

陈晓东, 蒋一鸣, 漆滨汶, 等. 东海丽水凹陷古新统非典型湖相烃源岩及油气特征[J]. 海洋地质前沿, 2021, 37(4): 25-38.

东海丽水凹陷古新统非典型湖相烃源岩及油气特征

陈晓东, 蒋一鸣, 漆滨汶, 于仲坤

(中海石油(中国)有限公司上海分公司, 上海 200335)

摘要:东海陆架盆地丽水凹陷主力烃源岩为古新统月桂峰组湖相泥岩, 已发现油气以天然气为主, 含少量凝析油, 与以原油为主的中国东部典型断陷湖盆存在差异。对月桂峰组湖相泥岩进行了综合评价, 发现其存在不能生烃的死碳, 烃源岩的热演化成熟度与烃源岩形成石油的转化参数之间存在差异。月桂峰组有机质主要来源于陆源有机质, 湖相水生生物来源的比例变化较大。烃源岩地球化学特征与典型湖相烃源岩存在差异。总结了湖盆类型对烃源岩的控制因素以及不同湖盆类型烃源岩形成油气的主要特征, 并与月桂峰组湖相泥岩及已发现油气特征进行了对比, 表明月桂峰组沉积期发育过补偿和平衡补偿湖盆。月桂峰组泥岩为非典型湖相烃源岩。

关键词:非典型湖相烃源岩; 古新统月桂峰组; 湖盆类型; 过补偿; 平衡补偿; 丽水凹陷; 东海

中图分类号: P744.4; P618.13

文献标识码: A

DOI: 10.16028/j.1009-2722.2021.039

0 引言

东海陆架盆地丽水凹陷的勘探工作始于 20 世纪 50 年代, 是目前该盆地已有油气发现的 2 个凹陷之一, 已发现多个含油气构造^[1], 建成 1 个油气田。丽水凹陷共有 3 套烃源岩, 分别是下古新统月桂峰组湖相泥岩、上古新统灵峰组海相泥岩及上古新统明月峰组海相泥岩和煤。丽水凹陷发现的油气以天然气为主, 含少量凝析油。尽管对已发现油气的来源有不同认识, 但目前基本公认古新统月桂峰组湖相泥岩是主力烃源岩^[2-3]。近年来, 丽水凹陷始终未获突破性进展, 多口钻井均失利, 其原因除该区储集层物性差以及部分井高含 CO₂ 等因素外, 从源控论的角度出发, 对丽水凹陷主力烃源岩的生烃潜力和分布范围存在争议直接影响了该区的勘探部署。

鉴于海上钻井的特殊性, 仅仅通过获得的有限岩石样品进行地球化学分析评价烃源岩具有很大的局限性。需要从盆地沉积充填演化的角度去了解控制烃源岩发育分布的因素, 进而预测有效烃源

岩的分布以及成烃类型, 服务于勘探部署。CARROLL 等^[4-7]从湖相地层的相组合类型出发, 通过划分出的过补偿、平衡补偿和欠补偿 3 种湖盆类型解释沉积类型对湖相烃源岩主要特征的影响, 从而提供一种地质框架, 预测湖相烃源岩特征和分布以及可能生成的油气类型与特征。

本文从已钻遇的月桂峰组烃源岩和已发现油气的地球化学特征出发, 与不同湖盆类型发育的烃源岩特征和形成的油气类型与特征进行对比, 探讨月桂峰组沉积期湖盆类型, 进而预测其分布和油气潜力。

1 区域地质背景

丽水凹陷位于东海陆架盆地西部坳陷带的西南端, 凹陷整体为 NE-SW 向, 其 NE 向延伸方向与椒江凹陷毗邻, SW 方向为台西盆地, 东部以雁荡低凸起与福州凹陷相邻, 西北部为闽浙隆起区(图 1a)。丽水凹陷可以进一步划分为 5 个亚二级和三级构造单元, 分别是丽西次凹、丽东次凹、丽南次凹、丽南凸起和灵峰潜山带(图 1b)^[8]。其中, 丽西次凹面积最大; 丽南次凹面积最小, 也是目前尚无油气发现的次凹。

丽水凹陷具有复合断陷的构造特征, 由东断西超的半地堑和双断式的地堑拼接而成。共分为 4

收稿日期: 2021-02-20

资助项目: “十三五”国家科技重大专项“东海深层大型气田勘探评价技术”(2016ZX05027)

作者简介: 陈晓东(1967—), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事油气地球化学和含油气系统方面的研究工作. E-mail: chenxd1@cnooc.com.cn

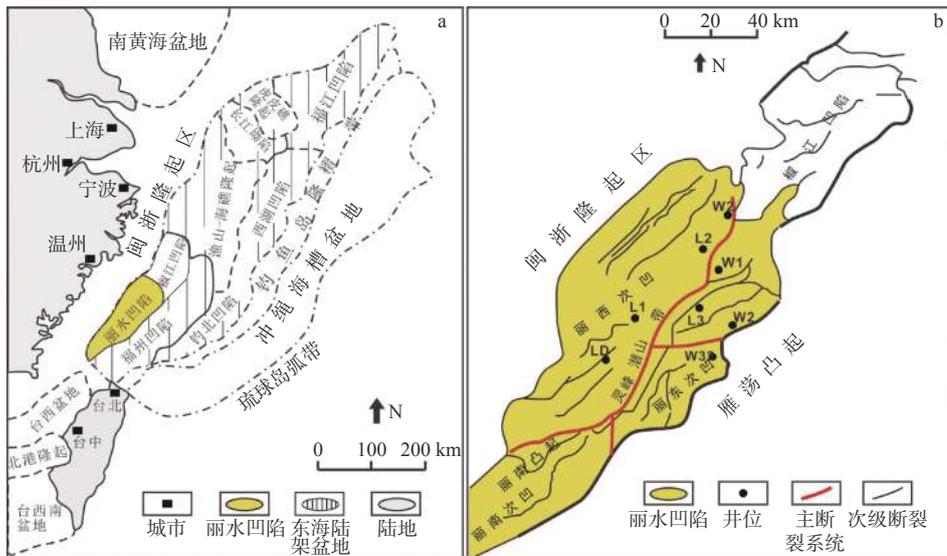


图1 丽水凹陷构造位置及构造单元划分

Fig.1 Structural location and division of structural units of Lishui Sag

个构造演化阶段:白垩纪—中新世晚期的断陷阶段(Tg—T85)、晚古新世的断-坳转换阶段(T85—T80)、始新世的坳陷阶段(T80—T20)和中新世以后的区域沉降阶段(T20—现今)(图2)。丽水凹陷烃源岩发育时期与构造演化阶段具有较好的对应关系,烃源岩为断陷期和断坳转换期沉积的古新统,从下到上分别为月桂峰组、灵峰组和明月峰组^[8]。月桂峰组为湖相沉积,以灰色、灰黑色泥岩为主,夹薄层细砂岩,局部灰色泥岩与粉砂质泥岩或泥质粉砂岩互层。灵峰组和明月峰组均可划分为上下两段,且均为海相沉积。灵峰组下段以砂岩为主,夹少量灰色泥岩,砂岩粒度稍粗;灵峰组上段以大套灰色、灰黑色泥岩与粉砂质泥岩及泥质粉砂岩互层为主,夹少量薄层砂岩;明月峰组以灰色泥岩及泥质粉砂岩为主,夹中、厚层砂岩,局部发育薄煤层^[8](图2)。

2 月桂峰组烃源岩特征

2.1 烃源岩评价

丽水凹陷月桂峰组烃源岩为典型的陆相沉积,因此,采用石油行业标准《陆相烃源岩地球化学评价方法》^[9]及中国海油企业标准《烃源岩地球化学定量评价规范》^[10]进行烃源岩评价。

月桂峰组泥岩总有机碳(TOC)为0.47%~4.24%,平均为1.86%,超过60%的样品TOC值>0.6%;生烃潜力 S_1+S_2 为0.62~9.46 mg/g,平均为2.05 mg/g,

超过30%的样品生烃潜力>2 mg/g;氢指数HI为33~454 mg/gTOC,平均为175 mg/gTOC,超过20%的样品氢指数>200 mg/gTOC。

月桂峰组泥岩干酪根元素组成为2组,一组样品H/C原子比为0.9~1.1, O/C原子比为0.08~0.1,为II型与III₁型干酪根;另一组样品H/C原子比仅为0.6, O/C原子比也很低(<0.05),已经很难判识其原始有机质类型。月桂峰组泥岩干酪根 $\delta^{13}C$ 值分布范围为-28‰~-26‰,干酪根类型为II型。泥岩干酪根显微组分镜下鉴定没有发现腐泥组分,镜质组仅占15%~30%,壳质组高达70%,但壳质组中以腐殖无定型体为主,占有有机显微组分的60%~80%,而真正的壳质组仅为5%~8%,说明月桂峰组泥岩中有相当的陆源有机质。综合有机显微组分、干酪根H/C原子比、碳同位素和热解氢指数,有机质类型以II—III₁型为主。月桂峰组湖相泥岩总体上为中等—好烃源岩。

进一步分析不同参数确定的烃源岩成熟门限,发现存在一定的差异(图3)。热成熟度参数有2种:①用于指示石油形成阶段的“形成”或“转化”参数(与热应力强度无关),如H/C原子比;②用于描述温度/时间相对强度的“热应力”参数,如镜质体反射率 R_o 值。含有不同干酪根类型的烃源岩在给定的H/C原子比下可以产生同等数量的原油,但 R_o 可以不同^[11]。氯仿沥青“A”和有机碳的比值(“A”/TOC)反映有机质向沥青的转化程度,总烃和有机碳的比值(HC/TOC)反映有机质向石油的转化程度,这2个指标与H/C原子比一样,用于指示石油形成

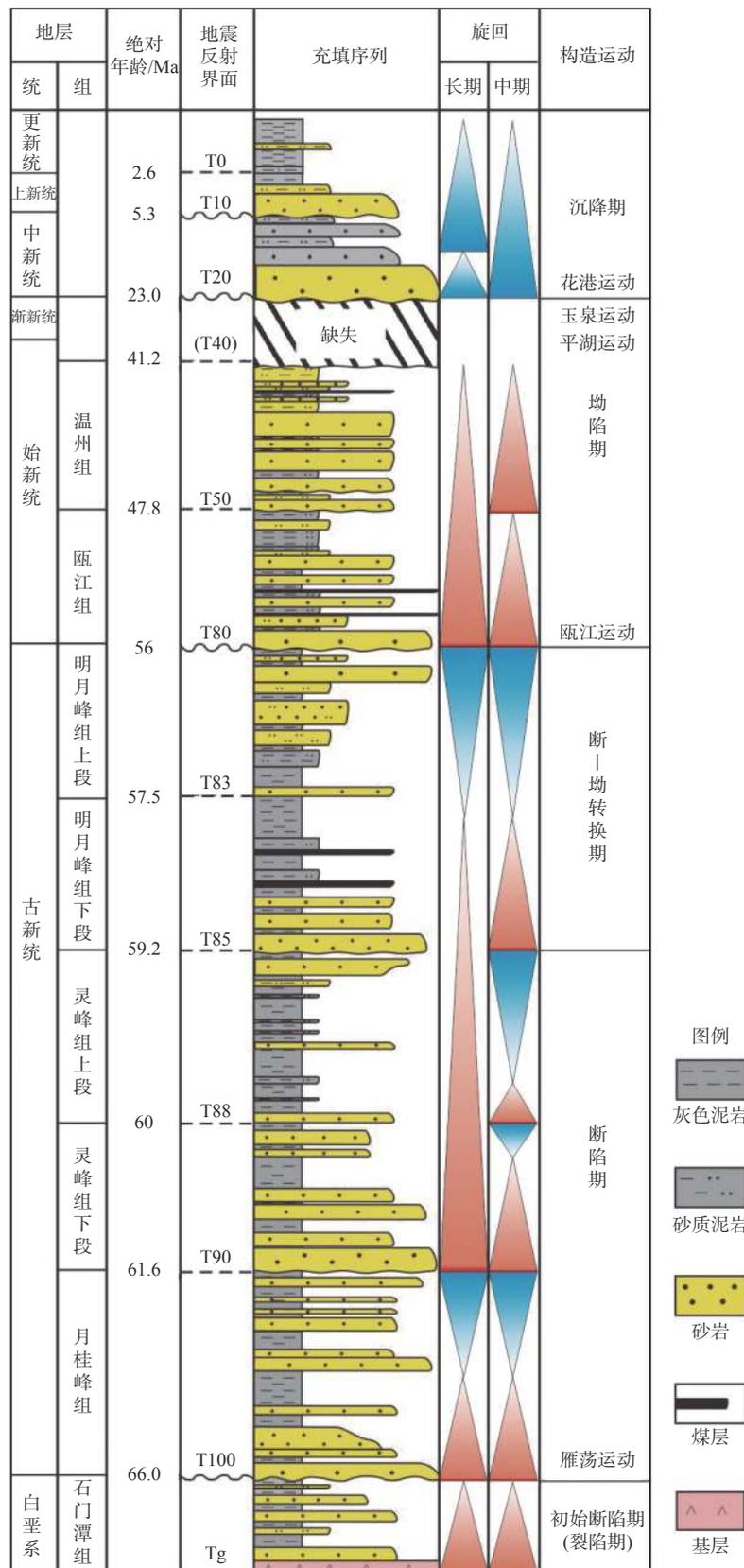


图 2 丽水凹陷地层综合柱状图

Fig.2 Integrated stratigraphic column of Lishui Sag

阶段的有机质“转化”参数。从图 3 中可以看出, WZ26 井、WZ13 井以及 LS35 井基于可溶有机质

转化率确定的生烃门限值总体上比镜质体反射率揭示的门限深度深 500~800 m, 同时, 这些井烃源

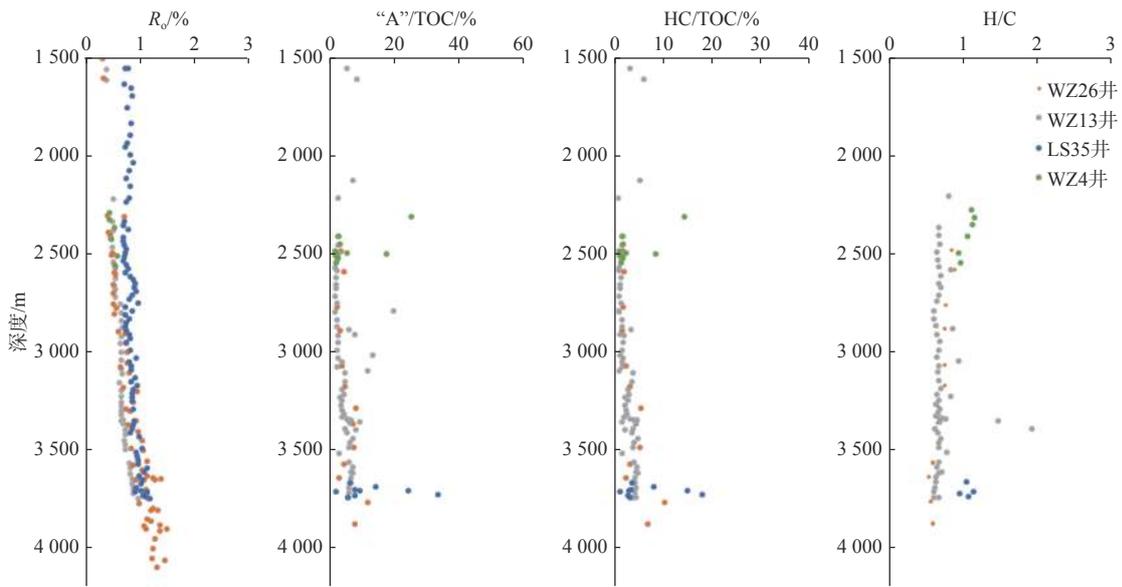


图3 丽水凹陷热演化剖面

Fig.3 Thermal evolution profiles in Lishui Sag

岩干酪根 H/C 比值在 R_o 进入成熟门限以后还保留有较高的 H/C 比值, 与较低的 “A”/TOC、HC/TOC 比值相一致, 表明局部地区烃源岩的生烃转化晚于以 R_o 为标准的成熟度演化。考虑到通常是利用 R_o 揭示的门限深度来确定有效生烃的烃源岩体积, 这导致资源量预测偏乐观。

另外, 在运用图解法^[12]分析大量热解数据时, 也在月桂峰组湖相泥岩样品中发现异常(图4)。不同井点样品有机碳与热解参数 S_2 交汇于不同位置, 分别具有不同的线性趋势, 反映处于不同有机相, 并且没有交汇于原点, 趋势线在有机碳轴上的截距意味着有机碳中存在不能生烃的死碳^[13], 在 S_2 轴上的地质意义则是有机质在排烃以前必须达到的吸附量。在进行生烃潜力评价的过程中, 在遵循已有的行业标准评价烃源岩时, 需要在分析化验获得的有机碳含量扣除死碳以后再进行烃源岩丰度评价。

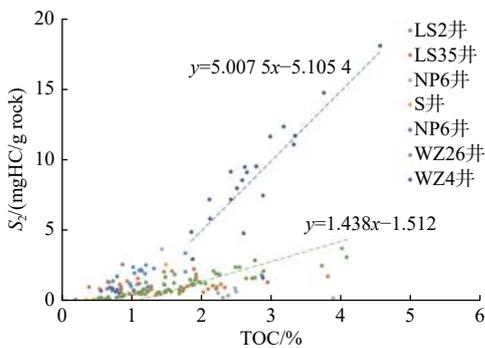


图4 丽水凹陷月桂峰组泥岩热解特征

Fig.4 Pyrolysis characteristics of Yueguifeng Formation mudstones in Lishui Sag

2.2 烃源岩有机质来源和沉积环境

SCHNEIDER 等^[14]和 SONG 等^[15]对常用的热解类型指数 S_3/S_2 进行了新的解释, 用 RE TAR (热解 S_3 峰与 S_2 峰比值, 即 S_3/S_2) 表示陆源有机质与水生有机质比率, 该比值 < 1 表示有机质主要来源于水生生物。丽水凹陷月桂峰组泥岩的 RE TAR 比值大多数 > 1 , 仅少数样品 < 1 , 并且 RE TAR < 1 的样品分布并非集中在某一井点, 也没有集中在月桂峰组的某个层段。RE TAR < 1 的样品在不同井点的分布差异, 说明湖盆不同位置沉积的烃源岩有机质组成中陆源有机质与水生有机质的比例存在差异, RE TAR < 1 的样品在月桂峰组不同层段(即不同深度)的不均一分布说明在月桂峰期湖盆不同演化阶段形成的烃源岩有机质组成中陆源有机质与水生有机质的比率有变化。

COLLISTER 和 WAVREK^[16]通过饱和烃碳同位素特征来研究烃源岩沉积的水体环境, 发现来自典型水体分层湖盆样品的饱和烃碳同位素出现明显亏损(即 $-30\text{‰} \sim -35\text{‰}$), 而月桂峰组湖相泥岩样品饱和烃碳同位素均重于 -30‰ , 说明目前钻井钻遇的月桂峰组沉积期湖盆没有水体分层, 即目前尚未钻遇月桂峰组地层的还原相带。

正构烷烃分布和丰度可以反映烃源岩的有机质来源, 短链低碳数正构烷烃 ($< nC_{20}$) 主要存在于藻类和微生物中, 而长链的高碳数正构烷烃 ($> nC_{23}$) 则指示陆源植物蜡和孢粉等输入。目前钻遇的月桂峰组烃源岩的短链正构烷烃丰度较高, ($C_{21}+$

$C_{22}/(C_{28}+C_{29})$ 比值为 1.7~2.7, 指示水生有机物的输入量较高。较低的 $\Sigma C_{21-}/\Sigma C_{21+}$ 比值 (<1.0) 指示陆源高等植物输入, 较高的 $\Sigma C_{21-}/\Sigma C_{21+}$ 比值 (>1.0) 指示水生细菌和藻类输入。目前钻遇的月桂峰组烃源岩的 $\Sigma C_{21-}/\Sigma C_{21+}$ 比值为 0.58~1.2, 多数 <1 , 反映陆源有机质相对较多。 $(C_{21}+C_{22})/(C_{28}+C_{29})$ 比值与 $\Sigma C_{21-}/\Sigma C_{21+}$ 比值反映的有机质来源不一致, 可能正是月桂峰组湖相烃源岩有机质多种来源的特殊性。

类异戊二烯烃的分布和丰度可以反映烃源岩沉积过程中的古环境和古水体的氧化还原特征, 部分反映沉积有机质的来源。较低的姥植比 (<0.8) 指示典型的缺氧还原环境, 较高的姥植比 (>3.0) 则反映氧化环境下的陆源有机质输入。对姥植比在 0.8~2.5 区间内的样品, 如果没有其他确定的资料, 不能将姥植比作为古沉积环境的标志^[11]。而月桂峰组烃源岩的姥植比普遍分布范围为 1.0~3.0, 所以, 仅根据姥植比的大小并不能判断丽水凹陷烃源岩沉积时水体的氧化还原条件。 Pr/nC_{17} 与 Ph/nC_{18}

的交汇图可以辅助解释烃源岩有机质来源和古沉积环境。目前钻遇的月桂峰组湖相烃源岩并未显示出大量陆源有机质的贡献, 反而反映水生生物输入优势(图 5), 并且处于弱还原环境。

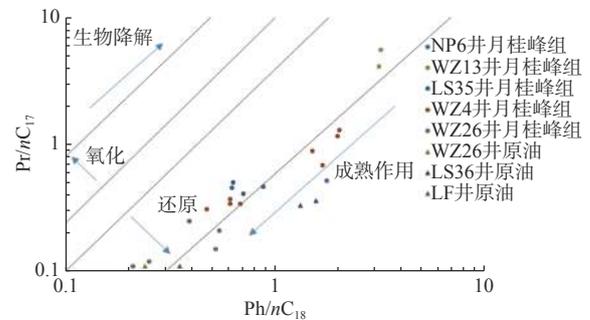


图 5 丽水凹陷原油和月桂峰组烃源岩的姥植烷植烷特征
Fig.5 Characteristics of pristane and phytane in crude oil and source rocks of the Yueguifeng Formation in Lishui Sag

月桂峰组烃源岩生物标志化合物的总体特征是重排甾烷值低, 含较高的伽马蜡烷, C_{27} 甾烷丰度高, 三环萜烷/五环萜烷比值高, 4-甲基甾烷含量很低(图 6)。

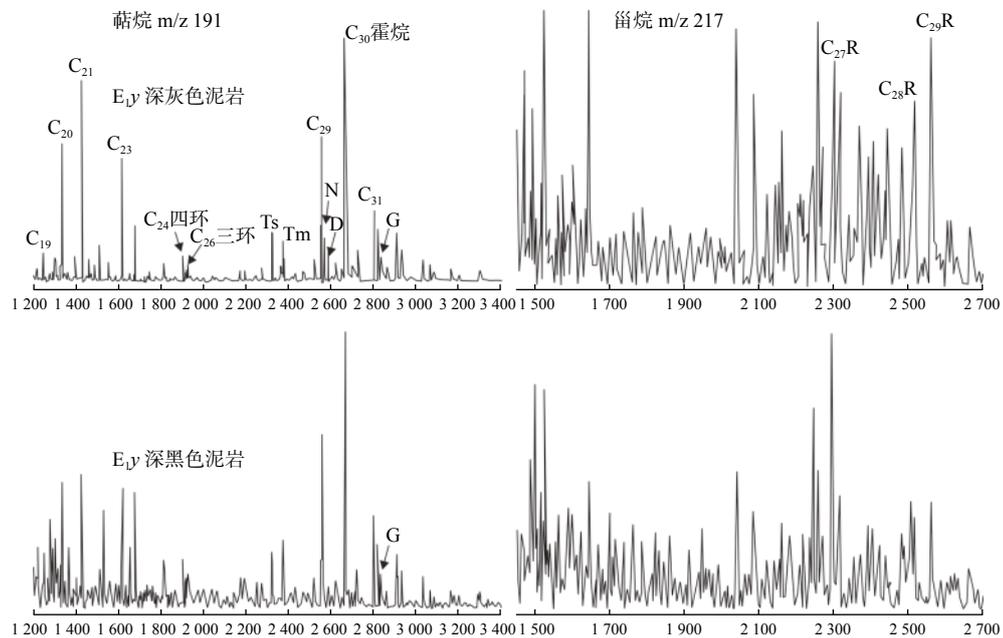


图 6 丽水凹陷月桂峰组泥岩色谱质谱图

Fig.6 GC/MS chromatogram of Yueguifeng Formation mudstones in Lishui Sag

月桂峰组藿烷类的生物标志化合物中, 三环萜烷的丰度比较高, 但藿烷类生物标志化合物的主峰还是 C_{30} 藿烷, C_{31} — C_{35} 升藿烷系列表现出随碳数增加丰度逐渐降低的阶梯状分布, 指示为过渡相沉积环境且表现出底部存在次氧化水体的特征。源于海相碳酸盐源岩水生生物的原油升藿烷指数

($C_{35}S/C_{34}S$) 通常 >0.8 , 而源于陆源有机质的原油升藿烷指数多 <0.6 ^[17]。月桂峰组烃源岩升藿烷指数分布于 0.1~1.2, 表明可能有一定的水生生物输入, 但二萜丰度较高, 反映有陆源有机质的贡献。已钻遇的月桂峰组湖相泥岩的部分生物标志化合物参数交汇图较好地表现了烃源岩的有机质来源和沉

积环境(图7)。藿烷和升藿烷系列特征反映沉积水体是弱氧化还原环境,同样,升藿烷指数($C_{35}S/C_{34}S < 0.8$)与藿烷指数(C_{29} 藿烷/ C_{30} 藿烷 < 0.8)也指示过渡相沉积环境。 $C_{31}R/C_{30}$ 藿烷 < 0.25 通常指示湖相沉积^[17],月桂峰组 $C_{31}R/C_{30}$ 藿烷介于 0.1~1.2,表明月桂峰组沉积时期是非海相沉积,主体为湖相沉积。不同碳数三环萜烷的相对比例和奥利烷与藿烷相对含量表明陆源有机质包含高等植物和被子植物^[18],并且被子植物的比例相对较高(图7c)。规则甾烷 C_{29} 甾烷/ C_{27} 甾烷比值表明水生藻类的贡献较大(图7B)^[19],既有厌氧环境又有弱含氧环境,

C_{27} 、 C_{28} 、 C_{29} 规则甾烷的三角图则表明有机质来源以陆源有机质为主,没有体现出典型湖相烃源岩的特征(图8)。芳烃中的二苯并噻吩与菲的比值则反映了非海相烃源岩的特征。三环萜烷中不同种类的分布差异反映不同类型的湖相环境。GAO等^[20]利用 C_{23} 三环萜烷/(C_{23} 三环萜烷+ C_{30} 藿烷)比值和 C_{24} 四环萜烷/(C_{24} 四环萜烷+ C_{26} 四环萜烷)比值交汇图判别淡水湖相、咸水湖相和海相沉积环境及陆源有机质的输入。 C_{23} 三环萜烷/(C_{23} 三环萜烷+ C_{30} 藿烷)比值 < 0.1 并且同时 C_{24} 四环萜烷/(C_{24} 四环萜烷+ C_{26} 四环萜烷)比值 > 0.6 指示陆源有机质

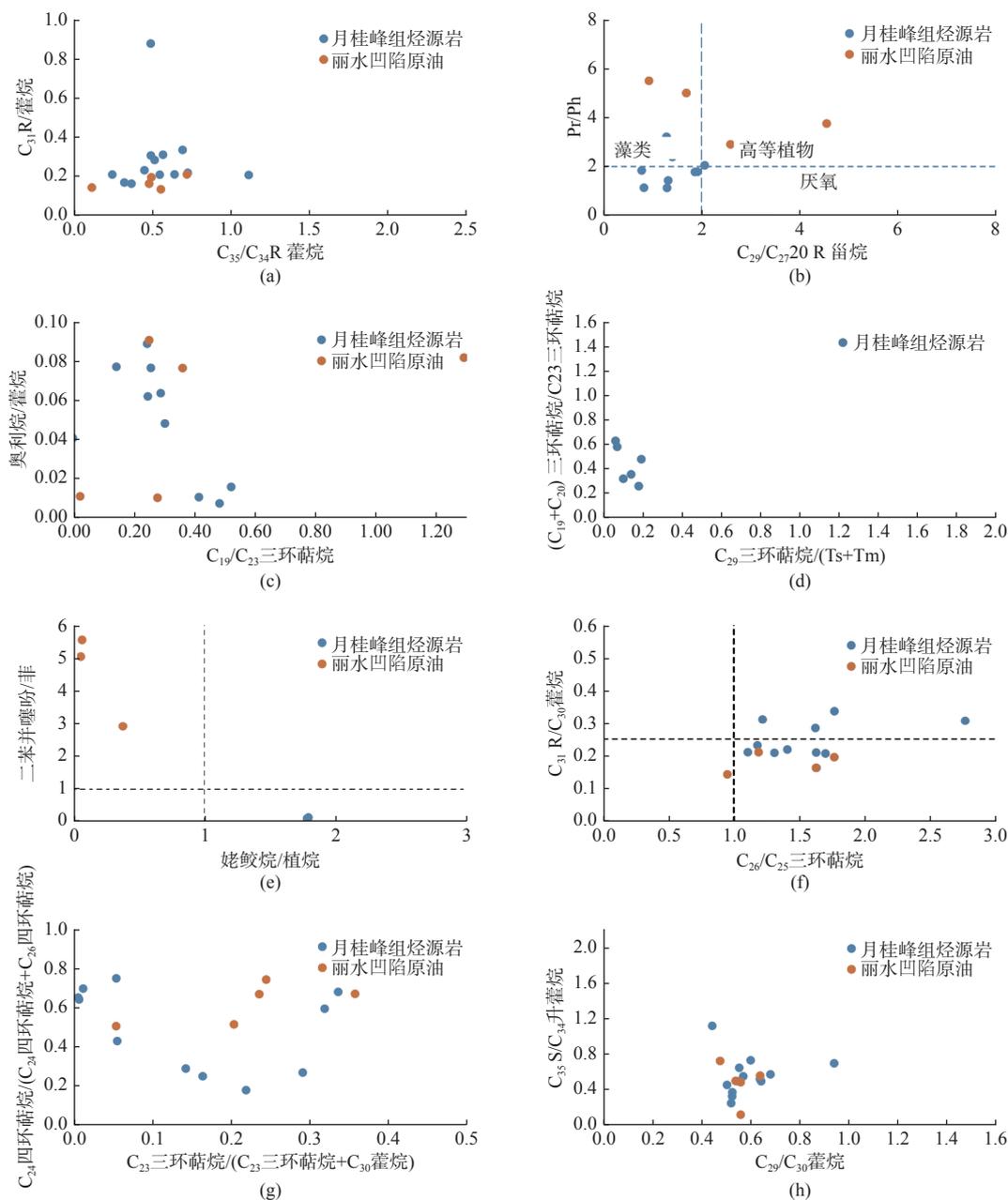


图7 丽水凹陷原油和月桂峰组泥岩生物标志化合物参数特征

Fig.7 Characteristics of biomarker compound parameters of crude oil and mudstone of the Yueguifeng Formation in Lishui Sag

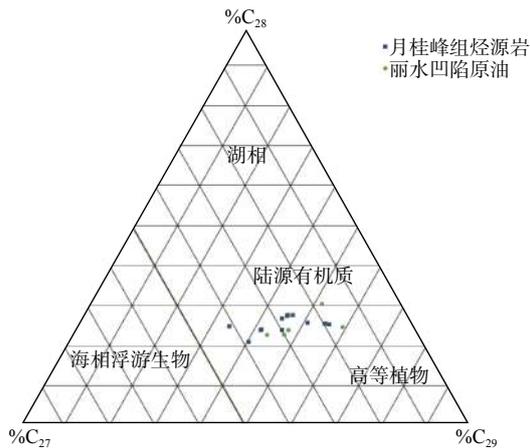


图 8 丽水凹陷原油和月桂峰组烃源岩规则甾烷三角图

Fig.8 Regular sterane triangle diagrams of crude oil and source rocks of the Lauguifeng Formation in Lishui Sag

的输入; 淡水湖相、咸水湖相的 C_{23} 三环萜烷/(C_{23} 三环萜烷+ C_{30} 藿烷) 比值分别为 <0.2 和 $0.1\sim 0.4$, C_{24} 四环萜烷/(C_{24} 四环萜烷+ C_{26} 四环萜烷) 比值分别为 $0.4\sim 0.8$ 和 <0.4 ; 海相的 C_{23} 三环萜烷/(C_{23} 三环萜烷+ C_{30} 藿烷) 比值介于 $0.3\sim 0.5$, C_{24} 四环萜烷/(C_{24} 四环萜烷+ C_{26} 四环萜烷) 比值介于 $0.3\sim 0.6$ ^[20]。多数样品表现为淡水湖相沉积, 少数样品类似于咸水湖相有机质特征。总体来说, 月桂峰期湖盆具有一定的特殊性, 由存在不同的水体沉积环境差异及陆源有机质输入比例差异且样品分布不集中(不同构造位置 and 不同深度上均有分布)推测, 在整个月桂峰组沉积时期, 不同构造位置、不同发育阶段湖盆的有机质来源以及水体的沉积环境都在发生变化。这给预测有效烃源岩的分布及其油气生成类型带来困难。

3 原油地球化学特征

3.1 轻烃组成

从其他地区不同沉积环境的原油轻烃组成^[21]与丽水凹陷原油轻烃的对比(表 1)可以看出, 不同沉积环境烃源岩的原油轻烃组成存在明显的差异。源于滨海沼泽相烃源岩的原油轻烃组成中芳烃含量明显大于湖相原油。丽水凹陷原油轻烃组成中芳烃含量比较低, 与源于湖相烃源岩的特征一致。而同样源于湖相烃源岩的原油的轻烃组成也存在差异性, 板桥凝析油轻烃组成中以异构烷烃含量最高, 正构烷烃与环烷烃的含量相差不大; 锦州 20-2 凝析油轻烃组成则以环烷烃的含量最高, 芳烃含量

远低于滨海沼泽相来源的崖 13-1 气田, 高于丽水凹陷原油, 与板桥凝析油中芳烃含量处于同一级别, 这些既有共性又有差异的特征可能反应了不同地区湖相烃源岩的差异。在丽水凹陷原油轻烃组成中, 芳烃以外的 C_4-C_7 组分含量在各井原油中也存在差异, WZ26 井原油轻烃中异构烷烃含量最高, 其次是正构烷烃; 而 LS36 井和 LF 井原油则是环烷烃的含量最高, 其次分别是异构烷烃和正构烷烃, 说明丽水凹陷原油虽然都源于湖相烃源岩, 但不同构造的原油可能来自不同的烃源岩灶, 各个烃源灶的母质来源有一定差异。

LEYTHAEUSER^[22]认为沉积盆地轻烃中正构烷烃和异构烷烃的比值取决于干酪根的质量。来源于 II 型干酪根的原油轻烃中异构烷烃/正构烷烃的比值要远低于来源于 III 型干酪根的原油。来源于高等植物的轻烃在 C_6 和 C_7 组分中, 以芳烃为主, 环烷烃含量低为特征。丽水凹陷 LS36 和 LF 井原油相对 WZ26 井明显富含环烷烃, 但并不富含芳烃, 说明烃源岩中高等植物生源并不占优势。与之不一致的是 LF 井原油轻烃中的正构烷烃比例均高于 LS36 和 WZ26 井, 反映 LF 井原油烃源灶有机质类型比 LS36 和 WZ26 井原油烃源灶有机质类型好, 充分表现了月桂峰组烃源岩发育的非均质性。

甲基环己烷主要来源于高等植物木质素、纤维

表 1 丽水凹陷原油 C_4-C_7 轻烃组成

Table 1 C_4-C_7 light hydrocarbon composition of crude oil in Lishui Sag

	正构烷烃/%	异构烷烃/%	环烷烃/%	芳烃/%
WZ26井	41.73	43.67	12.24	2.36
丽水凹陷				
LS36井	25.35	30.82	40.86	2.98
LF井	33.12	31.36	33.21	2.31
锦州20-2(淡水湖相)	28.52	24.68	38.39	8.56
	31.43	27.96	33.62	6.99
	30.04	26.71	35.78	7.47
板桥(淡水湖相)	29.21	43.37	18.33	9.12
	24.85	36.32	32.79	6.04
	32.43	38.62	23.75	5.19
	26.33	23.33	36.81	13.53
	29.57	37.44	28.67	4.33
	28.77	36.26	28.26	6.70
崖13-1(滨海沼泽相)	16.87	24.31	33.71	25.11
	21.86	27.63	23.47	27.04
	13.76	15.30	34.10	36.83
	21.21	25.59	28.91	24.38
	16.66	15.87	41.07	26.41

素和糖类,它们是腐殖型母质的主要组成物质,而二甲基环戊烷则主要来自水生生物甾族类和萜类的环状类脂化合物并受成熟度的影响,直链烃(正庚烷)的母源较复杂,主要来自细菌和藻类,也可来自高等植物的链状类脂体^[23],因此,环己烷/甲基环戊烷与甲基环己烷/二甲基环戊烷的比值可以用来评价轻烃源岩有机质的质量^[21]。丽水凹陷 WZ26 井原油环己烷/甲基环戊烷与甲基环己烷/二甲基环戊烷的比值在 3 个样品中最低,可能为该构造烃源灶有机质类型相对较好(图 9);LS36 井原油烃源灶质量可能相对差一些;LF 井原油轻烃的环己烷/甲基环戊烷值较高,而甲基环己烷/二甲基环戊烷值相对较低,轻烃总体特征介于 LS36 井和 WZ26 井之间,考虑到这 3 口井的构造位置,WZ26 井位于丽水东次凹,LS36 井位于丽水西次凹,LF 井则位于分隔丽水东次凹和丽水西次凹的灵峰潜山带,很可能表明 LF 井有丽水东次凹和丽水西次凹 2 个烃源灶供源。

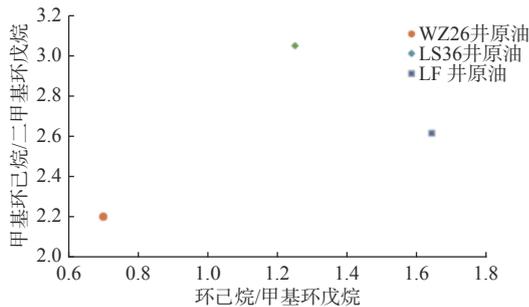


图 9 丽水凹陷原油环烷烃特征

Fig.9 Characteristics of oil cycloalkanes in Lishui Sag

MANGO^[24]提出了原油轻烃稳态催化形成模式,4种C₇轻烃(2-甲基己烷、3-甲基己烷、2,3-二甲基戊烷和2,4-二甲基戊烷)组分之间存在固定的比例关系,尤其是比值 $K_1=(2\text{-甲基己烷}+2,3\text{-二甲基戊烷})/(3\text{-甲基己烷}+2,4\text{-二甲基戊烷})$ 在同源的原油中不随时间发生变化。因此,可以根据C₇烃类形成的动力学模式,来判别原油的亲缘关系。王培荣等^[25]将这个原理应用于塔里木盆地原油的轻烃研究,利用 P_2 和 $\lg(N_2 \times 100/P_3)$ 的交汇图来判别原油

的成因分类(其中, P_2 代表2-甲基己烷和3-甲基己烷组分占C₇轻烃的百分比, N_2 代表1,1-二甲基环戊烷和1,3-二甲基环戊烷(顺,反)3种组分占C₇轻烃百分含量之和; P_3 代表3-乙基戊烷、2,2-二甲基戊烷、2,3-二甲基戊烷、2,4-二甲基戊烷、3,3-二甲基戊烷5种组分占C₇轻烃百分含量之和),结果发现,同一来源的原油可以回归于一条线上,不同类型的原油具有不同的回归直线但斜率相近,主要差异在于截距的不同^[21]。丽水凹陷 WZ26 井和 LF 井的原油轻烃参数值基本处在与塔中坳陷原油回归线平行的一条直线上,而 LS36 井原油则明显与其不同,没有落在同一条直线上,并且也不在 WZ26 井和 LF 井原油投点的延长线上,说明二者可能具有不同的成因机制和有机质来源(图 10)。

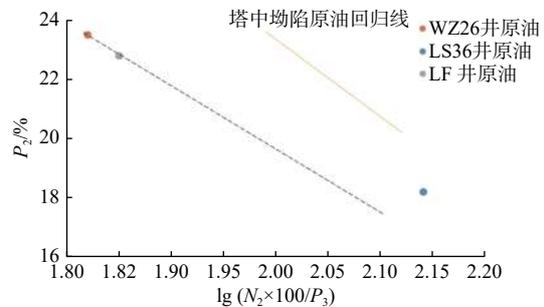


图 10 丽水凹陷原油轻烃组成关系

Fig.10 Light hydrocarbon composition of crude oil in Lishui Sag

3.2 碳同位素

丽水凹陷原油全油的碳同位素特征见表 2,其中 LS36 井最重,为 -26.2% ,WZ26 井最轻,为 -28.7% ,LF 井为 -27.4% ,介于二者之间。全油的碳同位素特征主要与母质来源有关,从构造位置看,LF 井位于丽水东西次凹中间灵峰构造带上,可能意味着东西次凹均提供了油源,所以,全油碳同位素正好介于东西次凹的两井碳同位素值中间。丽水凹陷已发现原油的碳同位素分布已经超出了典型淡水湖相原油的分布范围($<-28\%$)。

表 2 丽水凹陷原油族组成与碳同位素特征

Table 2 Group composition and carbon isotope of crude oil in Lishui Sag

井号	层位	颜色	饱和烃/%	芳烃/%	非烃/%	沥青质/%	全油碳同位素/‰
WZ26	月桂峰组	浅棕色	91.33	2.23	2.06	4.38	-28.7
LS36	明月峰组	黄色	65.79	29.02	4.28	0.90	-26.2
LS36	明月峰组	黄色	72.46	26.81	0.41	0.32	-26.8
LF	太古宙	棕黑色	90.42	4.26	3.11	2.21	-27.4

3.3 原油色谱

丽水凹陷原油的 $\Sigma C_{21-}/\Sigma C_{21+}$ 比值均 > 1.0 , 以 LS36 井最高, 为 11.62~30.72, 反映一定的水生生物来源。

根据丽水凹陷原油的 Pr/nC_{17} 和 Ph/nC_{18} 关系 (图 5), 3 个样品分为 2 个区域, WZ26 井和 LF 井原油为一组, LS36 井原油单独位于成熟度相对低的方向, 且均位于还原性较强区域, 但色谱反应的原油成熟度存在差异。而 Pr/Ph 分布范围为 2.9~5.5, 通常反映氧化环境下的陆源有机质输入, 与 Pr/nC_{17} 和 Ph/nC_{18} 关系图的判别存在矛盾, 可能反映了月桂峰组湖相烃源岩的沉积环境具有特殊性。

3.4 生物标志化合物

丽水凹陷原油中的甾烷类生物标志化合物以规则甾烷为主, 总体上重排甾烷含量偏低, 但不同井原油中重排甾烷含量存在差异, LF 井原油中重排甾烷含量相对高 (图 11)。原油生物标志化合物中藿烷类生物标志化合物与已钻遇月桂峰组烃源岩既相似又有一定差异, 三环藿烷的丰度较高, C_{30} 藿烷是藿烷类生物标志化合物的主峰, 但三环藿烷/五环藿烷的比值略有差异, 原油中三环藿烷/五环藿烷比值略低于源岩; C_{31} — C_{35} 升藿烷系列同样随碳数增加呈现丰度逐渐降低的阶梯状分布。伽马蜡烷、Ts、 $C_{29}Ts$ 和 C_{30} 重排藿烷含量比较高。

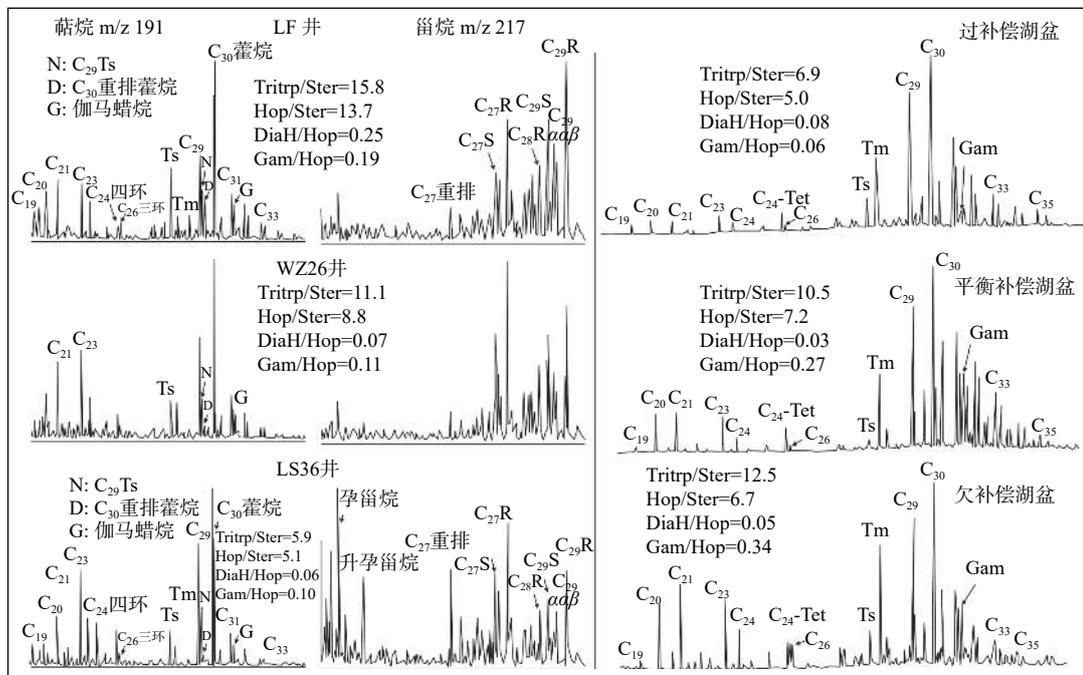


图 11 不同湖盆类型形成原油与丽水凹陷原油典型生物标志化合物特征对比

Fig. 11 Comparison of GC/MS chromatogram of crude oil in different lake-type basins with crude oil in Lishui Sag

丽水凹陷已发现原油的生物标志化合物参数交汇图很好地表现了其源岩的有机质来源和沉积环境 (图 7)。原油藿烷和升藿烷系列特征反映源岩沉积水体是弱氧化还原环境, 意味着还原环境可能不是形成油源岩的必要条件。不同碳数三环藿烷以及奥利烷与藿烷特征表明被子植物来源的有机质可以提供油源。规则甾烷 C_{29} 甾烷/ C_{27} 甾烷比值表明原油既有水生藻类的贡献, 又有高等植物来源有机质的贡献, 既有厌氧环境又有弱含氧环境, 进一步支持还原环境不是形成油源岩的必要条件。 C_{27} 、 C_{28} 、 C_{29} 规则甾烷的三角图则表明有机质来源以陆源有机质为主, 无典型湖相烃源岩特征 (图 8)。

原油中 C_{26} 和 C_{25} 三环藿烷及 C_{30} 和 C_{31} 藿烷的不同分布特征反映了油源岩主要为以沉积陆源有机质为主的非海相淡水湖相沉积 (图 7), 少数样品特征类似于盐湖相有机质特征 (图 7)^[20]; 而芳烃中的二苯并噻吩与菲的特征却指示海相碳酸盐环境。原油不同组分反映的沉积物来源和沉积环境与月桂峰组泥岩一样存在不一致性, 总体上反映月桂峰组沉积期湖盆具有一定的特殊性。

4 天然气地球化学特征

丽水凹陷不同构造上的天然气组成变化很大

(表3), 根据烃类气体含量和非烃类气体的种类和含量分为3种类型。第1种以非烃气为主, WZ13井天然气几乎全部为二氧化碳气体(>94%), 烃类气体的含量很低(<5%), 其中一个样品<1.5%; 第2种兼有烃类气和非烃气, 烃类气略多于非烃气, LS36构造天然气的烃类气占62.06%~66.04%, 非烃气中仍然以二氧化碳为主, 占31.74%~34.5%, 少量氮气, 占1.06%~3.55%; 第3种以烃类气为主,

LF井烃类气含量很高, 达93.84%, 无二氧化碳, 含少量氮气, 为6.16%。在烃类气的组成中(表4), 不同构造烃类气的组成差异不大, 甲烷分布范围为63.38%~89%, 以烃类气为主的LF井甲烷含量最低, 为63.38%, 含有大量二氧化碳的天然气中的甲烷含量反而比较接近, 介于84.4%~89%。在以烃类气为主的LF井中, 高碳数的气态烃明显高于含有大量二氧化碳的天然气中的高碳数天然气。

表3 丽水凹陷天然气成分组成

Table 3 Composition of natural gas in Lishui Sag

井号	C ₁ /%	C ₂ /%	C ₃ /%	nC ₄ /%	nC ₅ /%	iC ₄ /%	iC ₃ /%	C ₆₊ /%	CO ₂ /%	N ₂ /%
WZ13	4.76	0.51	0.17	0.03	0.01	0.03	0.01		94.47	
WZ13	1.19	0.14	0.04	0.02	0.02	0			98.59	
LS36	55.45	3.63	1.88	0.47	0.09	0.42	0.15	0.21	34.15	3.55
LS36	55.10	3.67	1.92	0.48	0.09	0.43	0.16	0.21	34.50	3.44
LS36	56.52	3.83	2.69	0.75	0.30	0.50	0.34	1.11	31.74	1.06
LF	59.48	11.95	10.02	4.49	1.69	4.04	2.17			6.16

表4 丽水凹陷天然气中有机烃类成分组成与碳同位素组成

Table 4 Composition and carbon isotope of natural gas in Lishui Sag

井号	有机烃类成分										碳同位素				
	C ₁ /%	C ₂ /%	C ₃ /%	nC ₄ /%	nC ₅ /%	iC ₄ /%	iC ₃ /%	C ₆₊ /%	C ₂₊ /%	C ₁ /C ₁₊	C ₁ /‰	C ₂ /‰	C ₃ /‰	nC ₄ /‰	CO ₂ /‰
WZ13	86.23	9.24	3.08	0.54	0.18	0.54	0.18	0	13.76	0.86	-44.20	-29.20	-32.60	-17.20	-4.00
WZ13	84.40	9.93	2.84	1.42	0	1.42	0	0	15.61	0.84	-46.60	-33.00	-33.20	-26.30	-4.20
LS36	89.00	5.83	3.02	0.75	0.14	0.67	0.24	0.34	10.99	0.89	-46.30	-29.55	-29.96	-26.86	-5.03
LS36	88.79	5.91	3.09	0.77	0.15	0.69	0.26	0.34	11.21	0.89	-46.13	-29.31	-27.07	-26.93	-4.67
LS36	85.58	5.80	4.07	1.14	0.45	0.76	0.51	1.68	14.41	0.86	-44.40	-28.90	-26.40	-27.00	-4.60
LF	63.38	12.73	10.68	4.78	1.80	4.31	2.31	0	36.61	0.63	-44.76	-27.24	-25.13	-25.52	-22.20

天然气碳同位素组成见表4和图12。丽水凹陷天然气甲烷的碳同位素 $\delta^{13}\text{C}_1$ 值分布范围为-46.6‰~-44.2‰; 乙烷的碳同位素 $\delta^{13}\text{C}_2$ 值介于-33‰~-27.24‰, 跨越了油型气和煤型气的界限(-28‰)^[26]; 丙烷和丁烷碳同位素 $\delta^{13}\text{C}_3$ 和 $\delta^{13}\text{C}_4$ 值分别为-33‰~-27.27‰和-27‰~-17.2‰。LF井天然气乙烷碳同位素-27.24‰稍重于-28‰, 同时, 只有LF井天然气丙烷、丁烷碳同位素稍稍重于其他天然气样品(只有1个样品例外)。通过甲烷碳同位素与甲烷和乙烷碳同位素差值的交汇图进行天然气成因判识, 发现丽水凹陷天然气落在油型气的区域(图13), 结合油源分析得出月桂峰组湖相烃源岩提供油源, 并且月桂峰期湖盆具有一定特殊性, LF井天然气的特殊性是不同烃源灶的烃源岩有机质组成的差异性造成。

用月桂峰组湖相烃源岩分离的干酪根进行了

金管热模拟实验, 对不同成熟阶段形成的天然气进行组分和碳同位素分析, 探讨月桂峰组湖相烃源岩形成的天然气特征。结果表明, 在成熟度 R_o 相当于1.2%时, 模拟形成的天然气甲烷碳同位素约为-45‰, 乙烷碳同位素约为-28‰, 与目前发现的天然气碳同位素相似, 支持了丽水凹陷烃类气来源于月桂峰组湖相烃源岩的认识。

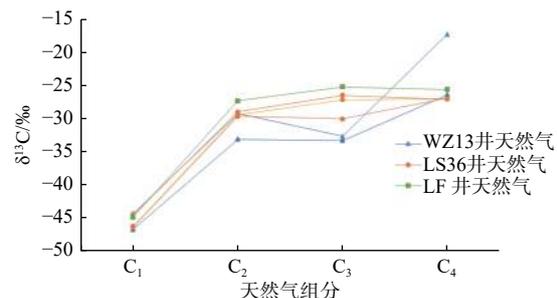


图12 丽水凹陷天然气碳同位素组成分布

Fig.12 $\delta^{13}\text{C}_1$ patterns of natural gas in Lishui Sag

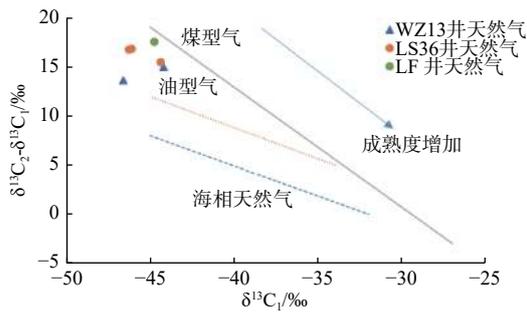


图 13 丽水凹陷天然气成因判识

Fig.13 Diagram of $\delta^{13}C_1$ vs $\Delta(\delta^{13}C_2-\delta^{13}C_1)$ showing the origin of natural gas

丽水凹陷天然气中的非烃气——二氧化碳的碳同位素分布范围为-22‰~-4‰。可以明显地分为 2 组: 一组是以烃类气为主的 LF 井天然气, 二氧化碳仅微量分布, 较轻, 为-22‰; 另一组是二氧化碳含量超过 30%, 包括以非烃气为主的 WZ13 井和兼有烃类气和非烃气的 LS36 井, 偏重, 二氧化碳气碳同位素分布范围为-5.03‰~-4‰。通常认为无机成因的二氧化碳碳同位素比有机成因的要偏重, 因为大部分原油伴生气和热模拟产生的二氧化碳碳同位素轻于-10‰, 有机质氧化也难以形成碳同位素重于-10‰的二氧化碳^[22]。一般将-10‰作为区分有机和无机成因二氧化碳的碳同位素界限^[22]。陈建平等^[3]认为, 月桂峰组干酪根热模拟实验生成的二氧化碳碳同位素值分布范围为-22.46‰~-15.22‰。基于以上证据可以认为, 丽水凹陷以非烃气为主以及兼有非烃气、烃类气的天然气中的二氧化碳是无机成因的。

LF 井天然气中微量二氧化碳气体的碳同位素组成为-22.20‰^[3], 远远轻于无机成因二氧化碳气碳同位素的界限(-10‰), 是月桂峰组湖相烃源岩在生油为主的过程中伴生的少量有机成因二氧化碳气。

前文的月桂峰组有机质丰度、干酪根类型研究已经表明, 丽水凹陷已钻遇的月桂峰组烃源岩干酪根 H/C 原子比分布范围为 0.9~1.1, 干酪根碳同位素组成分布范围为-28‰~-27‰, 热解氢指数为 33~454 mg/gTOC, 属于湖相水生生物和陆源高等植物混合的油气兼生的 II 型有机质, 丽水凹陷目前发现天然气中的有机烃类气应该主要来源于月桂峰组湖相烃源岩。

5 讨论

KATZ^[27-28]指出, 典型湖相烃源岩形成的油气以蜡质原油为主, 将典型的湖相沉积划分为淡水和咸水湖相 2 种类型; MELLO 等^[29]运用原油生物标志化合物特征判别巴西近海不同的湖相沉积环境; POWELL^[30]总结了不同沉积环境和有机质来源的湖相烃源岩形成的原油地球化学特征; MURRAY 等^[31]总结了不同的湖相沉积环境的古近-新近系原油生物标志化合物特征; HORSFIELD^[32]对比了绿河组淡水和咸水湖相烃源岩地球化学特征。在前人工作基础上, 总结了典型湖相淡水和咸水环境下烃源岩及其形成原油的特征, 并与月桂峰组烃源岩特征进行了对比(表 5)。

表 5 丽水凹陷已钻遇月桂峰组烃源岩地球化学特征

Table 5 Geochemical characteristics of source rocks in Yueguifeng Formation that encountered in Lishui Sag

	湖相淡水	湖相咸水	WZ26井 月桂峰组	WZ13井 月桂峰组	LS35井 月桂峰组	WZ4井 月桂峰组
$R_o/\%$	0.4~0.7	0.4~0.8	0.88~1.38		0.9~1.18	
饱和烃/ $\%$	40~60	25~55	28.51~81.91	3.99~7.99	7.87~27.14	26.15~46.57
$\delta^{13}C(PDB/\%$)	<-28	-23~-27	-27~-28.1			
主峰碳	nC_{23}	nC_{19}		nC_{17}, nC_{34}		$nC_{17}, nC_{19}, nC_{27}$
奇偶比	≥ 1	≥ 1	≥ 1	≥ 1	≥ 1	≥ 1
姥植比	>1.3	>1.1	>1.87	>1.78	>1.13	>1.5
C_{27}/C_{29} 甾烷	1.5~4.0	1.5~2.5	0.66~1.51	0.51~0.91	1.02~2.51	0.34~0.47
重排甾烷指数	20~40	10~50	8.9~34	5~47	12.1~17	17~24
4-甲基甾烷指数	30~50	30~150				
藿烷/甾烷	5~30	5~30	3.2~16.9	1.15~8.8	7.7~14.5	30~65
三环藿烷指数	30~100	100~200	103~287	28~720	57~234	5.1~8.5
C_{34}/C_{35} 藿烷	>1	>1	0.2~1.8	0.42~1.06	0.5~0.72	0.5~0.9
双降藿烷指数	0	3~15				
奥利烷指数	0	0	0.06~6	0.08~0.99	0.03~0.6	0~0.02
Ts/Tm	>1	<1	0.49~1.46	0.23~0.98	0.95~2.06	0.45~0.57

通过对月桂峰烃源岩特征和丽水凹陷已发现油气特征的分析,可以看到月桂峰组湖相泥岩有机质并非典型的以水生生物来源为主,混有不等量的陆源有机质。油气特征也反映油气不是源于典型的湖相烃源岩。

将月桂峰组非典型湖相烃源岩特征与典型湖相烃源岩的有机地球化学特征进行了对比(表5)。仅奇偶优势与典型湖相烃源岩特征一致,均为奇数碳优势,奥利烷指数则是完全相反,典型湖相烃源岩无陆源有机质输入,而月桂峰组湖相泥岩中则有不等量的陆源有机质加入。其他几种参数则在淡水湖相和咸水湖相之间变动。但是对丽水凹陷构

造演化和沉积充填的研究表明月桂峰期发育裂谷断陷湖盆,鉴于此,湖相地层相组合类型,也就是湖盆类型对湖相烃源岩主要特征会有很大的控制和影响,应该在地质演化框架中预测湖相烃源岩分布特征和油气潜力。

BOHAC^[33]在层序地层框架中讨论了湖盆类型、烃源岩潜力及其生成油气特征的关系。在前人对湖相盆地划分的3种类型的工作基础上,总结了湖盆类型对烃源岩的控制因素(表6),以及不同湖盆类型烃源岩形成油气的主要特征及与丽水凹陷已发现油气特征对比(表7)。

通过对比发现,月桂峰组烃源岩特征和丽水凹

表6 湖盆类型对烃源岩的控制因素

Table 6 Controlling factors of basin types on source rocks

湖盆类型	有机质生产力	破坏	稀释	烃源潜力
过补偿	营养物质供给多;淡水输入会降低营养物质浓度;随着湖盆体积增大生产力总体下降	水体底部氧气供给增加会破坏有机质;风的搅动形成均一的水体不利于有机质保存;冷的底流不利于有机质保存;扰动强度加大破坏有机质	丰富的碎屑会降低有机质丰度;大量的陆源碎屑	中等—差的油气潜力;油气共生;明显的侧向变化;TOC:泥岩<1%~7%,煤<80%;有机质类型:藻类和陆源有机质混合(I/II);HI:50~600;厚度:0~100 m
平衡补偿	合适的营养物质供给;不定期的干燥增加营养物质浓度;大量的湖盆水体位于透光带有利于高生产力	封闭的盆地和不定期的干燥利于形成密度分层保护有机质;巨大的生产力消耗了水体底部的氧气有利于有机质保存	变化、相对较少的碎屑不会降低有机质丰度;少量的陆源碎屑有利于有机质保存;不定期的洪水和泄洪带来大量碎屑并会带走有机质	中等—很好的生油潜力;生油为主;有时少量气;侧向变化很少;TOC:1%~30%;有机质类型:主要藻类(I),部分陆源有机质(II);HI:500~700;厚度:相对较薄(1~10 m)
欠补偿	变化的营养物质供给;不定期的干燥增加营养物质浓度;过度的矿物质浓缩会破坏生物生存降低生产力;只有部分时间水体可以生产有机质	不定期的干燥使有机质氧化;定期的淡化会带来氧气破坏有机质	半干旱气候提供最大的碎屑供给;较少的陆源有机质供给相对提高了藻类物质的丰度;由于大量矿物沉淀提高盐度有利于有机质保存	差—中等的生油潜力;生油为主;很小侧向变化;TOC:<0.5%~20%;有机质类型:藻类(I);HI:50~600;厚度:相对较薄(1~10 m)

表7 不同湖盆类型生成油气特征与丽水凹陷已发现油气特征对比

Table 7 Comparison of petroleum characteristics in Lishui Sag to those in different lake types basins

	湖盆类型			已发现油气井				
	过补偿	平衡补偿	欠补偿	LS36	LS36	WZ26	LF	
生烃潜力	变化	大	变化					
有机质	陆源有机质,水生生物	主要水生生物,部分陆源有机质						
沉积水体	淡水							
氧化还原程度	弱氧化、氧化							
油气类型	油、部分气和凝析油							
含蜡量	>20%	5%~25%	<5%~10%	<0.52%		>18	>18	
API	24°~57°	18°~45°	12°~37°					
倾点	-5°~>20°	25°~59°	-5°~>20°					
含硫量	低	低	高,一般1%,可高达2%				0.28	
含氮化合物	低	含氮化合物+芳烃5%~40%						
Pr/Ph	低	<1~2.0	<1	5	5.5	2.86	3.61	
藿烷/甾烷	高	0.5~15	低	2.47	2.1	1.72	1.55	
甾烷		C ₂₉		C ₂₇	C ₂₇	C ₂₉	C ₂₉	
C ₂₉ 去甲基甾烷	丰富							
4-甲基甾烷	有时含量高	伴有甲基甾烷						
伽马蜡烷	低	高	高	0.1	0.09	0.792	0.152	
β胡萝卜烷	常常检测不到	中等含量	很高					

陷已发现油气特征不仅与典型湖相烃源岩及其生成油气存在明显差异,而且与前人已经总结的 3 种类型湖盆也不能较好的对应。将已经公认的 3 种湖盆类型湖相烃源岩生成的原油特征谱图^[33]与丽水凹陷的 3 个油样的萘烷谱图进行了对比(图 11),可以看出,LF 井和 WZ26 井原油 C₂₆ 三环萘烷与 C₂₄ 四环萘烷的含量相近并且三萘类含量较高,类同于欠补偿湖相沉积,但是 LS36 井原油 C₂₆ 三环萘烷与 C₂₄ 四环萘烷的相对丰度关系及含量又与平衡补偿湖盆烃源岩形成的油气特征类似。原油的伽马蜡烷与藿烷比值变化不大,均低于平衡补偿和欠补偿湖盆烃源岩生成原油,但高于过补偿湖相烃源岩形成原油。可能意味已发现原油源自月桂峰组“非典型”湖相烃源岩,不能归于目前公认的 3 种湖相烃源岩。已钻遇的月桂峰组烃源岩的萘烷总体特征与欠补偿湖盆烃源岩相对类似(图 6),但 C₂₆ 三环萘烷与 C₂₄ 四环萘烷的相对丰度关系及含量又与平衡补偿湖盆烃源岩类似,这进一步证实了丽水凹陷月桂峰组湖相泥岩为非典型湖相烃源岩。同时,考虑到这些具有不同有机质来源和生烃潜力,并且生物标志化合物特征也具有差异的月桂峰组烃源岩在不同的构造位置以及不同的深度均有分布,推测月桂峰组湖盆的发育也具有特殊性,不仅断陷湖盆发育的不同构造位置存在不同湖盆类型,并且在湖盆发育的不同阶段也发育不同的湖盆类型。

6 结论

丽水凹陷的主力烃源岩月桂峰组湖相泥岩为非典型湖相烃源岩。丽水凹陷月桂峰组非典型湖相烃源岩的分布预测需要突破传统的中深湖相沉积环境发育有效烃源岩的认识,加强月桂峰组泥岩沉积特征的研究,识别湖盆发育不同构造位置 and 不同演化阶段的湖盆类型,从而预测烃源岩的质量和分布及其形成的油气类型,为寻找有利勘探区带奠定基础。

参考文献:

- [1] 葛和平, 陈志勇, 方来富, 等. 丽水凹陷油气成藏期次探讨[J]. 中国海上油气(地质), 2003, 17(1): 44-50.
- [2] 葛和平, 陈晓东, 刁慧, 等. 东海盆地丽水凹陷原油地球化学特征及油源分析[J]. 中国海上油气, 2012, 24(24): 8-12, 31.
- [3] 葛和平, 陈建平, 陈晓东, 等. 东海盆地丽水凹陷天然气类型及其成因探讨[J]. 中国科学(D 辑: 地球科学), 2007, 37(S2): 104-110.
- [4] CARROLL A R, BRASSELL S C, GRAHAM S A, et al. Upper Permian lacustrine oil shales, Southern Junggar Basin, Northwest China[J]. AAPG Bulletin, 1992, 76(12): 1874-1902.
- [5] CARROLL A R. Upper Permian lacustrine organic facies evolution, Southern Junggar Basin, NW China[J]. Organic Geochemistry, 1998, 28(11): 649-667.
- [6] CARROLL A R, BOHACS K M. Stratigraphic classification of ancient lakes: balancing tectonic and climatic controls[J]. Geology, 1999, 27(2): 99-102.
- [7] CARROLL A R, BOHACS K M. Lake-type controls on petroleum source rock potential in nonmarine basins[J]. AAPG Bulletin, 2001, 85(6): 1033-1053.
- [8] 申雯龙, 漆滨汶. 东海盆地丽水凹陷有效烃源岩判定及分布预测[J]. 地质科技通报, 2020, 39(3): 77-88.
- [9] 中国石油天然气总公司. SY/T 5735-1995 陆相烃源岩地球化学评价方法[S]. 北京: 中国石油天然气总公司, 1995.
- [10] 中国海洋石油总公司. Q/HS 1017-2006 烃源岩地球化学定量评价规范[S]. 北京: 中国海洋石油总公司, 2006.
- [11] PETERS K E, MOLDOWAN J M. The biomarker guide: interpreting molecular fossils in petroleum and ancient sediments[M]. New Jersey: Prentice Hall, 1993.
- [12] HAZRA B, WOOD D A, MANI D, et al. Evaluation of shale source rocks and reservoirs[M]. Springer Nature Switzerland AG, 2019: 1-142.
- [13] COMFORD C. Mandal-Ekofisk(!) Petroleum System in the Central Graben of the North Sea[C]//Magoon L B, DOW W G. The petroleum system: from source to trap. AAPG Memoir 60, 1994: 537-571.
- [14] SCHNEIDER A C, MUTTERLOSE J, BLUMENBERG M, et al. Palynofacies, micropalaeontology, and source rock evaluation of nonmarine Jurassic-Cretaceous boundary deposits from northern Germany: implications for palaeoenvironment and hydrocarbon potential[J]. Marine and Petroleum Geology, 2019, 103: 526-548.
- [15] SONG J L, LITTKE R, WENIGER P, et al. Shale oil potential and thermal maturity of the Lower Toarcian Posidonia Shale in NW Europe[J]. International Journal of Coal Geology, 2015, 150/151: 127-153.
- [16] COLLISTER J W, WAVREK D A. $\delta^{13}\text{C}$ compositions of saturate and aromatic fractions of lacustrine oils and bitumens: evidence for water column stratification[J]. Organic Geochemistry, 1996, 24(8/9): 913-920.
- [17] PETERS K E, WALTERS C C, MOLDOWAN J M. The biomarker guide: biomarkers and isotopes in petroleum exploration and earth history[M]. (vol. 2). Cambridge: Cambridge University Press, 2005.
- [18] PETERS K E, LILLIS P G, LORENSON T D, et al. Geochemically distinct oil families in the onshore and offshore Santa Maria basins, California[J]. AAPG Bulletin, 2019, 103(2): 243-271.
- [19] HOSSEINIA H S, HORSFIELD B, WILKES H, et al. Comprehensive geochemical correlation between surface and subsurface hydrocarbon occurrences in the Batman-Mardin-Şirnak

- area (SE Turkey)[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2018, 93: 95-112.
- [20] GAO G, YANG S R, ZHANG W W, et al. Organic geochemistry of the lacustrine shales from the Cretaceous Taizhou Formation in the Gaoyou Sag, Northern Jiangsu Basin[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2018, 89(1): 594-603.
- [21] 卢松年, 张刚. 一种新的凝析油形成模式[J]. *中国科学(辑: 化学 生命科学 地学)*, 1994, 24(1): 81-86.
- [22] LEYTHAEUSER D, SCHAEFER R G, CORNFORD C, et al. Generation and migration of light hydrocarbons C2-C7 in sedimentary basins[J]. *Organic Geochemistry*, 1979, 1: 191-204.
- [23] 胡惕麟, 戈葆雄, 张义纲, 等. 源岩吸附烃和天然气轻烃指纹参数的开发和应用[J]. *石油实验地质*, 1990, 12(4): 375-394, 450.
- [24] MANGO F K. The origin of light hydrocarbons in petroleum: a kinetic test of the steady-state catalytic hypothesis[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1990, 54(5): 1315-1323.
- [25] 王培荣, 朱俊章, 方孝林, 等. 一种新的原油轻烃分类法[J]. *石油学报*, 1998, 19(1): 24-28.
- [26] 徐永昌, 沈平, 刘文汇, 等. 天然气成因理论及应用[M]. 北京: 科学出版社, 1994.
- [27] KATZ B J. Controls on distribution of lacustrine source rocks through time and space[C]//Katz B J. Lacustrine basin exploration-case study and modern analogs. AAPG Memoir 50, 1990: 61-76.
- [28] KATZ B J. Lacustrine basin hydrocarbon exploration: current thoughts[J]. *Journal of Paleolimnology*, 2001, 26(2): 161-179.
- [29] MELLO M R, GAGLIANONE P C, BRASSELL S C, et al. Geochemical and biological marker assessment of depositional environments using Brazilian offshore oils[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 1988, 5(3): 205-223.
- [30] POWELL T G. Petroleum geochemistry and depositional setting of lacustrine source rocks[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 1986, 3(3): 200-219.
- [31] MURRAY A P, SUMMONS R E, BOREHAM C J, et al. Biomarker and n-alkane isotope profiles for Tertiary oils: relationship to source rock depositional setting[J]. *Organic Geochemistry*, 1994, 22(3/5): 521-542.
- [32] HORSFIELD B, CURRY D J, BOHACS K, et al. Organic geochemistry of freshwater and alkaline lacustrine sediments in the Green River Formation of the Washakie Basin, Wyoming, U. S. A. [J]. *Organic Geochemistry*, 1994, 22(3/5): 415-440.
- [33] BOHACS K M. Lake-basin type, source potential, and hydrocarbon character: an integrated-sequence- stratigraphic geochemical framework[C]//GIERLOWSKI-KORDESCH E H, KELTS K R. Lake basins through space and time. AAPG Studies in Geology 46, 2000: 3-34.

AN ATYPICAL LACUSTRINE SOURCE ROCK AND ITS PETROLEUM CHARACTERISTICS IN THE LISHUI SAG OF THE EAST CHINA SEA

CHEN Xiaodong, JIANG Yiming, QI Binwen, YU Zhongkun

(CNOOC China Limited-Shanghai, Shanghai 200335, China)

Abstract: The lacustrine mudstone of the Yueguifeng Formation of Paleocene is the predominant source rock in the Lishui Sag of the East China Sea. Both natural gas and condensate have been found there. However, it is rather different in hydrocarbon sources with the typical lacustrine rift basins in Eastern China where oil dominates. Comprehensive source rock evaluation on the Yueguifeng shale suggests that there occurs dead carbon to certain proportion, which cannot generate petroleum. In addition, the thermal evolution maturities are not in coupling with the requirement of the conversion index from organic matters to hydrocarbons. The organic matters in Yueguifeng Formation shale are mostly terrestrial in origin, and the percentages of lacustrine aquatic organisms varies. There occur some differences in geochemical characteristics between the Yueguifeng source rocks and the typical lacustrine source rocks. The type of lake-basin have certain control over source rock evolution. Based on the comparison of geochemical characteristics of Yueguifeng source rocks and the petroleum generated in the sag with those of the typical lacustrine source rock and petroleum generated in different lake-type basins, it is found that over compensate and balanced compensate lake basin dominated the Yueguifeng period. And the shales in Yueguifeng Formation are atypical lacustrine source rocks.

Key words: atypical lacustrine source rock; Yueguifeng Formation of Paleocene; lake basin type; overfill; balance fill; Lishui Sag; East China Sea