56	0.24	0.55	0.39	0.23	0.17	0.90	0.69	0.26	0.76
S20	10 : 0	0.32	0.90	0.21	0.64	0.31	0.15	0.16	0.87	0.56	0.12	0.74
X33		0.63	0.31	0.32	0.62	0.40	0.46	0.33	0.88	0.54	0.19	0.71
X5-5		0.83	0.09	0.56	0.21	0.85	0.90	0.71	0.84	0.74	0.30	0.54
F4-9		0.86	0.28	0.40	0.58	0.41	0.92	0.28	0.90	0.50	0.15	0.71
F5		0.83	0.13	0.39	0.32	0.54	1.00	0.30	0.83	0.72	0.19	0.65

注: 归一化色谱指纹峰对见图 2。

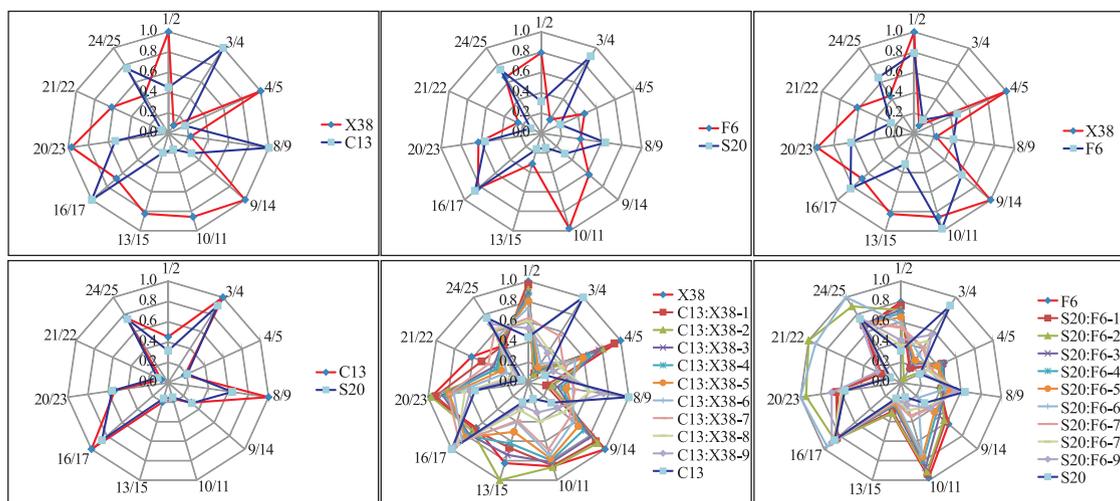


图3 高邮凹陷端元油与人工配比混源油色谱指纹对比

Fig.3 Correlation of chromatographic fingerprints between end-member crude oils and artificial mixing samples from the Gaoyou Sag

图3中可以看出,2组实验样品中,不同来源端元油指纹峰对的对比性好,相同来源端元油指纹峰对相似程度高;按不同比例配置的混源油,其指纹差异明显,不同指纹峰对的参数随混油比例增加时呈良好的线性关系,且第一组实验数据(许庄油田)规律性好于第二组(方巷油田)。分析原因,第一组实验中,端元油之间色谱指纹差异明显,配比实验过程中,混合油色谱指纹参数变化规律性也越明显。

利用色谱指纹技术的关键在于指纹峰的筛选。高邮凹陷南部断裂带的  $E_{1f_2}$  来源油和  $E_{1f_4}$  来源油,其演化阶段相近、热演化程度基本相同,原油成熟度差异小,对于这种简单的二元混合时,用于对比的指纹峰筛选相对简单,利用色谱指纹判别混合比例是行之有效的办法。同时,与利用生物标志化合物判识混源油的结果进行比较,结论差异很小,证实这种方法的可行性。这一技术减少了质谱定性分析环节,降低了技术难度和分析成本,具有快速、经济的特点。但对于多源多期油气混源时,实验和计算的复杂度要复杂得多<sup>[16-18]</sup>,利用色谱指纹判别混合比例的适用性有待进一步研究。

### 3 混源油定量判析

将许庄油田 X33 井、X5-5 井的样品色谱指纹与实验数据对比,X33 井与 C13 和 X38 井 2 种端元油按照 8 : 2 混合后的原油指纹差异最小;X5-5 井与 C13 和 X38 井 2 种端元油按照 3 : 7 混合后的原油指纹差异最小,即 X33 井、X5-5 井原油的  $E_{1f_4}$  来源油比例分别为 80% 左右和 30% 左右。同样将方巷油田 F4-9 井、F5 井的色谱指纹与实验数据对比,F4-9 井与 S20 和 F6 井 2 种端元油按照 4 : 6 混

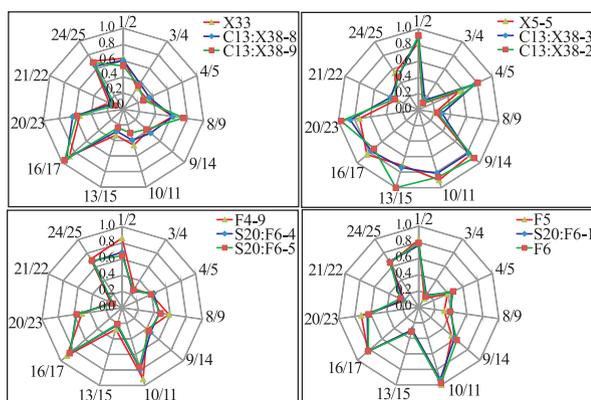


图4 高邮凹陷混源油定量判别

Fig.4 Quantitative identification for mixed crude oil samples from the Gaoyou Sag

合后的原油指纹差异最小;F5 井与 S20 和 F6 井 2 种端元油按照 1 : 9 混合后的原油指纹差异最小,即 F4-9 井、F5 井的  $E_{1f_4}$  来源油比例分别为 40% 左右和 10% 左右(图4)。

结合许庄、方巷油田构造特征分析,靠近深部带的混源油以  $E_{1f_4}$  来源油所占的比例大,沿油气运移方向,由低台阶到高台阶,在南部断裂带构造高部位,  $E_{1f_4}$  来源油所占的比例越来越小,  $E_{1f_2}$  来源油所占的比例则越来越大。总体看来,南部断裂带具备较大的混源油勘探潜力,特别是高台阶具备以  $E_{1f_2}$  来源油为主的油气成藏条件,不仅可形成  $E_{1f_1}$  油藏,还有利于  $K_2t_1$  成藏(图5)。

### 4 结论

(1)高邮凹陷南部断裂带混源油主要由  $E_{1f_2}$  来源油和  $E_{1f_4}$  来源油的混合,对于二元混合时,利用色谱指纹判别混合比例是行之有效的办法,技术

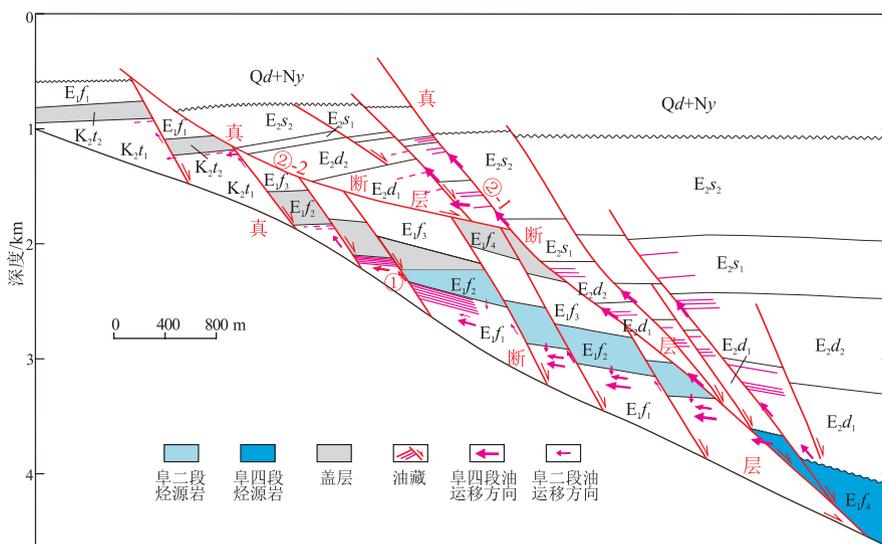


图 5 高邮凹陷南部断裂带油气运聚模式

Fig.5 Hydrocarbon accumulation model of the southern fault zone in Gaoyou Sag

关键色谱指纹峰的筛选。

(2) 高邮凹陷南部断裂带本地  $E_{1f_2}$  烃源岩具有较好的供烃能力,通过混源油定量判析图版判断:X33 井、X5-5 井原油的  $E_{1f_4}$  来源油比例分别为 80% 和 30% 左右,F4-9 井、F5 井的  $E_{1f_4}$  来源油比例分别为 40% 和 10% 左右。沿油气运移方向,由低台阶到高台阶, $E_{1f_4}$  来源油所占的比例越来越小, $E_{1f_2}$  来源油所占的比例则越来越大。

(3) 高邮凹陷南部断裂带具备较大的混源油勘探潜力,特别是高台阶具备以  $E_{1f_2}$  来源油为主的油气成藏条件,不仅可形成  $E_{1f_1}$  油藏,还有利于  $K_{2t_1}$  成藏。

参考文献:

[1] 陈安定. 苏北盆地油源判别指标研究[J]. 石油实验地质, 2007, 29(4): 397-401.  
Chen An ding. Research on indicators of oil-source correlation in the Subei Basin [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2007, 29(4): 397-401.

[2] 李学慧. 高邮凹陷南断阶断层活动对油气成藏的控制[J]. 新疆石油地质, 2008, 29(6): 719-721.  
Li Xuehui. The control effect of fault activity on hydrocarbon accumulation in south terrace of Gaoyou Sag [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2008, 29(6): 719-721.

[3] 程国峰, 宋全友, 李宝钢. 高邮凹陷南断阶油气成藏模式[J]. 西部探矿工程, 2009, 21(4): 106-110.  
Cheng Guofeng, Song Quanyou, Li Baogang. Hydrocarbon accumulation mode in south terrace of Gaoyou sag [J]. West-China Exploration Engineering, 2009, 21(4): 106-110.

[4] 吴向阳, 李宝钢. 高邮凹陷油气运移特征研究[J]. 中国石油大学学报: 自然科学版, 2006, 30(1): 22-25.  
Wu Xiangyang, Li Baogang. Oil and gas migration characteristics

in Gaoyou depression [J]. Journal of China University of Petroleum; Edition of Natural Science, 2006, 30(1): 22-25.

[5] 李兴丽, 张秀文, 王骏, 等. 高邮凹陷南断阶许庄地区阜宁组原油油源分析[J]. 复杂油气藏, 2013, 6(4): 20-23.  
Li Xingli, Zhang Xiuwen, Wang Jun, et al. Oil sources analysis of Funing Formation in the south fault zone of Gaoyou Sag in Xuzhuang area [J]. Complex Hydrocarbon Reservoirs, 2013, 6(4): 20-23.

[6] 李水福, 何生, 张刚庆, 等. 混源油研究综述[J]. 地质科技情报, 2008, 27(1): 77-79, 88.  
Li Shuifu, He Sheng, Zhang Gangqing, et al. Review of mixed crude oils [J]. Geological Science and Technology Information, 2008, 27(1): 77-79, 88.

[7] 周妮, 王海静, 柯贵贤, 等. 室内配比混源油地球化学特征研究[J]. 天然气勘探与开发, 2009, 32(3): 4-7.  
Zhou Ni, Wang Haijing, Ke Xiangui, et al. Geochemical characteristics of proportional mixed oil [J]. Natural Gas Exploration and Development, 2009, 32(3): 4-7.

[8] 李素梅, 庞雄奇, 杨海军. 混源油气定量研究思路与方法[J]. 地质科技情报, 2009, 28(1): 75-81.  
Li Sumei, Pang Xiongqi, Yang Haijun. Approaches and techniques for quantitative prediction of mixed oils [J]. Geological Science and Technology Information, 2009, 28(1): 75-81.

[9] 梁宏斌, 张敏, 王东良, 等. 冀中坳陷苏桥—文安地区混源油定量识别模式研究: 典型原油混合实验及混源油识别模式[J]. 沉积学报, 2004, 22(4): 689-693.  
Liang Hongbin, Zhang Min, Wang Dongliang, et al. Quantitative identification model of mixed oils from Suqiao—Wenan area in Jidong depression: mixed experiment of typical oils and identification model of mixed oils [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2004, 22(4): 689-693.

[10] 李素梅, 庞雄奇, 姜振学, 等. 东营凹陷岩性油气藏混源相对贡献及石油地质意义[J]. 石油实验地质, 2009, 31(3): 262-269.  
Li Sumei, Pang Xiongqi, Jiang Zhenxue, et al. Quantitative pre-

- dication and significance of mixed oils for lithologic oil pool in the Dongying depression of the Bohai Bay Basin[J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2009, 31(3): 262-269.
- [11] Peters K E, Ramos L S, Zumbege J E, et al. De-convoluting mixed crude oil in Prudhoe Bay Field, North Slope, Alaska[J]. *Organic Geochemistry*, 2008, 39(3): 623-645.
- [12] Dzou L I, Holba A G, Ramón J C, et al. Application of new diterpane biomarkers to source, biodegradation and mixing effects on Central Llanos Basin oils, Colombia[J]. *Organic Geochemistry*, 1999, 30(7): 515-534.
- [13] 王文军, 宋宁, 姜乃煌, 等. 未熟油与成熟油的混源实验—混源理论图版及其应用[J]. *石油勘探与开发*, 1999, 26(4): 34-37.  
Wang Wenjun, Song Ning, Jiang Naihuang, et al. The mixture laboratory experiment of immature oils and mature oils, making and using the mixture source theory plat and its application[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 1999, 26(4): 34-37.
- [14] 金晓辉, 朱丹, 林壬子, 等. 原油气相色谱指纹可配比性实验研究[J]. *石油实验地质*, 2003, 25(1): 53-57, 92.  
Jin Xiaohui, Zhu Dan, Lin Renzi, et al. Partition experiment of GC fingerprint of crude oil[J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2003, 25(1): 53-57, 92.
- [15] 税蕾蕾, 彭平安, 贾望鲁, 等. 原油色谱指纹技术的优化与改进[J]. *石油地质与工程*, 2011, 25(5): 130-133.  
Shui Leilei, Peng Pingan, Jia Wanglu, et al. Optimization and improvement of crude oil chromatographic fingerprint technology[J]. *Petroleum Geology and Engineering*, 2011, 25(5): 130-133.
- [16] 陶国亮, 秦建中, 腾格尔, 等. 混源油定量判析方法研究新进展[J]. *石油实验地质*, 2010, 32(4): 377-381, 386.  
Tao Guoliang, Qin Jianzhong, Tenger, et al. Advancements in quantifying mixed oils[J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2010, 32(4): 377-381, 386.
- [17] 吕慧, 张林峰, 刘庆, 等. 胜坨油田多源多期成藏混源油的定量判析[J]. *石油学报*, 2009, 30(1): 68-74, 79.  
Lv Hui, Zhang Linfe, Liu Qing, et al. Quantification of mixed oils derived from multiple source rocks and multistage accumulation in Shengtuo Oilfield[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2009, 30(1): 68-74, 79.
- [18] 陈建平, 邓春萍, 梁狄刚, 等. 叠合盆地多烃源层混源油定量判析: 以准噶尔盆地东部彩南油田为例[J]. *地质学报*, 2004, 78(2): 279-288.  
Chen Jianping, Deng Chunping, Liang Digang, et al. Quantification of mixed oil derived from multiple source rocks: a typical case study of the Cainan oilfield in the East Junggar Basin, Northwest China[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2004, 78(2): 279-288.

(编辑 黄娟)

(上接第769页)

- [30] 胡国艺, 李剑, 李谨, 等. 判识天然气成因的轻烃指标探讨[J]. *中国科学: D辑: 地球科学*, 2007, 37(S2): 111-117.  
Hu Guoyi, Li Jian, Li Jin, et al. Preliminary study on the origin identification of natural gas by the parameters of light hydrocarbon[J]. *Science in China: Series D: Earth Sciences*, 2007, 51(S1): 131-139.
- [31] 戴金星, 戚厚发. 我国煤成烃气的  $\delta^{13}\text{C}-R_o$  关系[J]. *科学通报*, 1989, 34(9): 690-692.  
Dai Jinxing, Qi Houfa. The relationship between carbon isotope and vitrinite reflectance of coal-formed gas in China[J]. *Chinese Science Bulletin*, 1989, 34(9): 690-692.
- [32] Stahl W J, Carey Jr B D. Source-rock identification by isotope analyses of natural gases from fields in the Val Verde and Delaware Basins, West Texas[J]. *Chemical Geology*, 1975, 16(4): 257-267.
- [33] 徐永昌. 天然气成因理论及应用[M]. 北京: 科学出版社, 1994: 122-146.  
Xu Yongchang. Genetic theory of natural gases and its application[M]. Beijing: Science Press, 1994: 122-146.
- [34] Jenden P D, Kaplan I R, Hilton D R, et al. Abiogenic hydrocarbons and mantle helium in oil and gas fields. The future of energy gases[R]. *US Geology Survey Professional Paper*, 1993, 1570: 31-56.
- [35] Poreda R J, Jenden P D, Kaplan I R, et al. Mantle helium in Sacramento basin natural gas wells[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1986, 50(12): 2847-2853.
- [36] 戴金星, 倪云燕, 黄士鹏, 等. 煤成气研究对中国天然气工业发展的重要意义[J]. *天然气地球科学*, 2014, 25(1): 1-22.  
Dai Jinxing, Ni Yunyan, Huang Shipeng, et al. Significant function of coal-derived gas study for natural gas industry development in China[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2014, 25(1): 1-22.
- [37] 胡国艺, 张水昌, 田华, 等. 不同母质类型烃源岩排气效率[J]. *天然气地球科学*, 2014, 25(1): 45-52.  
Hu Guoyi, Zhang Shuichang, Tian Hua, et al. Gas relative expulsion efficiency of source rocks with different types of kerogen[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2014, 25(1): 45-52.
- [38] 常俊合, 岳玉山, 吕红玉, 等. 东濮凹陷上古生界热演化史与生烃期关系[J]. *石油勘探与开发*, 2004, 31(2): 32-34.  
Chang Junhe, Yue Yushan, Lv Hongyu, et al. Relationship between thermal evolution history and stage of hydrocarbon generation of Upper Paleozoic in the Dongpu Sag[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2004, 31(2): 32-34.
- [39] 李君, 吴晓东, 王东良, 等. 裂解气成因特征及成藏模式探讨[J]. *天然气地球科学*, 2013, 24(3): 520-528.  
Li Jun, Wu Xiaodong, Wang Dongliang, et al. The genetic feature and reservoir forming mode of cracked gas in China[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2013, 24(3): 520-528.

(编辑 徐文明)