丁飞, 李宁, 刁慧, 等. 东海西湖凹陷海陆过渡型油气成熟度恢复方法及应用[J]. 海洋地质前沿, 2024, 40(12): 41-49. DING Fei, LI Ning, DIAO Hui, et al. Maturity recovery of oil and gas from marine-continental source rock and its application of Xihu Sag, East China Sea[J]. Marine Geology Frontiers, 2024, 40(12): 41-49.

东海西湖凹陷海陆过渡型油气成熟度 恢复方法及应用

丁飞,李宁, 刁慧, 于仲坤, 王皖丽, 余箐 (中海石油(中国)有限公司上海分公司, 上海 200335)

摘 要:海陆过渡相煤系烃源岩岩性多样,油气成熟度恢复难度大,影响油气源判别。以东海 西湖凹陷为例,通过烃源岩镜质体反射率、饱和烃和芳香烃色谱-质谱及热模拟天然气碳同位 素分析等手段,建立了油和天然气成熟度恢复方法,计算了油、气成熟度,明确了油气来源。 结果显示,油成熟度主要分布于 0.8%~1.0%,为成熟油;天然气成熟度主要分布于 1.0%~ 2.0%,属于成熟—高熟气;同层段油及天然气成熟度存在差异,且垂向变化规律不同,揭示了 油和天然气来源和成藏过程存在差别。综合分析认为,本区油主要来自斜坡次洼,环次洼带 是油有利勘探区;天然气主要来自凹陷主洼,自主洼向斜坡带均为天然气有利区带,勘探潜 力大。

关键词:海陆过渡相; 烃源岩; 油气成熟度; 油气来源; 西湖凹陷 中图分类号:P618.13; P736 文献标识码: A DOI: 10.16028/j.1009-2722.2023.232

0 引言

海陆过渡相沉积环境在中国近海广泛发育,油 气资源丰富^[1]。煤系地层作为海陆过渡相沉积环境 主力烃源岩,近年来逐渐受到重视,相关研究有力 促进了煤系烃源岩成烃在新增油气储量中占比不 断增加^[2]。西湖凹陷平北斜坡煤系烃源岩形成于海 陆过渡相背景,是重要的油气富集带^[3]。平北斜坡 煤系烃源岩岩性多样,包括暗色泥岩、炭质泥岩和 煤,以生气为主,少量生油^[4]。前人对平北斜坡煤系 烃源岩发育、展布及控制因素进行了细致分析^[5-7], 并对生烃模式及生烃过程进行了研究^[8],但海陆过 渡环境沉积相变快,煤系烃源岩非均质性强,油气 来源及分布规律研究难度较大,限制了进一步的勘 探工作。

确定油气成熟度是进行油气源对比和开展油 气分布规律研究的基础。油成熟度通常采用不同 分子量或不同构型化合物相对稳定性差异进行描 述,天然气成熟度则主要通过烃类气组分稳定碳同 位素分馏效应进行表征^[9-11]。然而,除热演化作用 外,这些成熟度参数还受到母质来源、沉积环境等 因素影响^[9],且不同学者建立公式时所选择的盆地 构造演化史、烃源岩时代和性质类型等都有差异, 借鉴经验公式进行油气成熟度恢复往往存在误差。 西湖凹陷尚无基于实钻烃源岩数据的油气成熟度 恢复方法,采用经验公式计算的油气成熟度分布范 围较大,原油成熟度介于 0.6%~1.4% [12-13],天然气 成熟度介于 0.6%~2.0% [13-15], 应用效果偏差, 难以 满足精细油气源对比需求。随着勘探程度增加,烃 源岩和油气样品数据及相关地质认识不断丰富,使 得建立本区专属的油气成熟度恢复公式科学可行。 本文以平北斜坡带烃源岩为研究对象,基于烃源岩 镜质体反射率数据、生标参数分析及生烃热模拟实 验结果,建立了西湖凹陷海陆过渡相煤系烃源岩的

收稿日期: 2023-10-10

资助项目:"十四五"全国油气资源评价项目"中海油矿业权区及周边空 白区油气资源评价"(QGYQZYPJ2022-3);"十三五"国家科技重大专项 "东海盆地天然气资源潜力评价"课题(2016ZX05027001);中国海洋石 油有限公司重大科技专项"东海西湖凹陷大中型气田勘探方向及关键技 术研究"(KJZX-2023-0101)

第一作者: 丁飞(1982—), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事油气地球化学 方面的研究工作. E-mail: dingfei@cnooc.com.cn

油及天然气成熟度恢复方法,明确了油及天然气来 源和运移方向,为下步油气勘探提供科学依据。

1 地质概况与实验分析

1.1 地质概况

西湖凹陷处于东海陆架盆地东部,是在晚白垩 世末期构造背景上发育的新生代沉积凹陷,面积约 5.9×10⁴ km^{2[16]}。西湖凹陷西与海礁隆起、渔山东低 隆起等构造单元相连,东与钓鱼岛隆褶带相邻,南 与钓北凹陷相接(图1)。西湖凹陷演化过程经历断 陷、拗陷和区域沉降3个阶段,内部分为5个构造 带,由西向东依次为西部斜坡带、西次凹、中央反转 构造带、东次凹和东部断阶带^[17]。凹陷内以新生代 碎屑沉积为主,最大地层厚度约1.5×10⁴ m,自下而 上发育始新统八角亭组、宝石组、平湖组,渐新统花 港组,中新统龙井组、玉泉组和柳浪组,上新统三潭 组,以及第四系东海群^[18]。







平北斜坡位于西湖凹陷西部斜坡带中部,整体 呈现西南高、东北低的特征,发育多个构造带,是西 湖凹陷重要的油气聚集区^[16-20]。平北斜坡带以受 潮汐影响的三角洲-障壁岛海岸沉积体系为主,平湖 组发育海陆过渡相煤系烃源岩,具有范围广、厚度大 的特征,是斜坡带的主力烃源岩^[21]。已发现油气主要 集中在平湖组,油生标特征与平湖组煤系烃源岩相 近^[22],天然气则由斜坡次洼和凹陷主洼共同贡献^[23]。

1.2 样品及实验

烃源岩及油气常规实验样品取自西湖凹陷平 北斜坡 X 油气田。烃源岩包括泥岩、碳质泥岩和煤, 泥岩样品 TOC 平均值达到 1.91%,碳质泥岩 TOC 平均值为 14.33%,煤 TOC 值>60%;泥岩干酪根类 型以Ⅱ₂型为主,少量Ⅲ型,炭质泥岩和煤干酪根类 型以Ⅱ₁型为主,少量Ⅱ₂型。热模拟实验碳质泥岩 和煤样品取自平北斜坡带,泥岩取自西次凹。

烃源岩及油气样饱和烃色谱-质谱分析仪器为 Thermo-Fisher Trace-DSQ II 气相色谱-质谱联用仪, 检测限为 0.01 μL/mL。天然气组分分析采用安捷 伦 7890A 气相色谱仪, 检测限为 0.01%。天然气碳 同位素分析仪器为气相色谱-同位素比质谱仪(Isoprime 100)。烃源岩干酪根的热模拟实验采用恒 定压力的黄金管-高压釜封闭体系生烃热模拟实 验装置, 具体方法为:将 20~50 mg 干酪根样品在 100 ℃条件下干燥 24 h 后, 在氩气保护下封入多个 40 mm×4.5 mm 黄金管, 并分别放置于不同的高压 釜, 采用 20 ℃/h 的升温速率, 压力约 50 MPa, 300~ 600 ℃ 范围内设置 7~8 个温度点。

2 油气特征

研究区钻遇油气层段包括油层、凝析气层和气 层,均位于平湖组,本文按地面状态以油(包含原油 和凝析油)和气进行描述。油密度分布于 0.77~ 0.87 g/cm³,平均值约 0.83 g/cm³;含硫量大多<0.1%, 个别样品达 0.3%;含蜡量差别较大,分布于 0.01%~ 17.51%,整体表现为低密度、低硫、含蜡(部分高蜡) 特征。天然气组分以烃类为主,甲烷含量为 74%~ 89%,干燥系数分布于 0.77~0.92,属于湿气;非烃 气以二氧化碳和氮气为主,含量<10%;甲烷碳同位 素分布于-41.5‰~-32.2‰,乙烷碳同位素大部分重 于-28‰,分布于-29.5‰~-24.9‰,属于煤型气^[24]。

3 油成熟度恢复

3.1 甾烷系列化合物成熟度参数

规则甾烷是表征生油母质来源和油成熟度的 常用化合物^[9], C₂₉规则甾烷共有 4 个同分异构体, 随演化程度增加, 其 R 构型会向 S 构型转化; C₂₉规 则甾烷在 C-14 和 C-17 位上会发生异构化作用, 使 得热稳定性低的 αα 构型向热力学更稳定的 ββ 构 型转化, 利用各对异构体比值可获得样品成熟度信 息, C₂₉ 甾烷 20S/ (20S+20R)、C₂₉ 甾烷 ββ/(αα+ββ) 是常用参数^[25-26]。

研究区油 C₂₉ 甾烷 20S/(20S+20R)值主要分 布于 0.42~0.52, C₂₉ 甾烷 ββ/(αα+ββ) 值主要分布 于 0.47~0.57(图 2),表明油形成于烃源岩成熟阶 段^[9]。烃源岩甾烷成熟度参数与镜质体反射率 R_o 对应关系显示, 甾烷参数演化可划分为 2 个阶段 (图 3): 第 1 阶段埋深 <4 200 m, 表现为与 R_0 同步 变化, 即甾烷成熟度参数与 R_0 均随埋深增加而增 大; 第 2 阶段埋深 >4 200 m, 甾烷成熟度参数基本 不变, 趋于平衡状态, C_{29} 甾烷 20S/(20S+20R)最大 值为 0.52, C_{29} 甾烷 20S/(20S+20R)最大 值与前人研究 C_{29} 甾烷 20S/(20S+20R)值和 C_{29} 甾 烷 $\beta\beta/(\alpha\alpha+\beta\beta)$ 值分别在 0.55 和 0.67 存在差异, 可 能与烃源岩有机质来源和沉积保存环境不同有 关^[25], 此阶段, R_0 则表现为随埋深增加持续增 大的变化趋势, 表明研究区甾烷成熟度参数仅适





用于 R_o<0.8% 的低熟一成熟度阶段油气成熟度 估算。

3.2 菲系列化合物成熟度参数

芳烃化合物与热作用关系更密切,且化学动力 学范围广,指示高、过成熟烃源岩的演化程度效果 良好^[27-28]。菲及其烷基取代物是烃源岩抽提物中 最重要的芳烃化合物^[29],RADKE等^[30-31]发现菲与 甲基菲4个异构体的分布随成熟度呈规律性变化, 提出甲基菲指数(MPI=1.5×(2-MP+3-MP)/(P+ 1-MP+9-MP)),并回归出 MPI 与计算等效镜质 体反射率 R_c 的关系式,广泛应用于烃源岩和油成熟 度的确定^[28,32]。

研究区烃源岩甲基菲指数 MPI 相对较分散,主要分布于 0.2~1.0, 埋深 <4 200 m 的样品 MPI 值 与 R_0 关系不明显, 埋深 >4 200 m 的样品 MPI 值则 整体呈现随深度增加而增加的趋势, 与 R_0 变化趋 势相近(图 4)。通过 MPI 与 R_0 相关性拟合得到烃源 岩计算等效镜质体反射率 R_c =0.381 2×MPI+0.502 9, 代入烃源岩 MPI 值计算结果显示: 当烃源岩埋深



Fig.4 Maturity parameters of phenanthrene series compounds changes with depth in source rocks of X oil and gas field in Xihu Sag

<4 200 m 时, R_c 较实测镜质体反射率 R_o 偏高, 且数据点分散, 规律性差; 当烃源岩埋深>4 200 m 时, R_c 与 R_o 吻合较好, 能够反应烃源岩热演化情况 (图 4)。以上分析表明: 西湖凹陷烃源岩在低熟— 成熟度阶段(R_o<0.8%), 菲及其烷基取代物相对含 量受有机质来源及沉积保存环境影响较大^[25], 采 用 MPI 值计算烃源岩和油成熟度效果差, 在成熟— 高熟阶段(R_o>0.8%), 菲及其烷基取代物相对含量 受热演化主控, MPI 值是恢复烃源岩及油成熟度的 有效参数。

3.3 油成熟度估算

基于前文所述西湖凹陷烃源岩饱和烃 C_{29} 规则 甾烷和芳烃菲系列化合物对成熟度响应的差异性, 本区油成熟度恢复可分为 2 步:首先采用 C_{29} 甾烷 20S/(20S+20R)、 C_{29} 甾烷 $\beta\beta/(\alpha\alpha+\beta\beta)$ 值判断油成 熟度区间,若为低熟油,则采用 C_{29} 规则甾烷参数定 性评估其成熟度,若为成熟油,则进一步采用 MPI 值定量计算 R_{c0} 计算结果显示,研究区为成熟油 (图 2),通过 R_{c} =0.381 2×MPI+0.502 9 公式计算油 成熟度主要分布于 0.8%~1.0%,呈现随深度增加成 熟度增大趋势(图 5)。

4 天然气成熟度恢复

4.1 天然气成熟度计算公式构建

天然气成分简单,有效的成熟度判识方法少, 以甲烷碳同位素组成应用最广泛^[10]。前人通过实 际地质样品统计或干酪根物理热模拟数据,建立了 大量甲烷碳同位素组成与 *R*。的关系公式,各研究 区地质条件差异导致各公式有所不同^[10,33]。西湖 凹陷油气勘探程度相对较低,且供气主洼烃源岩埋 深大,钻井取芯相对较少,地质样品数据量不足以 建立甲烷碳同位素与镜质体反射率 *R*。的关系式, 因此,本文采取烃源岩黄金管热模拟实验数据构建 天然气成熟度恢复公式。

西湖凹陷煤、炭质泥岩和泥岩黄金管热模拟实验结果显示(表1),随温度升高,模拟样品的 R_o增加,天然气甲烷碳同位素趋于变重。西湖凹陷烃源岩 R_o<1%时,生气量仅 5 mL/g,尚未进入大量生气期^[34],此阶段模拟气以吸附气为主,为避免吸附气对天然气甲烷碳同位素与 R_o关系的影响,选取



Fig.5 Variation of vitrinite reflectance in source rocks and estimated maturity of oil and gas of X oil and gas field in Xihu Sag

 $R_0>1.0\%$ 的模拟点进行相关性拟合。结果显示 lg R_0 与甲烷碳同位素呈线性相关,煤、炭质泥岩和泥岩3条直线近乎平行(图 6),表明其有机质类型相近,遵循相似的热演化规律,但在相同热演化程度下(对应图中相同 lg R_0 值),模拟生成天然气甲烷碳同位素具有 $\delta^{13}C_1$ 煤> $\delta^{13}C_1$ 炭质泥岩> $\delta^{13}C_1$ 泥岩的特征,且与煤及泥岩相比,炭质泥岩数据点更加分散,表明海陆过渡相煤系烃源岩非均质性强,不同岩性成气母质组成有所差别。基于3种岩性热模拟实验结果,分别构建甲烷碳同位素与镜质体反射率之间的关系公式: $\delta^{13}C_1$ 煤=21.83lg R_0 -38.827、 $\delta^{13}C_1$ 炭质泥岩=21.57lg R_0 -40.18、 $\delta^{13}C_1$ 泥岩=22.875lg R_0 -41.576。

4.2 天然气成熟度估算

基于煤、炭质泥岩和泥岩 3 种岩性热模拟气甲 烷碳同位素组成差异,选取煤和泥岩公式分别计算 天然气 R_o,并作为最小和最大值厘定研究区天然 气成熟度区间。结果显示,煤岩公式计算天然气成 熟度相对较低, R_o主体分布于 0.75%~1.5%,泥岩 公式计算天然气成熟度相对较高, R_o主体分布于 1.0%~2.0%。纵向上,天然气成熟度随埋深增加呈

表 1	西湖凹陷不同岩性烃源岩黄金管热模拟实验
	甲烷碳同位素统计表

Table 1 Methane carbon isotopes in gold tube thermal simulation experiment of different lithological source rocks in Xihu Sag

样品类型	温度/℃	R ₀ /%	甲烷碳同位素/‰
	350	0.80	-36.70
	400	1.20	-40.00
	450	1.82	-35.80
	480	2.52	-31.80
煤	510	3.30	-29.20
	540	3.80	-28.30
	570	4.15	-27.90
	600	4.45	-27.00
	335	0.82	-39.70
	360	1.09	-39.10
	400	1.65	-37.10
炭质泥岩	455	1.93	-33.10
	480	2.30	-32.20
	525	2.56	-30.30
	575	3.24	-30.00
	350	0.80	-47.30
	400	1.20	-37.70
	450	1.82	-32.60
汨山	480	2.52	-29.60
泥石	510	3.30	-27.20
	540	3.80	-26.30
	570	4.15	-25.90
	600	4.45	-24.70







先降低后增大趋势(图 5),揭示了深部和浅部天然 气来源可能存在差别。气藏中天然气甲烷碳同位 素组成并非受热演化作用单一控制,天然气运移、 聚集过程中发生的分馏和混合也是影响碳同位素 组成的重要因素^[35],因此,基于天然气甲烷碳同位 素恢复的成熟度仅为天然气经历一定地质历史过 程的最终结果。

5 油气来源与成藏模式

基于油气成熟度恢复结果,油成熟度最高仅为 1.0%,天然气成熟度多>1.0%(图 6),且油、气成熟 度随埋深变化规律不同,表明油和气具有不同来源。 储层流体包裹体研究显示本区存在2期油气充注, 第1期以液态烃为主,第2期以气态烃为主,充注 时间都在距今2Ma左右^[36],此时,研究区所在斜坡 带次洼平湖组中段烃源岩*R*。普遍达到1.0%,而生 烃主洼*R*。普遍>2.0%^[19],表明斜坡次洼烃源岩处 于生油高峰期,以供应液态烃为主,而生烃主洼烃 源岩则处于大规模生气阶段,气源供应充足。因此, 从油气成熟度角度分析,研究区油主要来自斜坡次 洼成熟烃源岩,天然气主要来自凹陷主洼高熟烃 源岩。

油气成熟度纵向变化规律可以揭示其成藏差 异,以4200m左右为界,油、气成熟度随深度变化 都可划分为2个阶段。其中,4200m以浅油样成 熟度差异不大,但都高于同深度烃源岩样品,表明 4 200 m 以浅油主要来自深部演化程度更高的烃源 岩,属于下生上储、垂向运移聚集成藏模式;4200m 以深油样成熟度随深度增大而增加,且与同深度烃 源岩成熟度相当,此时,烃源岩已进入生油高峰期, 油源充足,属于自生自储、就近聚集成藏模式。受 天然气充注差异或运移效应影响^[37],天然气成熟度 纵向分布规律较复杂,4200m以浅天然气样品成 熟度随深度增加而降低,天然气成熟度远高于对应 层段油样和烃源岩,揭示天然气为凹陷主洼供气、 侧向远距离运移聚集成藏模式,同时,远源气与先 存油藏混合形成次生凝析气藏; 4 200 m 以深天然 气样品较少,规律性不明显,推测可能同时存在斜 坡次洼和凹陷主洼双源供气的混合来源成藏模式。 综合以上分析,油近源成藏模式下,斜坡带次洼烃 源岩处于生油高峰期,是主要供油区,环次洼带是 油有利勘探区;天然气远源供气模式下,凹陷主洼 烃源岩处于生气高峰期,是主要供气区,自主洼向 斜坡带均为天然气有利勘探区带,勘探潜力大。

6 结论

(1)西湖凹陷海陆过渡背景下,规则甾烷 C₂₉参

数仅适用于低熟一成熟阶段油成熟度定性估算;甲 基菲指数 MPI 可定量恢复成熟一高熟油成熟度, 公式为:计算等效镜质体反射率 R_c=0.381 2×MPI+ 0.502 9,计算油成熟度分布于 0.8%~1.0%, 为烃源 岩成熟阶段形成。

(2)基于不同岩性烃源岩热模拟实验数据建立 天然气碳同位素与 R_o 关系是西湖凹陷天然气成熟度 恢复的有效方法,对应关系式为: $\delta^{13}C_1$ 煤=21.83lg R_o -38.827、 $\delta^{13}C_1$ 炭质泥岩=21.57lg R_o -40.18、 $\delta^{13}C_1$ 泥 岩=22.875lg R_o -41.576,计算天然气成熟度 R_c 分布 于 1.0%~2.0%,为烃源岩成熟—过成熟阶段形成。

(3)研究区油和气成熟度差异大,且垂向变化 规律不一致,体现了油、气来源和成藏模式不同。 油以斜坡次洼供烃,近源、垂向运移成藏为主,斜坡 带次洼是主要供油区,环次洼带是油有利勘探区; 气以凹陷主洼供烃,远源、侧向运移成藏为主,自主 洼向斜坡带都为天然气有利勘探区带。

参考文献:

- 张功成,王琪,苗顺德,等.中国近海海陆过渡相烃源岩二元 分布模式:以珠江口盆地白云凹陷为例 [J]. 天然气地球科学, 2014, 25(9): 1299-1308.
 ZHANG G C, WANG Q, MIAO D S, et al. The duality distribution pattern of marine-continental transitional hydrocarbon source rocks: a case study from Baiyun Sag in Pearl River Mouth Basin, China offshore[J]. Natural Gas Geoscience, 2014, 25(9): 1299-1308.
- [2] 戴金星, 吴伟, 房忱琛, 等. 2000 年以来中国大气田勘探开发 特征 [J]. 天然气工业, 2015, 35(1): 1-9.
 DAI J X, WU W, FANG C C, et al. Exploration and development of large gas fields in China since 2000[J]. Natural Gas Industry, 2015, 35(1): 1-9.
 [3] 姜亮. 东海陆架盆地油气资源勘探现状及含油气远景 [J]. 中
- [5] 安党. 东海南采盆地油气黄原胡採现从及苫油气起量 [J]. 中 国海上油气 (地质), 2003, 15(1): 3-7. JIANG L. Exploration status and perspective of petroleum resources in East China Sea Shelf Basin[J]. China Offshore Oil and Gas, 2003, 15(1): 3-7.
- [4] 杨鹏程,刘峰,沈珊,等.西湖凹陷平北地区平湖组煤系烃源 岩生烃潜力研究 [J].海洋地质与第四纪地质,2020,40(4): 139-147.

YANG P C, LIU F, SHEN S, et al. A study on the hydrocarbon generation potential of the coal-bearing source rocks in the Pinghu Formation of Pingbei area, the Xihu Sag[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2020, 40(4): 139-147.

[5] 魏恒飞,陈践发,陈晓东,等.西湖凹陷平湖组滨海型煤系烃 源岩发育环境及其控制因素 [J].中国地质, 2013, 40(2): 487-497.

WEI H F, CHEN J F, CHEN X D, 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.

[6] 沈玉林,秦勇,郭英海,等.基于米氏聚煤旋回划分的西湖凹 陷平湖组煤系烃源岩发育特征 [J].石油学报,2016,37(6): 706-714.

> SHEN Y L, QIN Y, GUO Y H, et al. Development characteristics of coal-measure source rocks divided on the basis of Milankovich coal accumulation cycle in Pinghu Formation, Xihu Sag[J]. Acta Petrolei Sinica, 2016, 37(6): 706-714.

- [7] 赵静,黄志龙,刘春锋,等.西湖凹陷平北地区煤系烃源岩识别与分布[J]. 岩性油气藏, 2021, 33(5): 95-106.
 ZHAO J, HUANG Z L, LIU C F, et al. Identification and distribution characteristics of coal-bearing source rocks in Pingbei area, Xihu Sag[J]. Lithologic Reservoirs, 2021, 33(5): 95-106.
- [8] 谭思哲,侯凯文,覃军,等西湖凹陷平湖组不同煤系烃源岩热 解生烃差异及其在油气勘探中的应用[J].吉林大学学报(地 球科学版),2020,50(4):968-978.

TAN S Z, HOU K W, QIN J, et al. Differences in pyrolysis hydrocarbon generation and hydrocarbon exploration of different coal-measures source rocks in Pinghu Formation, Xihu Sag [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2020, 50(4): 968-978.

- [9] PETER K E, MOLDOWAN J M. The Biomarker Guide: Interpreting Molecular Fossils in Petroleum and Ancient Sediments[M]. New Jersey: Prentice Hall Inc, 1993.
- [10] 陈建平,王绪龙,陈践发,等.甲烷碳同位素判识天然气及其 源岩成熟度新公式 [J].中国科学:地球科学,2021,51(4):560-581.

CHEN J P, WANG X L, CHEN J F, et al. New equation to decipher the relationship between carbon isotopic composition of methane and maturity of gas source rocks[J]. Science China: Earth Sciences, 2021, 51(4): 560-581.

- [11] 李友川,孙玉梅,兰蕾.用乙烷碳同位素判别天然气成因类型 存在问题探讨 [J]. 天然气地球科学, 2016, 27(4): 654-664.
 LI Y C, SUN Y M, LAN L, et al. Discussion on the recognition of gas origin by using ethane carbon isotope[J]. Natural Gas Geoscience, 2016, 27(4): 654-664.
- [12] 苏奥,陈红汉,王存武等. 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 A, CHEN H H, WANG C W, et al. 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.
- [13] 王勇刚,田彦宽,詹兆文,等.东海盆地西湖凹陷原油中金刚 烷类化合物特征及意义[J].天然气地球科学,2019,30(4): 582-592.

WANG Y G, TIAN Y K, ZHAN Z W, et al. Characteristics and implications of diamondoids in crude oils from the Xihu Depression, East Sea Basin, China[J]. Natural Gas Geoscience, 2019, 30(4): 582-592.

[14] 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 J Y, XU X H, SUN B Q, et al. Oil/gas geochemical character in the Xihu Trough of the East China Sea[J]. Offshore oil, 2000, 20(2): 1-7.

- [15] 陈琳琳,孙伯强,王乐闻,等.西湖凹陷中央背斜带北部花港 组天然气特征及气源分析 [J]. 海洋石油, 2017, 37(1): 21-29. CHEN L L, SUN B Q, WANG L W, et al. Characteristics and source of natural gas from Huagang Formation in north segment of central anticline belt of Xihu Sag[J]. Offshore oil, 2017, 37(1): 21-29.
- [16] 张国华. 西湖凹陷高压形成机制及其对油气成藏的影响 [J]. 中国海上油气, 2013, 25(2): 1-8.
 ZHANG G H. Origin mechanism of high formation pressure and its influence on hydrocarbon accumulation in Xihu Sag[J]. China Offshore Oil and Gas, 2013, 25(2): 1-8.
- [17] 高伟中,孙鹏,田超,等.东海盆地西湖凹陷地应力场与油气运移关系探讨 [J]. 油气藏评价与开发, 2015, 5(1): 1-6.
 GAO W Z, SUN P, TIAN C, et al. Relation between crustal stress field and hydrocarbon migration in Xihu Sag, East China Sea Basin[J]. Reservoir Evaluation and Development, 2015, 5(1): 1-6.
- [18] 周心怀,高顺莉,高伟中,等.东海陆架盆地西湖凹陷平北斜 坡带海陆过渡型岩性油气藏形成与分布预测[J].中国石油勘 探,2019,24(2):153-164.

ZHOU X H, GAO S L, GAO W Z, et al. Formation and distribution of marine-continental transitional lithologic reservoirs in Pingbei Slope Belt, Xihu Sag, East China Sea Shelf Basin[J]. China Petroleum Exploration, 2019, 24(2): 153-164.

- [19] 沈伟锋, 于仲坤, 刁慧, 等. 西湖凹陷热流演化史模拟及成藏 意义 [J]. 中国海上油气, 2020, 32(1): 42-53.
 SHEN W F, YU Z K, DIAO H, et al. Simulation of heat flow evolution history in Xihu Sag and its significance for hydrocarbon accumulation[J]. China Offshore Oil and Gas, 2020, 32(1): 42-53.
- [20] 蔡华,秦兰芝,刘英辉.西湖凹陷平北斜坡带海陆过渡相源-汇 系统差异性及其耦合模式 [J]. 地球科学, 2019, 44(3): 880-897.

CAI H, QIN L Z, LIU Y H, et al. Differentiation and coupling model of source-to-sink systems with transitional facies in Pingbei Slope of Xihu Sag[J]. Earth Science, 2019, 44(3): 880-897.

[21] 于水.西湖凹陷西斜坡平湖组烃源岩沉积成因分析 [J]. 地球 科学, 2020, 45(5): 1722-1736.

> YU S. Depositional genesis analysis of source rock in Pinghu Formation of western slope, Xihu Depression[J]. Earth Science, 2020, 45(5): 1722-1736.

[22] 朱扬明,周洁,顾圣啸,等.西湖凹陷始新统平湖组煤系烃源 岩分子地球化学特征 [J].石油学报, 2012, 33(1): 32-39.
ZHU Y M, ZHOU J, GU S X, et al. Molecular geochemistry of Eocene Pinghu Formation coal-bearing source rocks in the Xihu Depression, East China Sea Shelf Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2012, 33(1): 32-39.

[23] 丁飞,刘金水,蒋一鸣,等.东海陆架盆地西湖凹陷孔雀亭区

油气来源及运移方向 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 2021, 41 (2): 156-165.

DING F, LIU J S, JIANG Y M, et al. Source and migration direction of oil and gas in Kongqueting area, Xihu Sag, East China Sea Shelf Basin [J], Marine Geology & Quaternary Geology, 2021, 41 (2): 156-165.

- [24] 戴金星. 天然气中烷烃气碳同位素研究的意义 [J]. 天然气工 业, 2011, 31(12): 1-6.
 DAI J X. Significance of the study on carbon isotopes of alkane gases[J]. Natural Gas Industry, 2011, 31(12): 1-6.
- [25] PHILP R P. Fossil Fuel Biomarkers-Aplication and Spectra [M]. Amsterdam; Elsevier, 1985.
- [26] MACKENZIE A S, PATIENCE R L, MAAXWELL J R, et al. Molecular parameters of maturation in the Toarcian shales, Paris Basin, France-I. Changes in the configurations of acyclic isoprenoid alkanes, steranes and triterpanes[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1980, 44(11): 1709-1721.
- [27] ALEXANDER R, KAGI R I, ROWLAND S J, et al. The effects of thermal maturity on distributions of dimethylnaphthalenes and trimethylnaphthalenes in some ancient sediments and petroleums[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1985, 49(2): 385-395.
- [28] 李颖,朱扬明,郝芳,等.四川盆地北部上三叠统须家河组高 成熟煤系烃源岩芳烃热演化与应用[J].中国科学:地球科学, 2015,45(7):953-962.

LI Y, ZHU Y M, HAO F, et al. Thermal evolution and applications of aromatic hydrocarbons in highly mature coal-bearing source rocks of the Upper Triassic Xujiahe Formation in the northern Sichuan Basin[J]. Science China: Earth Sciences, 2015, 45(7): 953-962.

- [29] SZCZERBA M, ROSPONDEK M J. Controls on distributions of methylphenanthrenes in sedimentary rock extracts: critical evaluation of existing geochemical data from molecular modeling[J]. Organic Geochemistry, 2010, 41(12): 1297-1311
- [30] RADKE M. Application of aromatic compounds as maturity indicators in source rocks and crude oils[J]. Marine & Petroleum Geology, 1988, 5(3): 224-236
- [31] RADKE M, VRIEND S P, RAMANAMPISOA L R. Alkyldibenzofuranes in terrestrial rocks: influence of organic facies and

maturation[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2000, 64(2): 275-286

- [32] 沈忠民,魏金花,朱宏权,等. 川西坳陷煤系烃源岩成熟度特 征及成熟度指标对比研究 [J]. 矿物岩石, 2009, 29(4): 83-88. SHEN Z M, WEI J H, ZHU H Q, et al. Comparative research on maturity and its indicators of coal measure source rock from West Sichuan Basin Depression[J]. Mineralogy and Petrology, 2009, 29(4): 83-88.
- [33] 刘文汇, 徐永昌. 煤型气碳同位素演化二阶段分馏模式及机 理 [J]. 地球化学, 1999, 28(4): 359-366.
 LIU W H, XU Y C. A two-stage model of carbon isotopic fractionation in coal-gas[J]. Geochimica, 1999, 28(4): 359-366.

[34] 刁慧,刘金水,侯读杰,等.中国近海断-坳转换期煤系烃源岩特征-以西湖凹陷平湖组烃源岩为例 [J].海洋地质与第四纪地质,2019,39(6):102-114.
 DIAO H, LIU J S, HOU D J, et al. Coal bearing source rocks

formed in the transitional stage from faulting to depression nearshore China: a case from the Pinghu Formation in the Xihu Sag[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2019, 39(6): 102-114.

- [35] 刘文汇, 王杰, 腾格尔, 等. 油气同位素地球化学研究现状与 进展 [J]. 地质学报, 2015, 89(S1): 160-163.
 LIU W H, WANG J, TENG G E, et al. Research status and progress of oil and gas isotope geochemistry[J]. Acta Geologica Sinica, 2015, 89(S1): 160-163.
- [36] 刁慧, 邹玮, 李宁, 等. 东海盆地西湖凹陷武云亭构造油气来 源与成藏模式 [J]. 地质科技通报, 2020, 39(3): 110-119.
 DIAO H, ZOU W, LI N, et al. Hydrocarbon origin and reservoir forming model of Wuyunting Structure in Xihu Depression, East China Sea Basin[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2020, 39(3): 110-119.
- [37] 张玉红,周世新,左亚彬.碳同位素在天然气运移路径示踪中 的应用研究进展[J].矿物岩石地球化学通报,2018,37(6): 1198-1204.

ZHANG Y H, ZHOU S X, ZUO Y B. A review of the application of carbon isotopes in tracing the pathway of natural gas migration[J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2018, 37(6): 1198-1204.

Maturity recovery of oil and gas from marine-continental source rock and its application of Xihu Sag, East China Sea

DING Fei, LI Ning, DIAO Hui, YU Zhongkun, WANG Wanli, YU Qing (Shanghai Branch of CNOOC (China) Ltd., Shanghai 200335, China)

Abstract: The lithology of marine-continental transitional coal source rocks is complex and changeable, and the maturity recovery of oil and gas is difficult. Taking an oil and gas field of Xihu Sag as an example, the recovery method of oil and gas maturity is established by means of vitrinite reflectance of source rock, chromatographic mass spectrometry of saturated hydrocarbon and aromatic hydrocarbon and carbon isotope analysis of thermally simulated natural gas. The maturity of oil and gas is calculated and the source of oil and gas is clarified. The results show that oil maturity is mainly distributed between 0.8% and 1.0%, which is mature oil. The maturity of natural gas is mainly distributed between 1.0% and 2.0%, belonging to mature-high mature gas. The maturity of oil and natural gas in the same interval is different, which reveals the difference in the source and accumulation process of oil and natural gas. Based on the thermal evolution history of source rocks, it is considered that the oil in this area mainly comes from the slope sub-depression, and the ring sub-depression zone is the favorable exploration area. Natural gas mainly comes from the main depression of the sag, and the slope zone is a favorable zone for natural gas, with great exploration potential.

Key words: marine-continental transitional face; source rock; maturity of oil and gas; origin of oil and gas; Xihu Sag