

东海盆地西湖凹陷天然气及原油地化特征分析

曹倩¹, 徐旭辉¹, 曾广东², 周小进¹, 江平², 王岭²

(1. 中国石化石油勘探开发研究院 无锡石油地质研究所, 江苏 无锡 214151; 2. 中国石化上海海洋油气分公司, 上海 200120)

摘要:对西湖凹陷天然气组分、轻烃、碳同位素等特征进行了系统地分析, 结果表明天然气类型以煤型气与油型气的混源气为主且偏煤型气, 其演化成熟度较高, 属于 II 型偏煤型母质成熟—过熟阶段的产物, 主要来源为平湖组及其下部的烃源岩。通过对原油的物性、饱和烃、碳同位素、轻烃等特征的研究表明, 西湖凹陷原油可分为轻质原油与凝析油 2 种类型。这 2 种类型原油物性一致, 母质来源均有煤的贡献, 形成于弱还原的淡水湖沼环境; 原油可以分为成熟 ($R_o < 1.0\%$) 和高熟—过熟 ($R_o = 1.3\% \sim 2.0\%$) 2 种类型。

关键词:天然气; 原油; 地化特征; 碳同位素; 西湖凹陷; 东海盆地

中图分类号: TE122.1⁺1

文献标志码: A

Geochemical characteristics of natural gases and crude oils in the Xihu Sag of East China Sea Basin

Cao Qian¹, Xu Xuhui¹, Zeng Guangdong², Zhou Xiaojin¹, Jiang Ping², Wang Ling²

(1. Wuxi Research Institute of Petroleum Geology, SINOPEC, Wuxi, Jiangsu 214126, China;

2. SINOPEC Shanghai Marine Petroleum Branch, Shanghai 200120, China)

Abstract: Studies of the composition, light hydrocarbons and carbon isotopes of natural gases from the Xihu Sag showed that the gases were a mix of coal-type (accounting for the major proportion) and oil-type gases having high maturities. They were mainly derived from type II source rocks in the Pinghu Formation and underlying formations during the mature and over-mature stages. Crude oils from the Xihu Sag were classified into light oils and condensates according to studies of their physical properties, saturated hydrocarbons, carbon isotopes and light hydrocarbons. These two types of crude oil showed similar physical properties suggestive of a coal origin, and were generated in fresh water lakes with weakly anoxic conditions. Some of the crude oils were mature ($R_o < 1.0\%$) and some are high-to over mature ($R_o = 1.3\% \sim 2.0\%$).

Key words: natural gas; crude oil; geochemical characteristics; carbon isotopes; Xihu Sag; East China Sea Basin

西湖凹陷位于东海盆地浙东坳陷中部, 总面积 $5.9 \times 10^4 \text{ km}^2$, 是我国东部海域重点勘探的含油气凹陷之一。虽然该凹陷勘探程度低, 但探井成功率较高。通过三十多年的勘探, 西湖凹陷已发现的油气田主要分布在保俶斜坡和中央背斜带南部的苏堤构造带上, 近年来在保俶斜坡和中央背斜带中北部及三潭深凹都有较大发现, 展示了良好的勘探前景。

目前油气主要分布在中新统花港组和始新统平湖组, 凹陷内油气并举、以气为主, 关于油气地化特征及成因前人进行了相关分析^[1-3], 但研究资料主要集中在凹陷中南部, 对近年来新的钻井资料涉及较少, 在油气成因类型及成熟度方面存在争议^[1-3]。本文综合前人的研究成果, 结合近年来新

的钻探井资料, 从天然气组分、轻烃、碳同位素等方面系统地分析了天然气地化特征, 进一步探讨了其成因类型及成熟度特征; 从原油的物性、饱和烃、碳同位素、轻烃等方面分析了原油地化特征, 揭示其母质类型及成熟度特征, 以期为进一步的油气勘探提供理论依据。

1 地质背景

西湖凹陷为新生代叠加盆地, 呈 NNE 向展布, 从西往东可分成 5 个二级构造单元, 即保俶斜坡、三潭深凹、中央背斜带、白堤深凹和天屏断裂带。新生代以来, 西湖凹陷经历了断陷—拗陷—区域沉降 3 个演化阶段^[4]。凹陷沉积地层自下而上为古新统 (E_1), 中下始新统宝石组 (E_2b), 中上始新统

平湖组(E_2p)、渐新统花港组(E_3h)、中新统龙井组(N_1^1l)、玉泉组(N_1^2y)、柳浪组(N_1^3l)、上新统三潭组(N_2s)和第四系东海群(Qd)。

西湖凹陷在断陷和拗陷沉积期发育了 5 套烃源岩系:古新统、宝石组、平湖组、花港组及中新统^[4-5]。前人研究认为,西湖凹陷的主力烃源岩为平湖组的煤系地层^[6-12],其次为花港组和宝石组烃源岩,埋藏更深的古新统烃源岩也可能为重要来源^[1-2]。平湖组烃源岩厚度大,岩性以泥岩、碳质泥岩和煤为主,母质类型为 II-III 型,有机质丰度较高,总体为中等—好烃源岩^[8]。

2 天然气地球化学特征

本次研究采用的天然气及原油的地化测试数据涉及西湖凹陷大部分的含油气构造,包括中央背斜带、三潭深凹和保俶斜坡等构造,层位上主要分布在宝石组、平湖组、花港组和龙井组。

2.1 天然气组分

西湖凹陷天然气组分总体以烃类气体为主,含量 80.2%~99.37%,甲烷含量分布范围为 70.5%~97.5%,重烃气含量介于 1.44%~19.73%,干燥系数(C_1/C_{1-5})分布在 0.78~0.98(图 1)。其中中央背斜带中北部的 D、E、F 构造天然气为干气,其产出层位为花港组,除中央背斜带南部的 C 构造上花港组、平湖组分别有个别样品为干气,其他地区花港组和平湖组的样品均为湿气。非烃气体以 CO_2 和 N_2 为主, N_2 含量介于 0.05%~29.62%, CO_2 含量介于 0.21%~12.73%(图 2), N_2 含量有个别样品较高,超过了 20%,其成因主要为有机质热降解作用生成^[3]; CO_2 的含量属于正常范围,其成因以干酪

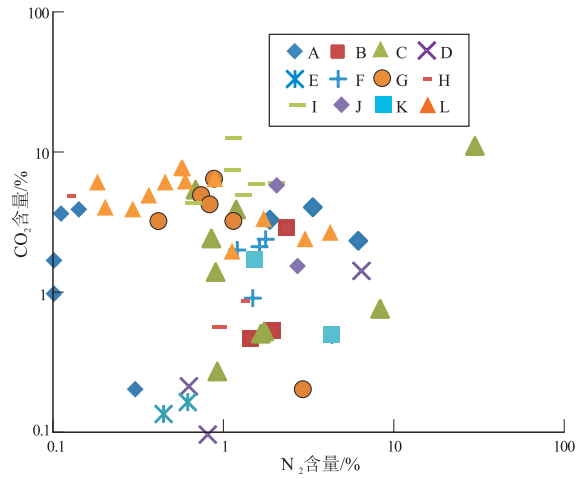


图 2 西湖凹陷天然气 N_2 与 CO_2 含量关系

Fig.2 N_2 content vs. CO_2 content of natural gases in the Xihu Sag

根热降解为主^[3]。

2.2 天然气碳同位素

西湖凹陷 $\delta^{13}C_1$ 值介于 -47.74‰ ~ -28.2‰ 之间,除了中央背斜带 E 构造上龙井组个别样品大于 -40‰ 外,其他地区样品的 $\delta^{13}C_1$ 值在 -40‰ ~ -29‰ 之间(图 3)。 $\delta^{13}C_2$ 值除了中央背斜带 B、D 构造和三潭深凹 G 构造上花港组个别样品大于 -28‰ ,其余样品都小于 -29‰ ,这与本区烃源岩类型主要为 II-III 型有重要关系。

天然气碳同位素系列组成可分为 2 类:一类为正碳同位素系列,即 $\delta^{13}C_1 < \delta^{13}C_2 < \delta^{13}C_3$,主要分布在中央背斜带 C、A、H、D、E,保俶斜坡 L 及三潭深凹 G 等构造上,龙井组、花港组和平湖组等层位都有产出;另一类单体碳同位素序列发生了倒转(图 4),乙烷、丙烷以及丙烷、丁烷的倒转在各个含油气构

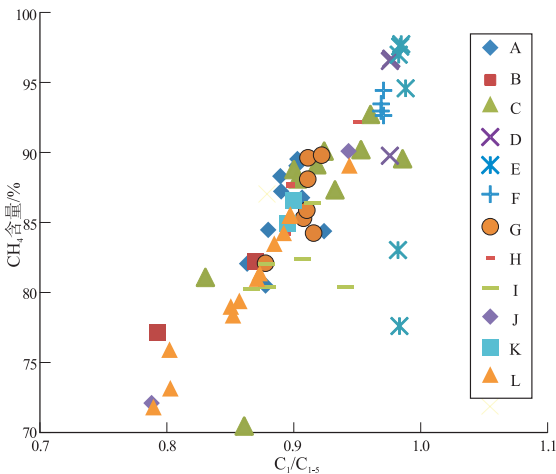


图 1 西湖凹陷天然气烃类气体干燥系数与 CH_4 含量关系

Fig.1 Dry coefficient vs. CH_4 content of natural gases in the Xihu Sag

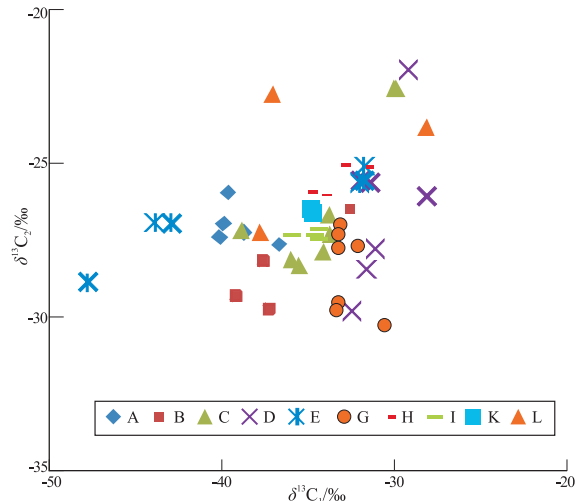


图 3 西湖凹陷天然气碳同位素对比

Fig.3 Carbon isotopes of natural gases in the Xihu Sag

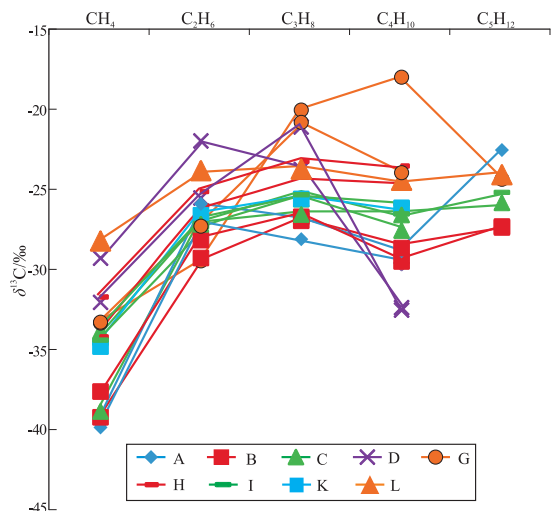


图4 西湖凹陷天然气 C₁-C₅同位素组成

Fig.4 C₁-C₅ isotopes of natural gases in the Xihu Sag

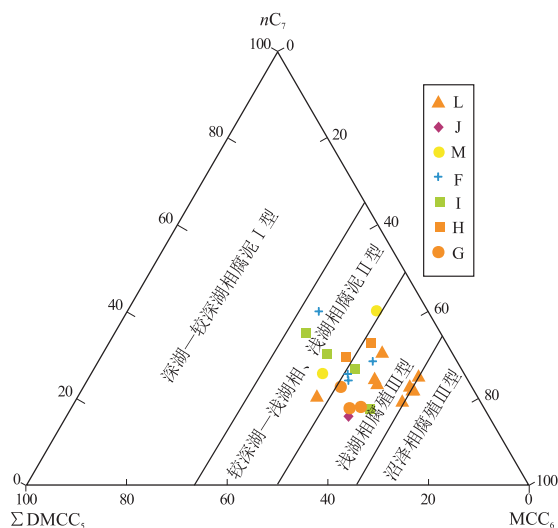


图5 西湖凹陷天然气 C₇系列化合物三角图

Fig.5 C₇ components of natural gases in the Xihu Sag

造上都普遍存在。结合地质背景分析,认为本区单体碳同位素发生倒转,最大的可能是天然气藏存在混源现象,因为本区存在多套烃源岩,特别是平湖组及其下部的宝石组、古新统烃源岩已处于过成熟阶段^[6],另外烃源岩岩性存在泥岩、碳质泥岩、煤等多种岩性,因此天然气混源与多套烃源岩、多期生烃过程有着重要的关系。

2.3 天然气轻烃特征

轻烃是天然气重要的组成之一,蕴含着极其重要和丰富的地球化学信息,利用轻烃地球化学指标不仅可以用来确定天然气的成熟度、示踪天然气来源,还可以划分天然气类型。目前常用的图表包括 C₇轻烃系列组成的三角图、C₅₋₇脂肪族组成的三角图、甲基环己烷指数、烷芳指数—石蜡指数等。

胡惕麟等^[13]提出甲基环己烷指数(MCH指数),结合 C₇轻烃化合物源特征,即可划分有机质类型。西湖凹陷不同油气田的天然气 MCH 指数成群性很好(图5),除三潭深凹 I 构造 2 个样品落在腐泥型 II 型区域外,其余样品都落入腐殖型的范围,表明西湖凹陷天然气来源母质类型较差,基本为 III 型,个别存在 II 型。

胡国艺^[14]对判识天然气成因的轻烃指标进行了分析后认为,2 个指标组合具有较好的应用效果:一是 C₇轻烃化合物组成三角图;二是 C₅₋₇脂肪族组成三角图。西湖凹陷天然气 C₅₋₇系列化合物中,大多数样品 C₅₋₇的正构烷烃相对含量集中分布在 26%~31% 之间,指示天然气成因类型偏煤型气(图6)。

2.4 天然气成因及来源

结合甲烷、乙烷碳同位素对西湖天然气成因类型进行判识(图7),除了保俶斜坡 L、中央背斜带 D

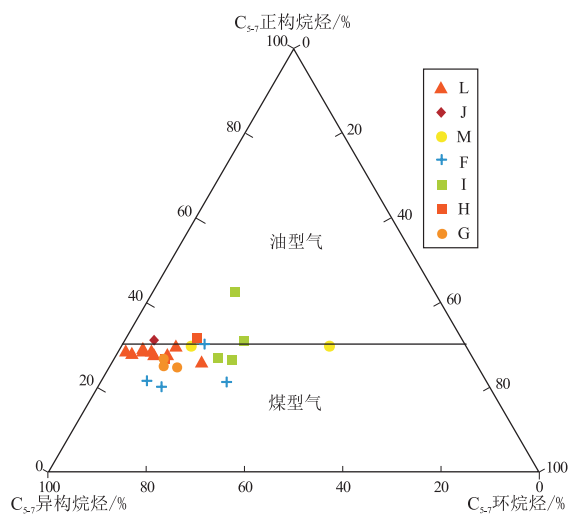


图6 西湖凹陷天然气 C₅₋₇系列化合物三角图

Fig.6 C₅₋₇ components of natural gases in the Xihu Sag

构造有 3 个样品位于煤型气区,三潭深凹 G 构造和中央背斜带 B 构造 2 个样品靠近偏油型气区,其他天然气样品集中在混源气区,而且多偏向煤型气的范围。结合前述天然气轻烃、碳同位特征分析,认为本区天然气类型以煤型气和油型气的混源气为主,由于主力烃源岩平湖组泥岩有机质类型为 II-III 型,加上平湖组煤的贡献,导致研究区天然气具有偏煤型气的特征。

为了计算本区混合型天然气的成熟度,根据庞雄奇等建立的既适用于煤型气又适用于油型气母质来源的统一的判别公式^[15],根据国内学者的模型参数^[16-17]计算了母质演化程度,结果表明西湖凹陷天然气均属于成熟—过熟阶段的产物(表1)。这一结果与根据天然气的甲烷含量与重烃含量关

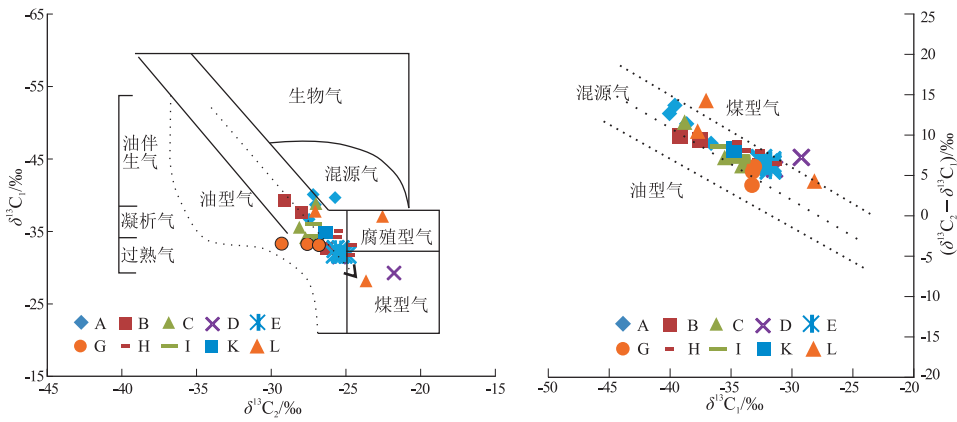


图 7 西湖凹陷天然气 $\delta^{13}C_1$ 与 $\delta^{13}C_2$ 和 $(\delta^{13}C_2 - \delta^{13}C_1)$ 关系

Fig.7 $\delta^{13}C_1$ vs. $\delta^{13}C_2$ and $(\delta^{13}C_2 - \delta^{13}C_1)$ of natural gases in the Xihu Sag

表 1 西湖凹陷天然气母质演化程度

Table 1 Source rock maturity of natural gases in the Xihu Sag

| 井号 | 产层 | GTI ^[15] | KTI ^[15] | 母质演化程度 R_o /% | |
|----|------------------|---------------------|---------------------|---------------------|--------------------|
| | | | | 戴金星 ^[16] | 沈平 ^[17] |
| C1 | E ₃ h | 0.36 | 67.76 | 1.06 | 1.06 |
| C1 | E ₃ h | -0.05 | 47.64 | 1.76 | 1.68 |
| C1 | E ₂ p | 0.07 | 53.51 | 1.79 | 1.71 |
| G1 | E ₃ h | -0.19 | 40.71 | 1.73 | 1.64 |
| G1 | E ₃ h | -0.18 | 40.86 | 1.77 | 1.68 |
| A1 | E ₃ h | 0.43 | 71.73 | 1.15 | 1.16 |
| A1 | E ₃ h | 0.35 | 67.39 | 1.47 | 1.43 |
| B1 | E ₃ h | -0.26 | 37.12 | 1.82 | 1.74 |
| B1 | E ₃ h | 0.29 | 64.34 | 0.95 | 0.95 |
| D1 | E ₃ h | -0.46 | 27.15 | 2.72 | 3.01 |
| D1 | E ₃ h | -0.24 | 38.00 | 2.21 | 2.20 |
| H1 | E ₃ h | -0.12 | 43.89 | 1.56 | 1.47 |
| H1 | E ₃ h | -0.32 | 33.95 | 2.02 | 1.99 |
| H2 | E ₃ h | -0.13 | 43.28 | 1.84 | 1.76 |
| I3 | E ₃ h | 0.03 | 51.47 | 1.31 | 1.23 |
| I3 | E ₃ h | -0.05 | 47.70 | 1.60 | 1.51 |
| K4 | E ₂ p | -0.04 | 47.88 | 1.50 | 1.41 |
| K4 | E ₂ p | -0.04 | 48.05 | 1.50 | 1.41 |
| L2 | E ₂ p | 0.22 | 61.24 | 1.27 | 1.23 |
| L5 | E ₂ p | -0.74 | 12.98 | 2.67 | 3.33 |
| L5 | E ₂ p | 0.19 | 59.73 | 1.11 | 1.08 |

注: GTI(天然气成因类型指数)=1~-1, 分别与油型气至煤型气对应; KTI(干酪根类型指数)=50(GTI+1)^[15]。

系划分的成因类型的结果一致(图 8), 天然气以高成熟凝析气、过熟裂解气为主。此成熟度与平湖组及其以下烃源岩的成熟度一致, 也验证了前人认为天然气主要来源为平湖组及其以下烃源岩的结论。

3 原油地球化学特征

3.1 原油物性特征及赋存状态

按照原油的产出特征, 可以分为轻质原油与凝

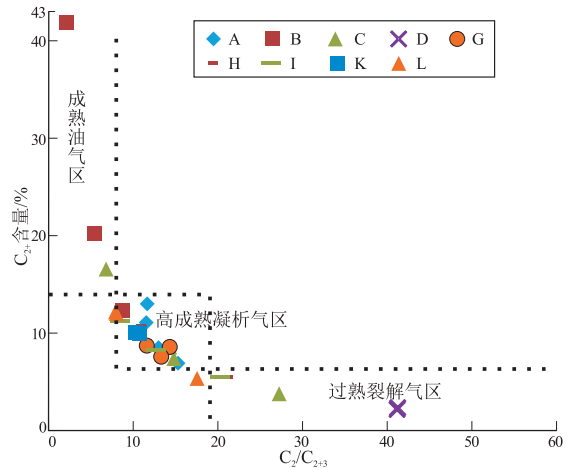


图 8 西湖凹陷天然气组分成因类型划分

Fig.8 Genetic types of natural gases in the Xihu Sag

析油 2 种类型。凝析油与天然气共同产出, 在中央背斜带、三潭深凹都有分布, 密度 0.74~0.87 g/m³ 之间, 含蜡量 0~7.75% 之间, 含胶量 0~8.23% 之间, 含硫量小于 0.76%, 属于低密度、低含蜡、低硫的高品质原油。轻质原油则产自独立的油藏中, 目前主要在三潭深凹洼中隆及保俶斜坡构造上有发现, 其物理性质与凝析油差别不大, 含蜡量、含胶量比凝析油稍高。

3.2 原油的地化特征

3.2.1 原油的正构烷烃及异戊二烯烷烃特征

正构烷烃特征表现为 C₂₁-/C₂₂₊ 基本都大于 1, OEP 和 CPI 接近 1、主峰碳以低碳数为主, 总体表现出原油成熟度较高的特征。异戊二烯烷烃样品的 Pr/Ph 都较高, 基本都在 3 以上(表 2), 结合西湖地质背景, 表明其母质沉积相为淡水湖沼相, 烃源岩有煤的贡献, 沉积水质环境为弱氧化—弱还原。

3.2.2 原油的碳同位素特征

本区原油全烃碳同位素分布范围为 -24.8‰~

表2 西湖凹陷原油正构烷烃及异戊二烯烷烃特征

Table 2 Characteristics of *n*-alkanes and isoprenoid alkanes in crude oils in the Xihu Sag

| 钻井 | 层位 | OEP | CPI | Pr/C ₁₇ | Ph/C ₁₈ | Pr/Ph | C ₂₁₋₂₂ | 主峰碳数 |
|----|-------------------------------|------|------|--------------------|--------------------|-------|--------------------|-----------------|
| H1 | E ₃ h [±] | 0.99 | 1.12 | 1.04 | 0.13 | 6.33 | 0.79 | C ₂₄ |
| H2 | E ₃ h [±] | 0.67 | 1.07 | 1.09 | 0.14 | 8.65 | 2.42 | C ₁₀ |
| I3 | E ₃ h [±] | 1.41 | 1.10 | 0.81 | 0.16 | 4.47 | 1.91 | C ₉ |
| G2 | E ₃ h [±] | 0.80 | 1.08 | 1.01 | 0.16 | 5.66 | 2.77 | C ₁₀ |
| G2 | E ₃ h [±] | 1.01 | 1.06 | 1.04 | 0.17 | 6.12 | 2.43 | C ₁₉ |
| G2 | E ₃ h [±] | 0.96 | 0.94 | 1.43 | 0.19 | 8.80 | 17.46 | C ₁₂ |
| F1 | E ₃ h [±] | 0.54 | 1.11 | 0.47 | 0.14 | 3.08 | 2.54 | C ₁₀ |
| F1 | E ₃ h [±] | 0.52 | 1.12 | 0.48 | 0.14 | 3.15 | 2.47 | C ₁₀ |
| F1 | E ₃ h [±] | 0.79 | 1.13 | 0.48 | 0.19 | 2.35 | 2.86 | C ₁₀ |
| J2 | E ₃ h [±] | 0.94 | 1.11 | 1.29 | 0.20 | 5.53 | 2.95 | C ₁₈ |
| J2 | E ₃ h [±] | 0.99 | 1.17 | 1.44 | 0.17 | 5.60 | 2.39 | C ₁₉ |
| J2 | E ₂ p | 0.49 | 1.07 | 0.94 | 0.18 | 4.61 | 1.81 | C ₁₀ |

表3 西湖凹陷原油的最大生成温度和成熟度计算结果

Table 3 Maximum generation temperatures and maturities of crude oils in the Xihu Sag

| 井名 | 层位 | 样品类型 | T _{max} /°C | R _o /% |
|----|-------------------------------|------|----------------------|-------------------|
| N1 | | 凝析油 | 133.73 | 0.97 |
| N1 | | 凝析油 | 135.59 | 0.99 |
| N1 | | 凝析油 | 135.60 | 0.99 |
| H1 | E ₃ h [±] | 凝析油 | 139.50 | 1.04 |
| G2 | E ₃ h [±] | 轻质原油 | 120.70 | 0.81 |
| G2 | E ₃ h [±] | 凝析油 | 174.90 | 1.47 |
| L4 | E ₂ p ^中 | 轻质原油 | 165.80 | 1.36 |
| L4 | E ₂ p ^上 | 轻质原油 | 148.90 | 1.16 |
| H2 | E ₃ h [±] | 凝析油 | 155.00 | 1.25 |
| I3 | E ₃ h [±] | 凝析油 | 196.00 | 1.73 |
| J2 | E ₃ h [±] | 轻质原油 | 196.80 | 1.74 |
| J2 | E ₃ h [±] | 轻质原油 | 196.90 | 1.76 |

注:表中部分数据源自参考文献[3]。

-28.6‰,大部分在-26‰~-27‰,相对其他盆地的原油碳同位素较重。原油饱和烃碳同位素分布在-25.4‰~-32.25‰,芳烃碳同位素分布在-24.3‰~-29.04‰。原油芳烃稳定性好,受微生物降解和运移的影响较小,与成油母质和环境具有一定的相关性^[2],由于本区芳烃碳同位素相对较重,大部分分布在-24.3‰~-26.3‰,仅有个别样品为-29.04‰,指示其母质来源可能具有煤的贡献,且不论轻质原油还是凝析油,母质来源一致。

3.2.3 原油的轻烃特征

石蜡指数和庚烷值是2个反映原油成熟度的轻烃参数,可以看出研究区大部分位于成熟原油与高成熟原油范围内(图9),其中仅有三潭深凹的

H、I构造的样品位于成熟范围,其他位于高成熟原油范围。

根据原油的2,4-二甲基戊烷(2,4-DMP)/2,3-二甲基戊烷(2,3-DMP)比值(本文定义为M)可以计算油气生成时最大温度(T_{max}),从而进一步可以折算相应的镜质体反射率(R_o),具体公式如下^[3]:

$$T_{max} = 140 + 15 \ln M \quad (1)$$

$$R_o = 0.012 3T_{max} - 0.676 4 \quad (2)$$

根据公式(1)和(2)计算西湖凹陷油气的最大生成温度和成熟度(表3)。结果表明,按照成熟度特征,西湖原油可以分为2种类型:一种类型处于成熟阶段,R_o分布在1%左右,此类原油主要分布在中央背斜带的N、H及三潭深凹的G等构造上;另一种类型处于高成熟演化阶段,凝析油和轻质原油的R_o>1.3%,主要分布在三潭深凹的J、G、I及保俶斜坡的局部构造上。

4 结论

(1)西湖凹陷普遍分布偏煤型气的混源气,在保俶斜坡和中央背斜带北部构造上分布有煤型气,在三潭深凹及中央背斜带南部构造上分布有油型气。几种类型的天然气的演化程度都较高,属于II-III型母质来源的成熟-过熟阶段的产物,其烃源岩以平湖组及以下深部烃源岩为主。

(2)西湖凹陷原油按照产出状态可以分为凝析油和轻质原油2种类型,中央背斜带主要分布凝析油,保俶斜坡主要分布轻质原油,而三潭深凹中2种类型原油都有分布。2种类型原油都具有低密度、

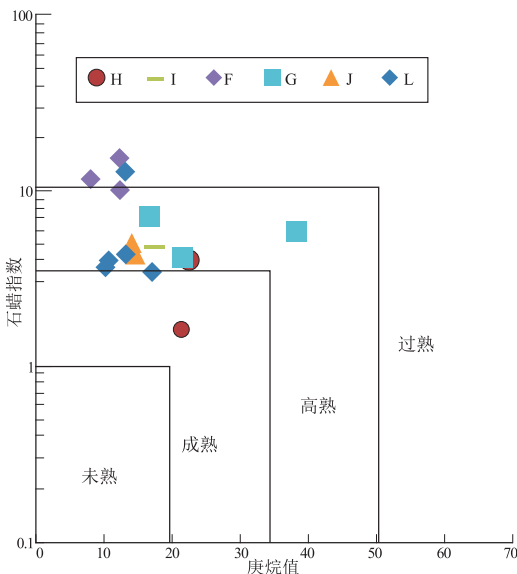


图9 西湖凹陷原油轻烃特征

Fig.9 Characteristics of light hydrocarbons in crude oils in the Xihu Sag

低含蜡、低硫物性特征,母质来源均有煤的贡献,母质沉积相为弱还原的淡水沼泽环境。按照成熟度可以分为成熟原油($R_o < 1.0\%$)和高熟—过熟原油($R_o = 1.3\% \sim 2.0\%$)2种类型,成熟原油主要分布在中央背斜带上,高熟—过熟原油则主要分布在保俶斜坡上,而三潭深凹中2种类型原油都有分布。

参考文献:

- [1] 叶军,郭迪孝.东海西湖凹陷天然气地质特征[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.
- [2] 贾健谊,须雪豪,孙伯强.东海西湖凹陷原油与天然气的地球化学特征[J].海洋石油,2000,20(2):1-7.
Jia Jianyi, Xu Xuehao, Sun Boqiang. Oil/gas geochemical character in the Xihu trough of the East China Sea[J]. Offshore Oil, 2000, 20(2): 1-7.
- [3] 苏奥,陈红汉,王存武.东海盆地西湖凹陷油气成因及成熟度判别[J].石油勘探与开发,2013,40(5):521-527.
Su Ao, Chen Honghan, Wang Cunwu. Genesis and maturity identification of oil and gas in the Xihu Sag, East China Sea Basin[J]. Petroleum Exploration and Development, 2013, 40(5): 521-527.
- [4] 李上卿,李纯洁.东海西湖凹陷油气资源分布及勘探潜力分析[J].石油实验地质,2003,25(6):721-728.
Li Shangqing, Li Chunjie. Analysis on the petroleum resource distribution and exploration potential of the Xihu depression, the East China Sea[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2003, 25(6): 721-728.
- [5] 叶加仁,顾惠荣,贾健谊.东海西湖凹陷油气地质条件及其勘探潜力[J].海洋地质与第四纪地质,2008,28(4):111-116.
Ye Jiaren, Gu Huirong, Jia Jianyi. Petroleum geological condition and exploration potential of Xihu depression, East China Sea[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2008, 28(4): 111-116.
- [6] 全志刚,贺清,何仕斌,等.东海西湖凹陷地温场及其对烩源岩的作用[J].石油实验地质,2009,31(5):466-471.
Tong Zhigang, He Qing, He Shibin, et al. Geothermal field and its effect on source rock in the Xihu Sag, the East China Sea Basin[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2009, 31(5): 466-471.
- [7] 魏恒飞,陈践发,陈晓东,等.西湖凹陷平湖组滨海型煤系烩源岩发育环境及其控制因素[J].中国地质,2013,40(2):487-497.
Wei Hengfei, Chen Jianfa, Chen Xiaodong, et al. The controlling factors and sedimentary environment for developing coastal coal-bearing source rock of Pinghu Formation in Xihu depression[J]. Geology in China, 2013, 40(2): 487-497.
- [8] 叶加仁,顾惠荣.东海西湖凹陷浙东中央背斜带烩源岩生排烩史研究[J].海洋地质与第四纪地质,2001,21(3):75-80.
Ye Jiaren, Gu Huirong. A study on hydrocarbon generation history and expulsion history of source rock in the Zhedong central anticline belt, Xihu depression[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2001, 21(3): 75-80.
- [9] 张银国.东海西湖凹陷花港组油气地质条件与油气分布规律[J].石油实验地质,2010,32(3):223-226.
Zhang Yinguo. Petroleum geology and hydrocarbon distribution pattern of Huagang Formation in the Xihu Sag of the East China Sea[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2010, 32(3): 223-226.
- [10] 张喜林.东海盆地西湖凹陷中—下始新统宝石组沉积特征[J].地球科学与环境学报,2014,36(3):31-37.
Zhang Xilin. Sedimentary characteristics of Baoshi formation of Lower-Middle Eocene in Xihu Sag of East China Sea Basin[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2014, 36(3): 31-37.
- [11] 杨彩虹,曾广东,李上卿,等.东海西湖凹陷平北地区断裂发育特征与油气聚集[J].石油实验地质,2014,36(1):64-69.
Yang Caihong, Zeng Guangdong, Li Shangqing, et al. Fault development characteristics and hydrocarbon accumulation in Pingbei area of Xihu Sag, East China Sea[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2014, 36(1): 64-69.
- [12] 李敏,陈永进,姜文斌.西湖凹陷平湖组岩性油气藏形成条件[J].油气地质与采收率,2012,19(2):23-25.
Li Min, Chen Yongjin, Jiang Wenbin. Hydrocarbon accumulation conditions for lithologic reservoirs in Pinghu formation, Xihu depression[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2012, 19(2): 23-25.
- [13] 胡惕麟,戈葆雄,张义纲,等.源岩吸附烩和天然气轻烩指纹参数的开发和应用[J].石油实验地质,1990,12(4):375-394.
Hu Tilin, Ge Baoxiong, Chang Yigang, et al. The development and application of fingerprint parameters for hydrocarbons absorbed by source rocks and light hydrocarbons in natural gas[J]. Experimental Petroleum Geology, 1990, 12(4): 375-394.
- [14] 胡国艺,李剑,李谨,等.判识天然气成因的轻烩指标探讨[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, 37(S2): 111-117.
- [15] 庞雄奇.判别混源气母质转化程度的定量模式及其应用[J].石油学报,2000,21(5):16-20.
Pang Xiongqi. The quantitative identification model of the evolution degree of mixing natural gas source material and the application of this model[J]. Acta Petrolei Sinica, 2000, 21(5): 16-20.
- [16] 戴金星,戚厚发,宋岩.鉴别煤成气和油型气若干指标的初步探讨[J].石油学报,1985,6(2):31-38.
Dai Jinxing, Qi Houfa, Song Yan. On the indicators for identifying gas from oil and gas from coal measure[J]. Acta Petrolei Sinica, 1985, 6(2): 31-38.
- [17] 沈平,申歧祥,王先彬,等.气态烩同位素组成特征及煤型气判识[J].中国科学:B辑,1987(6):647-656.
Shen Ping, Shen Qixiang, Wang Xianbin, et al. Gaseous hydrocarbons isotopic compositions and discrimination of coal type gas[J]. Science in China; Series B, 1987(6): 647-656.