

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2020.399>



东海盆地椒江凹陷古新统烃源岩地球化学特征及生烃历史

雷 闯¹, 殷世艳^{1,2}, 叶加仁^{2*}, 吴景富³

1. 华北理工大学矿业工程学院, 河北唐山 063210

2. 中国地质大学构造与油气资源教育部重点实验室, 湖北武汉 430074

3. 中海油研究总院有限责任公司, 北京 100028

摘要: 为揭示东海盆地椒江凹陷油气勘探潜力, 基于地球化学和盆地数值模拟方法对古新统月桂峰组、灵峰组和明月峰组烃源岩开展生烃能力和生烃过程研究。结果表明, 月桂峰组和灵峰组泥岩有机质丰度高, 以 II 型干酪根为主, 为水生生物和陆源高等植物混合来源, 且形成于偏还原环境。夹有薄层炭质泥岩和煤的明月峰组泥岩有机质丰度低, 以 III 型干酪根为主, 为陆源高等植物来源且形成于氧化环境。古新世至始新世, 椒江凹陷大幅度沉降且古热流较高, 是古新统烃源岩热演化程度增加的主要时期。受埋藏史和成熟度史共同控制, 月桂峰组和灵峰组经历了 2 次生烃作用, 第 1 次发生在古新世晚期, 第 2 次发生在始新世中期至晚期, 生烃强度高。明月峰组仅在始新世末期经历了 1 次生烃作用, 生烃强度低。椒江凹陷古新统烃源岩生烃潜力强, 具有广阔的油气勘探前景, 应围绕生烃中心尤其是月桂峰组生烃中心选择形成于中新世之前的有效圈闭进行钻探。

关键词: 烃源岩; 生物标志化合物; 生烃史; 椒江凹陷; 东海盆地; 油气。

中图分类号: P618.13

文章编号: 1000-2383(2021)10-3575-13

收稿日期: 2020-12-31

Geochemical Characteristics and Hydrocarbon Generation History of Paleocene Source Rocks in Jiaojiang Sag, East China Sea Basin

Lei Chuang¹, Yin Shiyang^{1,2}, Ye Jiaren^{2*}, Wu Jingfu³

1. College of Mining Engineering, North China University of Science and Technology, Tangshan 063210, China

2. Key Laboratory of Tectonics and Petroleum Resources of Ministry of Education, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

3. CNOOC Research Institute Ltd., Beijing 100028, China

Abstract: In order to understand oil and gas exploration potential of Jiaojiang sag in the East China Sea basin, hydrocarbon generation capacity and process of the Paleocene Yueguifeng (E_{1y}), Lingfeng (E_{1l}) and Mingyuefeng (E_{1m}) Formations were investigated using geochemical analysis and basin modeling. Results show that E_{1y} and E_{1l} mudstones are high-quality source rocks with high organic matter abundance and type II kerogen, which is dominated by both aquatic organisms and terrestrial higher plants deposited in sub-reduced environment. E_{1m} mudstone interbedded with thin carbonaceous mudstone and coal is poor-quality source rock with low organic matter abundance and type III kerogen, whose organic matter was derived from terrestrial higher plants under

基金项目: 国家科技重大专项子课题 (Nos. 2016ZX05024-002-003, 2017ZX05032-001-004); 油气资源与探测国家重点实验室开放课题 (No. PRP/open-2004).

作者简介: 雷闯 (1985-), 男, 讲师, 博士, 主要从事油气地球化学和成藏机理研究。ORCID: 0000-0002-7859-0157. E-mail: leichuang119@163.com

* 通讯作者: 叶加仁, E-mail: jrye@cug.edu.cn

引用格式: 雷闯, 殷世艳, 叶加仁, 等, 2021. 东海盆地椒江凹陷古新统烃源岩地球化学特征及生烃历史. 地球科学, 46(10):3575-3587.

oxidized environment. Great subsidence and high paleo-heat flow from the Paleocene to the Eocene made it main period for increasing thermal maturity of source rocks. Controlled by burial and maturity histories, the E_{1y} and E_{1l} formations experienced two hydrocarbon generation stages, which took place in the Late Palaeocene and in the Middle to Late Eocene, respectively, and is characterized by high hydrocarbon generation potential. The E_{1m} Formation only had one hydrocarbon generation process at the end of Eocene, which is characterized by low hydrocarbon generation potential. The Paleocene source rocks in the Jiaojiang sag have strong hydrocarbon generation capacity, so the future oil and gas exploration should focus on hydrocarbon generation center, especially that of the E_{1y} Formation, and select effective traps formed before the Miocene.

Key words: source rock; biomarker; hydrocarbon generation history; Jiaojiang sag; East China Sea basin; hydrocarbon.

随着油气勘探程度的不断提高,成熟探区新增储量不足的问题日益突出,人们不得不把注意力转移到低勘探程度地区,以寻求储量替代或勘探突破的新领域.东海盆地椒江凹陷处于勘探早期阶段,迄今为止仅在凹陷边缘和低凸起区钻井5口,其中油气层井1口,显示井1口,未获得商业发现(蔡佳等,2016).区域地质研究表明,椒江凹陷烃源岩层位为古新统,由老到新依次是月桂峰组(E_{1y})、灵峰组(E_{1l})和明月峰组(E_{1m}).受油气勘探程度的制约,前人研究多集中在凹陷构造演化与沉积体系及物源等基础地质方面(张胜利和夏斌,2005;田兵等,2012;陈春峰等,2017),少量有关烃源岩的研究也仅针对月桂峰组(殷世艳等,2014;田杨等,2016),导致对凹陷烃源岩生烃特征与勘探潜力认识不清,制约了勘探进程.本文基于样品实测资料,分析了椒江凹陷古新统烃源岩地球化学特征,并利用盆地数值模拟技术,重建了烃源岩埋藏史、热史、成熟度史和生烃史,确定其生烃能力和生烃过程,为油气勘探决策提供依据.

1 地质背景

椒江凹陷位于东海盆地西部坳陷带的西南部,呈北东向展布,南北长约72 km,东西宽约50 km,面积约3 500 km²,可进一步划分为东洼和西洼两个次洼.凹陷整体表现为东断西超的箕状断陷结构,最大沉积厚度达7 500 m(图1).

椒江凹陷是一个在中生代残留盆地基础上发育起来的新生代断陷型盆地,经历了裂陷、拗陷、抬升剥蚀和整体沉降4个构造演化阶段(张胜利和夏斌,2005; Jiang *et al.*, 2015).裂陷期自晚白垩世开始,持续到古新世,期间断裂活动十分活跃,多具有切割基底的性质,并控制着凹陷的沉积和沉降中心,充填有古新统月桂峰组、灵峰组和明月峰组地层(图2).其中,月桂峰组属于湖相沉积,暗色泥岩厚度200~800 m;灵峰组是一套海进环境下形成的

滨浅海相沉积,暗色泥岩最大厚度达500 m;明月峰组是一套海退环境下形成的煤系沉积,以暗色泥岩为主,夹有薄层的炭质泥岩和煤,厚度100~300 m.从始新世到渐新世为拗陷期,期间断裂不发育,仅有少数继承性断裂且活动性弱,对沉积的控制作用不明显,充填有滨浅海相瓯江组(E_{2o})和温州组(E_{2w})地层.抬升剥蚀期经历了始新世末期的玉泉运动和渐新世末期的花港运动,导致椒江凹陷整体缺失始新统平湖组(E_{2p})、渐新统花港组(E_{3h})地层,同时形成了一个明显的区域性构造不整合界面.之后,椒江凹陷与其东部的开阔区域一起进入整体沉降期,大范围沉积了浅海相或海陆过渡相中新统龙井组(N_{1lj})、玉泉组(N_{1y})、柳浪组(N_{1ll}),上新统三潭组(N_{2s})和更新统东海群(Qd)地层.

2 样品与实验方法

本次研究的57个暗色泥岩/煤岩样品取自JJ4-1井和JJ6-1井(采样位置见图1b),样品深度分别为1 944~2 520 m和2 644~3 334 m,对应的实测镜质体反射率值(R_o)分别为0.44%~0.58%和0.48%~0.64%,处于未成熟—低成熟阶段.笔者对所有样品进行常规的有机碳含量(TOC)和岩石热解分析测试,直接得到TOC、 S_1 、 S_2 、 S_3 、 T_{max} 参数,由此计算出生烃潜量(S_1+S_2)、氢指数(HI)和氧指数(OI).再选取11个泥岩样品进行饱和烃气相色谱(GC)和色谱—质谱(GC-MS)分析测试.首先,将磨碎至100目以下的泥岩样品进行72 h的索氏抽提,萃取出氯仿沥青“A”.然后,利用柱层析法将脱出沥青质的氯仿沥青“A”分离出饱和烃(用正己烷洗脱)、芳烃(用二氯甲烷洗脱)和非烃(用体积比2:1二氯甲烷/甲醇洗脱).最后,利用Agilent 7890色谱仪和Agilent 7890A-GC/5975C-MS色谱—质谱仪分别完成饱和烃色谱和色谱—质谱分析,具体操作流程见徐建永等(2019).

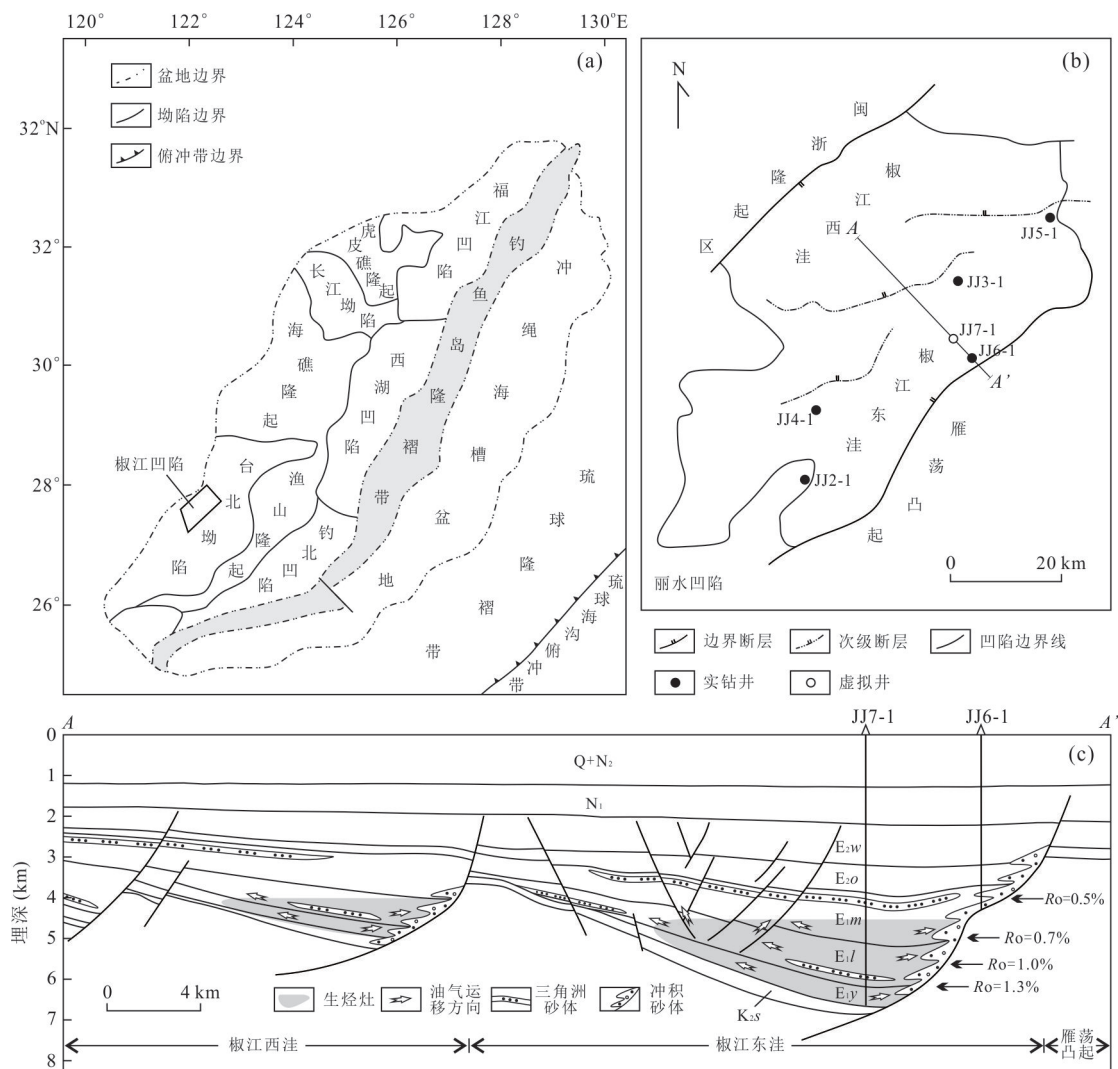


图 1 椒江凹陷构造位置及剖面

Fig.1 Structural location and cross section of the Jiaojiang sag

3 烃源岩地球化学特征

3.1 有机质丰度

有机质丰度是烃源岩油气生成的物质基础,其高低直接影响油气资源前景.月桂峰组泥岩 TOC 为 1.86%~2.65%,均值为 2.31%; S_1+S_2 为 3.20~9.46 mg/g,均值为 7.46 mg/g.灵峰组泥岩 TOC 为 2.13%~3.75%,均值为 2.82%; S_1+S_2 为 5.04~15.29 mg/g,均值为 9.76 mg/g.明月峰组泥岩有机质丰度较低,TOC 为 0.34%~2.49%,均值为 0.97%; S_1+S_2 在 0.30~4.21 mg/g,均值为 1.09 mg/g.但明月峰组炭质泥岩和煤烃源岩有机质丰度较高,TOC 为 8.66%~63.24%(均值为 32.8%), S_1+S_2 为 8.17~90.43 mg/g(均值为 59.7 mg/g).由于椒江凹陷烃源岩类型多样,本次研究采用湖相烃源岩

有机质丰度评价标准来判别月桂峰组和灵峰组生烃能力,采用煤系烃源岩有机质丰度评价标准评价判别明月峰组生烃能力(陈建平等,1997).结果表明(图 3a~3b),月桂峰组和灵峰组泥岩属于好级别,具有较好生烃能力;明月峰组泥岩多数属于差级别,少数属于中等级别,生烃能力明显偏弱.明月峰组炭质泥岩和煤的生烃潜量远高于泥岩,但与中国西北地区侏罗系煤(>150 mg/g)和华北地区石炭系一二叠系煤(>120 mg/g)相比要低很多(陈建平等,1997;尹帅等,2016).另外,由于高含量的有机质对烃类具有强烈的吸附作用,所生成的少量液态烃类很难从煤岩中完全排驱出来.因此,椒江凹陷明月峰组炭质泥岩和煤一般不作为油源岩,但是在高成熟阶段可以作为良好气源岩.

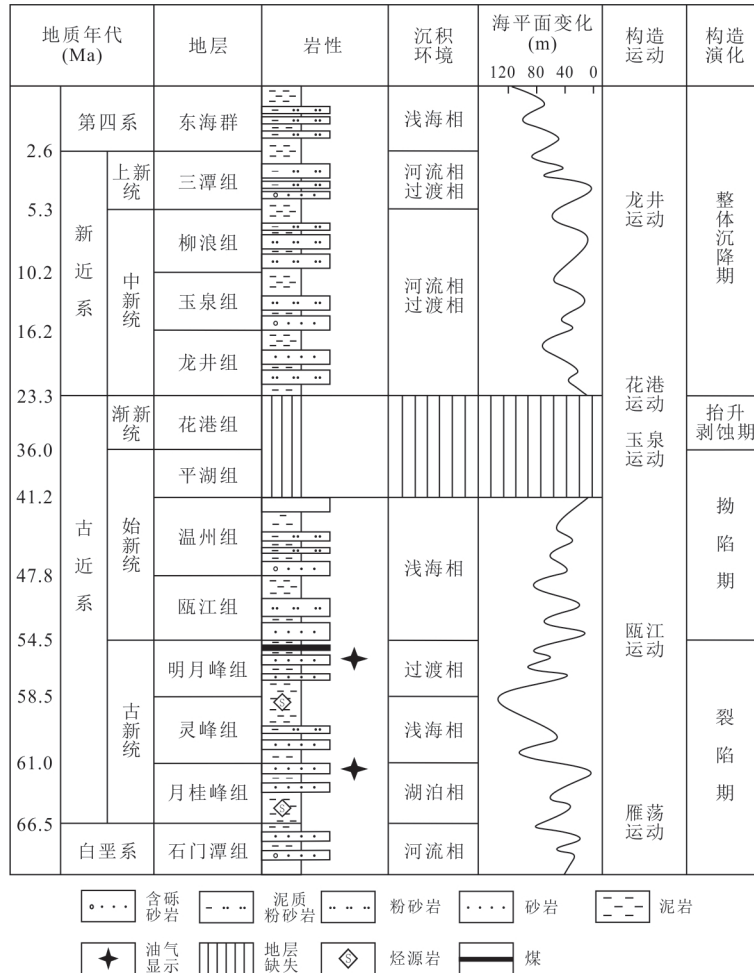


图2 椒江凹陷地层综合柱状图

Fig.2 Comprehensive stratigraphic column of the Jiaojiang sag

3.2 有机质类型

有机质类型是衡量烃源岩生烃潜力的重要指标。Peters and Moldowan (1991) 提出根据氢指数 (HI) 将成熟度在 $R_o=0.6\%$ 左右的干酪根分成 3 类: 氢指数大于 300 mg/g 为 I 型干酪根 (倾油型); 氢指数介于 $200\sim 300 \text{ mg/g}$ 为 II 型干酪根 (倾油/倾气型); 氢指数介于 $50\sim 200 \text{ mg/g}$ 为 III 型干酪根 (倾气型)。椒江凹陷 3 套烃源岩氢指数分别为 $159\sim 344 \text{ mg/g}$ 、 $184\sim 394 \text{ mg/g}$ 、 $31\sim 209 \text{ mg/g}$, 表明月桂峰组和灵峰组以 II 型干酪根为主, 具有油气兼生的能力; 明月峰组以 III 型干酪为主, 且含有一定数量 II—III 过渡型干酪根, 仅具有一定的生气能力 (图 3c)。

3.3 有机质成熟度

有机质成熟度是反映有机质向烃类转化程度的重要指标。所分析的样品 R_o 值变化在 $0.43\%\sim 0.64\%$, 相应的 T_{max} 变化在 $415\sim 443 \text{ }^\circ\text{C}$ (图 3c), 表明

椒江凹陷烃源岩总体上处于未成熟—低成熟阶段, 尚未开始大量转化成烃类。需要指出的是, 由于所有样品点位置均处于埋藏深度小的凹陷边缘或凸起区, 没有经历过充足的埋藏及热成熟演化作用, 大大限制了它们的生烃能力。可推测埋藏深度大的凹陷中心区烃源岩应处于较高的成熟阶段。

3.4 生物标志化合物

3.4.1 正构烷烃 椒江凹陷正构烷烃的碳数分布范围多为 $nC_{13}\sim nC_{36}$ 。对于未成熟—低成熟样品, 低碳数成分 ($<nC_{20}$) 正构烷烃主要来源于浮游藻类和细菌, 高碳数成分 ($>nC_{25}$) 正构烷烃主要来源于陆源高等植物 (Sachsenhofer *et al.*, 2017)。由图 4a~4b 可以看出, 月桂峰组和灵峰组样品呈单峰型分布, 低碳数成分和高碳数成分正构烷烃的丰度相近 ($\sum C_{21}^- / \sum C_{22}^+ = 0.49\sim 0.68$), 说明有机质具有水生生物和陆源高等植物双重来源的特征。明月峰组样品呈不对称的双峰型分布 (图 4c), 高碳数成分正构

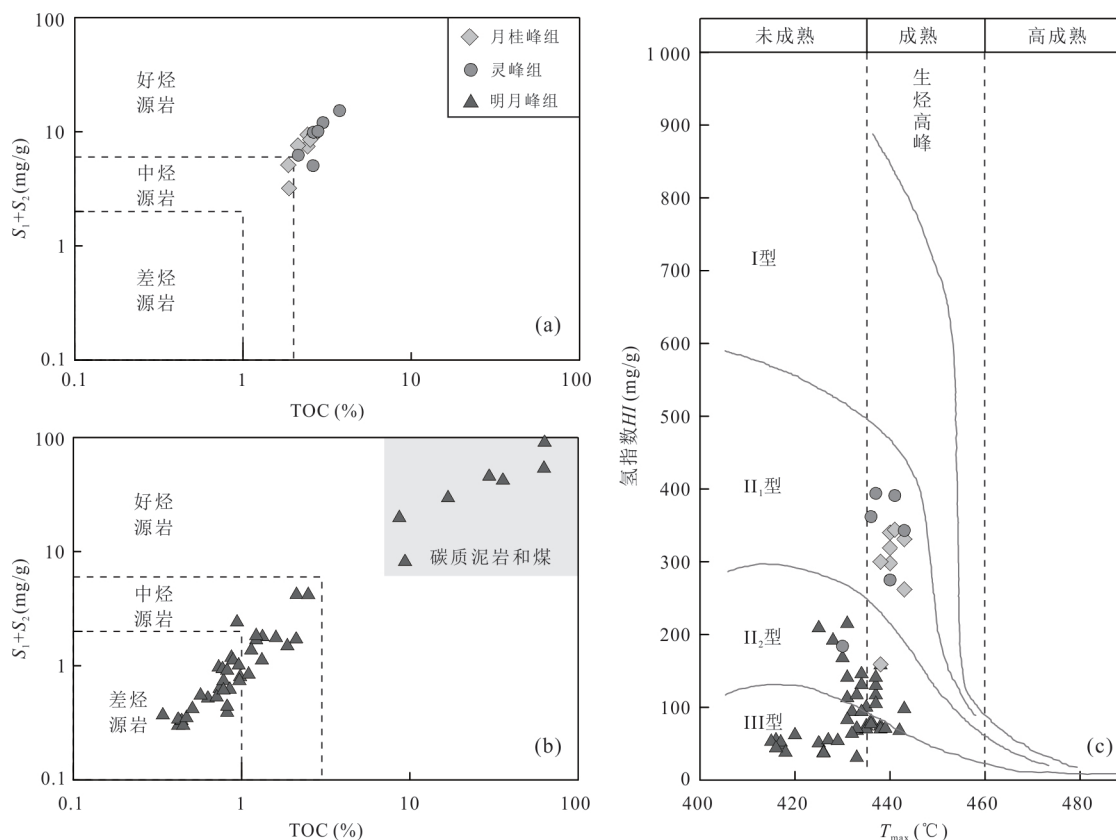


图3 椒江凹陷古新统烃源岩有机质丰度(a,b)和类型(c)判别图

Fig.3 Organic matter abundance (a,b) and type (c) of the Paleocene source rocks in the Jiaojiang sag

a. 湖相烃源岩评价图版; b. 煤系烃源岩评价图版

烷烃的丰度明显升高($\sum C_{21}^- / \sum C_{22}^+ = 0.33 \sim 0.36$), 说明陆源高等植物输入量较高. 另外, 所有样品 CPI 和 OEP 值较高, 分别变化于 1.39~1.90 和 1.18~1.84, 进一步反映了有机质未成熟—低成熟的演化特征.

3.4.2 类异戊二烯烷烃 烃源岩中最常见的类异戊二烯烷烃为姥鲛烷(Pr)、植烷(Ph)系列, 它们是指有机质母源输入和古沉积环境的有效参数 (ten Haven *et al.*, 1987; 李守军, 1999). 一般认为, Pr/Ph 比值低于 1.0 指示还原性的沉积环境, Pr/Ph 比值介于 1.0~3.0 指示弱还原—弱氧化的沉积环境, Pr/Ph 比值高于 3.0 指示氧化的沉积环境 (Didyk *et al.*, 1978). 由于所分析的样品以未成熟—低成熟为主且差异不大, 可以排除成熟度对 Pr/Ph 比值的影响. 结果表明, 椒江凹陷烃源岩姥鲛烷和植烷丰富, 甚至高于相邻的正构烷烃, 相应的 Pr/nC₁₇ 和 Ph/nC₁₈ 比值多在 1.0 以上. 由 Pr/nC₁₇ 和 Ph/nC₁₈ 交会图可知, 大多数月桂峰组和灵峰组样品分布在混合有机质输入区间, 明月峰组样品分布在陆生有机质输入区间 (图 5a). 另外, 所有样品姥鲛烷优势

明显, 月桂峰组和灵峰组 Pr/Ph 比值为 1.39~2.32 和 1.51~1.86, 说明其形成于弱氧化—弱还原环境, 有利于原始有机质的保存. 明月峰组 Pr/Ph 比值为 4.71~9.53, 说明其形成于氧化环境, 这与前人所报道的煤系烃源岩形成于强氧化环境是一致的 (朱扬明等, 2012; Qian *et al.*, 2018; Lei *et al.*, 2021).

3.4.3 甾类化合物 在 $m/z=217$ 质量色谱图上检测到甾类化合物, 除包括 C₂₇、C₂₈、C₂₉ 规则甾烷外, 还有 4-甲基甾烷 (图 4), 为判别有机质生源提供了重要依据. 规则甾烷和 4-甲基甾烷的来源多样, 目前多数学者认为 C₂₇ 规则甾烷以水生生物为主, C₂₉ 规则甾烷以陆源高等植物输入为主, 4-甲基甾烷源自藻类或细菌 (Volkman, 1986; 黄第藩等, 1989). 椒江凹陷所有样品以 C₂₉ 规则甾烷含量高为特征 (表 1), 但不同层段样品的甾烷碳数分布模式及相对组成存在一定区别. 月桂峰组和灵峰组 C₂₇、C₂₈、C₂₉ 规则甾烷形态呈不对称的“V”字型, 三者相对含量分别为 19.3%~24.3%、23.2%~24.6%、51.2%~56.7% 和 22.1%~26.8%、21.6%~23.5%、49.7%~56.4%, 说明其有机质生源以陆源高等植物为主且

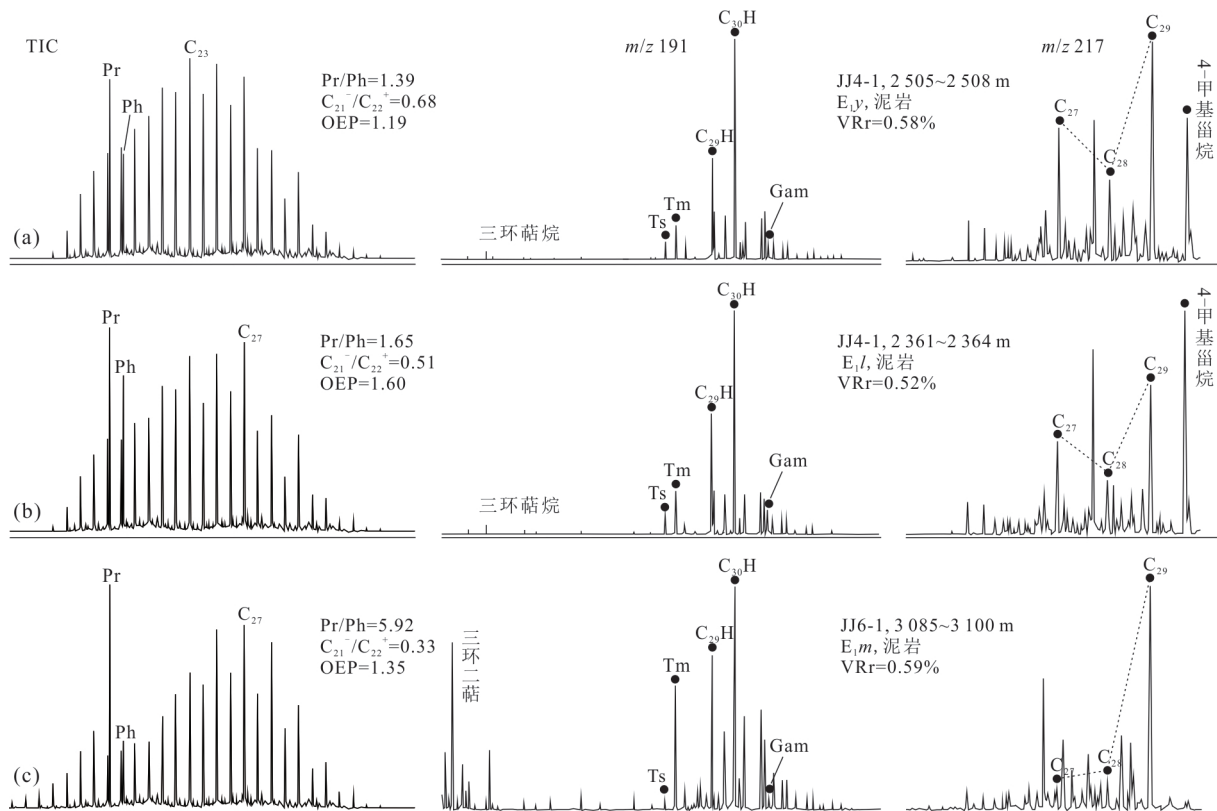


图4 椒江凹陷古新统烃源岩饱和烃总离子流图和色谱图

Fig.4 The total ion chromatograms (TICs) and mass chromatograms of saturated hydrocarbon fractions for the Paleocene source rocks in the Jiaojiang sag

含有比例不等的水生生物,奠定了具有较高生烃潜力的物质基础.明月峰组 C_{27} 、 C_{28} 规则甾烷较少,相对含量变化在 5.2%~14.3% 和 8.5%~16.3%; C_{29} 规则甾烷占绝对优势,相对含量变化在 74.8%~81.2%,三者形态呈倒“L”字型,说明其有机质生源具有更多的陆源有机质输入.4-甲基甾烷仅出现在月桂峰组和灵峰组、未出现在明月峰组,进一步证实了上述有机质生源特征.

甾烷的异构化程度是判别有机质成熟度的重要依据.一般情况下, C_{29} 甾烷 $20S/(S+R)$ 和 C_{29} 甾烷 $\beta/(\beta+\alpha)$ 比值随着有机质成熟度增大而增大,并在 0.52~0.55 和 0.67~0.71 达到反应平衡终点值 (Hanson *et al.*, 2000). 椒江凹陷所有样品甾烷的异构化程度低,上述两个参数值分别低于 0.31 和 0.30 (图 5b), 同样指示有机质处于未成熟—低成熟阶段.

3.4.4 萜类化合物 在 $m/z=191$ 质量色谱图上检测到萜类化合物主要有五环三萜类化合物 $C_{27}18\alpha$ (H) — 三降藿烷 (Ts)、 $C_{27}17\alpha$ (H) — 三降藿烷 (Tm)、 C_{29} 降藿烷、 C_{30} 藿烷、(C_{31} — C_{35}) 升藿烷、伽马

蜡烷及少量的三环藿烷和四环藿烷 (图 4). 所有样品的 C_{30} 藿烷丰度均高于 C_{29} 藿烷丰度,表现在 C_{29}/C_{30} 藿烷比值在月桂峰组、灵峰组和明月峰组分别为 0.46~0.53, 0.35~0.44, 0.59~0.68. 显然,该比值可作为这 3 套烃源岩生成烃的区分标志.升藿烷的相对含量表现为正序特征,即 $C_{31} > C_{32} > C_{33} > C_{34} > C_{35}$ 升藿烷,尤其是所含的 C_{34} 、 C_{35} 升藿烷极少,符合偏氧化沉积环境有机质的一般特点. Ts 和 Tm 化合物含量主要受到有机质类型、成熟度和岩性因素的影响. 所有样品的 Ts/Tm 比值都在 0.7 之下,尤其是明月峰组明显偏低 (Ts/Tm 比值都在 0.1 之下),可能与煤系地层中黏土催化反应受限有关 (Moldowan *et al.*, 1986).

大量的伽马蜡烷是指示高盐度或稳定水体分层的标志 (Sinninghe Damsté *et al.*, 1995; 张立平等, 1999). 月桂峰组、灵峰组和明月峰组的伽马蜡烷指数 (伽马蜡烷/ C_{30} 藿烷) 分别为 0.11~0.12, 0.07~0.09, 0.02~0.04, 指示了在它们沉积时期水体分层稳定性依次减弱. 另外,较高的伽马蜡烷指数对应于 Pr/Ph 比值的低值区,反之亦然 (图 5d), 说明水

表 1 椒江凹陷古新统烃源岩生物标志化合物参数
Table 1 Biomarker parameters of the Paleocene source rocks in the Jiaojiang sag

井名	深度 (m)	层位	正构烷烃		类异戊二烯烷烃				甾烷				萜烷						
			CPI	OEP	C ₂₁ ⁻ / C ₂₂ ⁺	Pr/ Ph	Pr/ nC ₁₇	Ph/ nC ₁₈	C ₂₇ (%)	C ₂₈ (%)	C ₂₉ (%)	C ₂₉ 20S/ (20R+ 20S)	C ₂₉ ββ/ (αα+ββ)	C ₁₉ / C ₂₃	C ₂₀ / C ₂₃	C ₂₄ / C ₂₃	Ts/ Tm	C ₂₉ / C ₃₀	Gam/ C ₃₀
JJ4-1	2 412~ 2 433	E _{1y}	1.48	1.30	0.62	2.01	1.97	1.16	19	24	57	0.13	0.17	0.42	0.97	1.03	0.53	0.52	0.12
JJ4-1	2 505~ 2 508	E _{1y}	1.39	1.18	0.56	2.32	1.67	0.69	22	23	55	0.17	0.18	0.52	0.98	1.29	0.45	0.53	0.12
JJ4-1	2 550~ 2 565	E _{1y}	1.45	1.19	0.68	1.39	2.01	1.29	24	25	51	0.12	0.19	0.48	1.03	0.98	0.48	0.45	0.11
JJ4-1	2 286~ 2 289	E _{1l}	1.90	1.80	0.59	1.51	3.12	2.40	27	24	50	0.06	0.18	0.27	0.83	0.84	0.66	0.35	0.09
JJ4-1	2 319~ 2 328	E _{1l}	1.77	1.84	0.49	1.86	3.10	1.79	26	22	51	0.11	0.18	0.44	1.01	1.00	0.62	0.36	0.07
JJ4-1	2 361~ 2 364	E _{1l}	1.65	1.60	0.51	1.65	2.54	1.55	22	22	56	0.13	0.18	0.43	1.10	0.86	0.57	0.44	0.09
JJ6-1	2 760~ 2 780	E _{1m}	1.78	1.61	0.33	9.53	7.89	0.87	10	15	75	0.11	0.27	7.39	4.06	3.85	0.05	0.63	0.04
JJ6-1	2 860~ 2 875	E _{1m}	1.76	1.64	0.36	4.71	4.37	0.98	7	16	77	0.15	0.29	7.35	6.42	4.84	0.07	0.66	0.04
JJ6-1	3 085~ 3 100	E _{1m}	1.47	1.35	0.33	5.92	7.52	1.31	5	14	81	0.26	0.29	27.63	6.38	/	0.07	0.70	0.02
JJ6-13	154	E _{1m}	1.57	1.43	0.36	5.23	7.93	1.37	14	9	77	0.31	0.30	6.10	2.89	1.96	0.06	0.59	0.02
JJ6-1	3 184~ 3 199	E _{1m}	1.64	1.49	0.26	8.65	8.47	0.94	7	16	77	0.20	0.29	10.57	4.63	7.31	0.07	0.68	0.02

体分层是造成其沉积时期水体缺氧的主要原因。

三环萜烷和四环萜烷是表征陆源有机质输入的重要生物标志化合物(de Adegoke *et al.*, 2015; 杨帆等, 2020)。C₁₉/C₂₃三环萜烷、C₂₀/C₂₃三环萜烷、C₂₄四环萜烷/C₂₆三环萜烷比值越高, 指示陆源有机质输入越高, 反之亦然。上述 3 个参数在月桂峰组和灵峰组表现为低值, 分别为 0.42~0.52、0.97~1.03、0.98~1.29 和 0.27~0.44、0.83~1.10、0.84~1.01; 但在明月峰组表现为高值, 分别为 6.10~27.63、2.89~6.42、1.96~7.31(图 5e~5f), 指示了后者比前者具

有更多的陆源有机质输入, 该结果与正构烷烃分布模式及 C₂₇-C₂₉ 规则甾烷相对含量所分析结果是一致的。

4 烃源岩生烃历史

为了准确揭示椒江凹陷烃源岩生烃特征, 本次研究选取位于凹陷中心区 JJ7-1 井(虚拟井)为研究对象, 采用数模软件 BasinMod 1D 重建了其埋藏史、热史、成熟度史和生烃史。

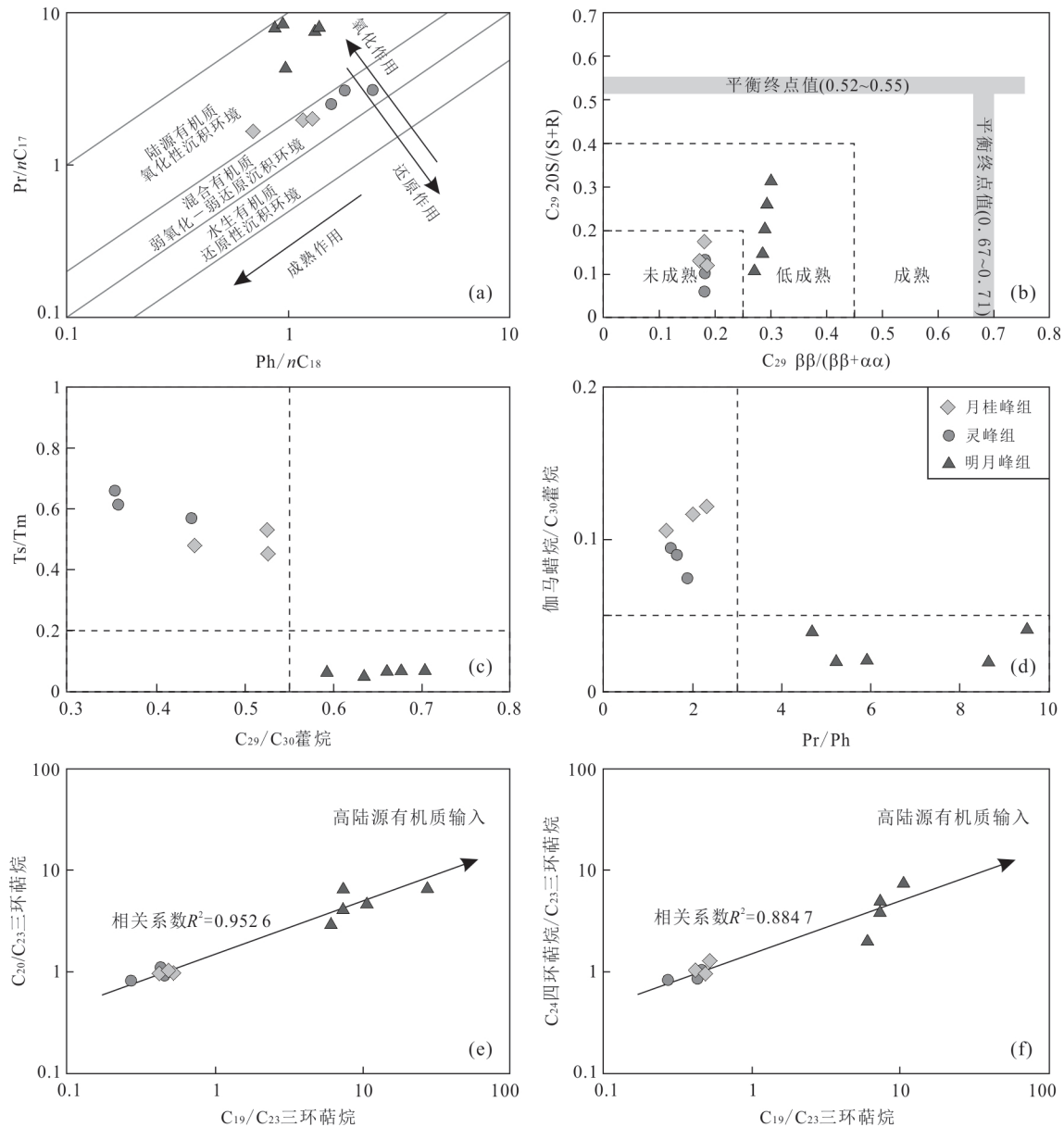


图5 椒江凹陷古新统烃源岩生物标志化合物参数交会图

Fig.5 Cross plots of various biomarker parameters for the Paleocene source rocks in the Jiaojiang sag

4.1 地质模型及地质参数

构建地质模型所涉及到的地层层位及地层沉积和剥蚀年龄数据见表2. 所涉及的关键地质参数包括地层岩性、烃源岩属性、地质边界条件和地层剥蚀量(雷闯等, 2014; Hakimi and Abdullah, 2015). 基于地质类比方法, 通过统计周边钻井不同地层岩性数据和烃源岩地化数据来指定JJ7-1井相应的地质参数(表2). 地质界面条件主要包括古热流、古水深和古沉积-水界面温度. 古热流重建过程为: 首先根据构造演化特征估算古热流值, 其次微调古热流值, 直至计算的镜质组反射率值(BASIN % R_o)与实测的镜质组反射率值达到最佳拟合状态为止

(Makeen *et al.*, 2016; 崔军平等, 2020). 椒江凹陷中心区没有钻井, 以往研究是利用凹陷边缘或凸起区钻井实测 R_o 数据来标定其热流值. 但由于凹陷中心区的热流值一般较凹陷边缘或凸起区低(王社教等, 2000), 上述研究方法会导致其所预测的烃源岩成熟度偏高, 给生烃能力和生烃过程研究带来误差. 因此, 本次研究根据全志刚等(2012)所发表的椒江凹陷中心区 R_o 数据作为标定数据. 古水深根据武法东等(1998)所编制的东海盆地新生代海平面变化曲线获取, 变化范围在0~120 m. 假设古沉积-水界面温度在地质历史时期大致相同, 按照现今北半球东亚北纬27°将古、今沉积-水界面温度统一取

表 2 JJ7-1 井生烃史模拟的地质参数

Table 2 The geological parameters used for modeling of hydrocarbon generation history in well JJ7-1

地层	顶深 (m)	底深 (m)	厚度 (m)	沉积年代		剥蚀年代		剥蚀厚度 (m)	岩性			烃源岩属性		
				开始 (Ma)	终止 (Ma)	开始 (Ma)	终止 (Ma)		砂岩含量 (%)	粉砂岩含量 (%)	泥岩含量 (%)	TOC (%)	HI (mg/g)	干酪根类型
Qd	83	488	405	2.6	0				18.9	23.5	57.6	—	—	—
N ₂	488	857	369	5.3	2.6				38.4	17.9	43.7	—	—	—
N ₁	857	1 302	445	23.3	5.3				56.8	14.4	28.8	0.4	46	Type III
E _{2p}	—	—	—	41.2	36.0	36.0	23.3	600	57.2	16.6	26.2	0.2	23	Type III
E _{2w}	1 302	1 863	561	47.8	41.2				35.9	45.4	18.7	0.3	35	Type III
E _{2o}	1 863	2 498	635	54.5	47.8				34.2	20.7	45.1	0.4	42	Type III
E _{1m}	2 498	3 994	1 496	58.5	55.0	55.0	54.5	800	17.6	35.6	46.8	0.9	77	Type III
E _{1l}	3 994	5 322	1 328	61.0	58.5				3.8	11.5	84.7	2.5	324	Type II
E _{1y}	5 322	6 342	1 020	66.5	61.0				23.0	9.2	67.8	2.3	312	Type II

值为 22 °C. 椒江凹陷在地质历史时期经历了多期强烈的构造抬升运动,本次研究重点考虑了瓯江和玉泉运动两个主要剥蚀事件,两者剥蚀厚度分别在 800~1 000 m 和 500~600 m(李德勇等,2015).埋藏史模拟选用机械压实模型;热史模拟选用瞬变热流模型;成熟史模拟选用 Sweeney and Burnham (1990)提出的 EASY%Ro 模型;生烃史模拟选用 Behar *et al.*(1997)提出的化学动力学模型.

4.2 埋藏史

埋藏史模拟结果表明(图 6a),椒江凹陷在地质历史时期经历了多次沉积埋藏作用与构造抬升作

用的交替.古新世为初始快速沉降阶段,沉降速率达 360 m/Ma,现今地层厚度为 3 840 m,快速沉降为古新统烃源岩的发育创造了有利条件.此后瓯江运动发生,地层整体隆升并遭受强烈剥蚀,剥蚀厚度达到 800 m.始新世进入缓慢沉降阶段,沉降速率下降到 90 m/Ma,现今地层厚度为 1 190 m.受始新世末期玉泉运动和渐新世末期花港运动的影响,地层再次整体隆升导致始新世所沉积的平湖组遭受剥蚀,剥蚀厚度为 600 m.中新世再次进入缓慢沉降阶段,沉降速率为 25 m/Ma,现今地层厚度为 450 m.上新世至今有加速沉降的趋势,沉降速率增加到

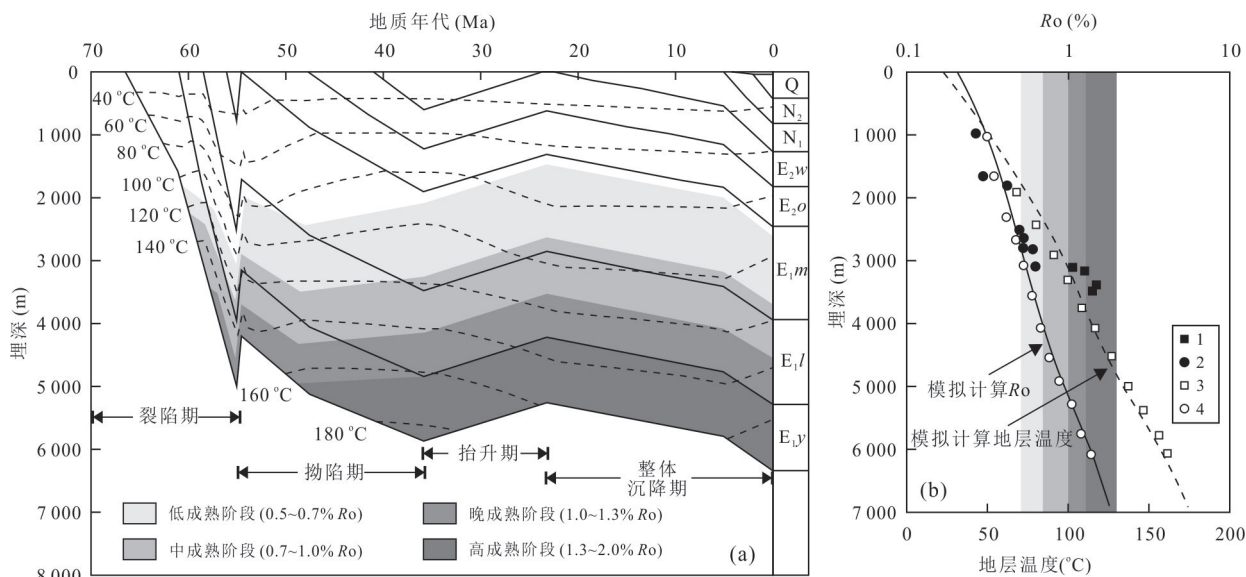


图 6 JJ7-1 井一维模型埋藏史和成熟度史(a)及热成熟度模型标定(b)

Fig.6 Burial and thermal evolution history (a), and calibration of thermal and maturity model (b) for 1-D model constructed in well JJ7-1

图 b 中,1.JJ6-1 井实测地温数据; 2.JJ6-1 井实测 Ro 数据; 3.全志刚等(2012)发表的地层温度数据; 4.全志刚等(2012)发表的 Ro 数据

155 m/Ma, 现今地层厚度为 770 m. 各地层的现今埋藏深度均为地质历史时期的最大埋藏深度.

4.3 热史及成熟度史

现今热流值大小主要取决于地温梯度和岩石单元热导率. 同样, 根据全志刚等(2012)所发表的椒江凹陷中心区地温数据计算, JJ7-1 井现今地温梯度值为 $2.6\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$, 低于椒江凹陷边缘及凸起区地温梯度值 $3.0\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$. 岩石单元热导率采用模拟软件中相应岩相的默认值. 由此, 利用瞬变热流模型计算的 JJ7-1 井现今热流值为 $48.3\text{ mW}/\text{m}^2$. 根据椒江凹陷构造演化特征, 采用 Dan(1978)提出的“瞬时均匀伸展模型”估算了不同地质历史时期的古热流值, 再根据镜质组反射率的计算数据(BASIN %Ro) 与标定数据的吻合关系进行约束和校正(图 6b). 结果表明, 椒江凹陷经历的最高古热流出现在古新世, 热流值为 $74.2\text{ mW}/\text{m}^2$; 自始新世初期开始, 这一地区经历了一个古热流衰减的过程, 至中新世末期古热流值衰减到 $44.8\text{ mW}/\text{m}^2$; 上新世至今古热流值略有增加, 基本维持在 $46.0\sim 48.3\text{ mW}/\text{m}^2$ 之间.

将上述古热流值纳入到成熟度史模型即可重建 JJ7-1 井成熟度史(图 6a), 以动态揭示椒江凹陷不同层位烃源岩在不同地质历史时期的成熟特征. 古新世至始新世, 椒江凹陷大幅度沉降且古热流较高, 是古新统烃源岩热演化程度增加的主要时期. 其中, 月桂峰组在古新世中期先后进入低成熟($0.5\%\sim 0.7\%$ Ro) 和中成熟($0.7\%\sim 1.0\%$ Ro) 阶段; 古新世晚期进入晚成熟阶段($1.0\%\sim 1.3\%$ Ro);

始新世中期至晚期进入高成熟阶段($1.3\%\sim 2.0\%$ Ro); 现今仍处于高成熟阶段. 灵峰组在古新世晚期先后进入低成熟和中成熟阶段; 始新世中期进入晚成熟阶段; 至今尚未进入高成熟阶段. 明月峰组在始新世中期至今一直处于低成熟阶段. 显然, 椒江凹陷古新统烃源岩成熟度主要定型于始新世末期, 这是因为始新世末期至渐新世末期的构造抬升和新近纪的地温降低, 致使新近纪沉积与沉降对其成熟演化所起的作用很小.

4.4 生烃史

以埋藏史和成熟度史分析为基础, 重建了椒江凹陷烃源岩生烃史以揭示不同层位烃源岩生烃过程和生烃强度. 如前所述, 椒江凹陷在地质历史时期经历了多期埋藏作用与构造抬升作用. 第 1 次埋藏阶段一直持续到古新世末期. 经过充足的沉积补偿, 月桂峰组埋藏深度为 $4\ 000\sim 4\ 950\text{ m}$, 对应的 Ro 值为 $0.7\%\sim 1.3\%$, 发生第 1 次生烃作用, 且生油强度大于生气强度, 表现为生油率为 $261\text{ mg}/\text{g}$, 生气率为 $52\text{ mg}/\text{g}$ (图 7a). 但古新世末期的瓯江构造运动地层抬升导致生烃作用进入间歇期. 随后在始新世进入第 2 次埋藏阶段, 月桂峰组埋藏深度为 $4\ 900\sim 5\ 850\text{ m}$, 对应的 Ro 值为 $1.3\%\sim 2.0\%$, 此时干酪根受热温度已超过第 1 次埋深所经历的最高温度时, 发生第 2 次生烃作用, 但不再生油仅生气, 生气率为 $50\text{ mg}/\text{g}$. 此后, 始新世末期至渐新世末期的构造抬升阶段及新近纪再埋藏阶段, 月桂峰组没有进一步发生生烃作用. 月桂峰组现今累计生烃率达 $363\text{ mg}/\text{g}$, 其中生油率为 $261\text{ mg}/\text{g}$ 、生气率为

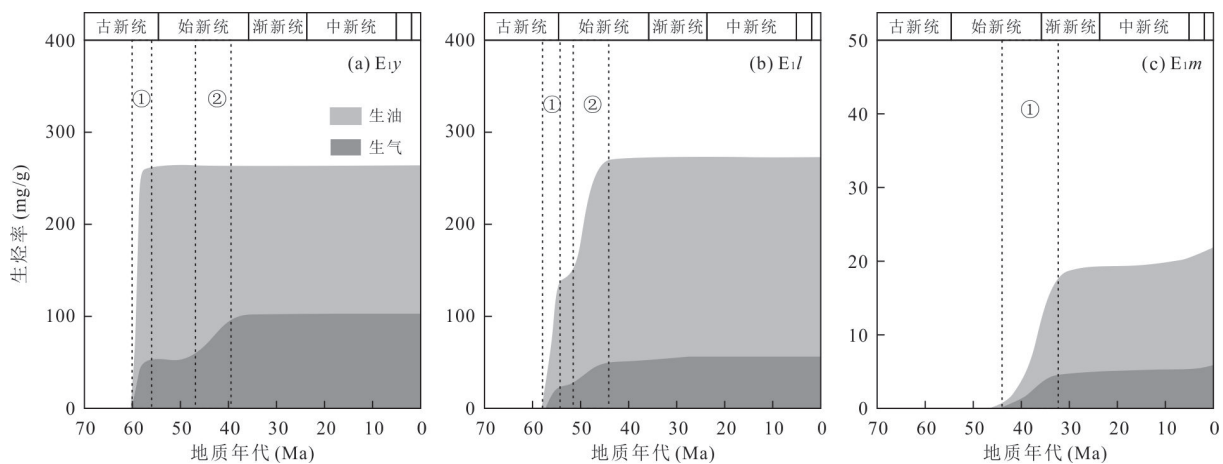


图 7 JJ7-1 井古新统烃源岩生烃史图

Fig.7 Relationship between the oil-gas generation and geological time of the Paleocene source rocks in well JJ7-1

①第 1 次生烃作用; ②第 2 次生烃作用

102 mg/g. 与之类似,灵峰组亦经历了 2 期生烃过程,第 1 次发生在古新世末期,生油率达到 142 mg/g,生气率达到 25mg/g;第 2 次发生在始新世中期至末期,生油率为 130 mg/g,生气率为 31 mg/g(图 7b). 灵峰组现今累计生烃率 328 mg/g,其中生油率为 272 mg/g、生气率为 56 mg/g. 明月峰组仅在始新世末期经历了一次生烃过程,由于普遍处于低成熟阶段,尚未开始大量转化成烃类,现今累计生烃率仅为 24 mg/g,生油率和生气率分别为 19 mg/g 和 5 mg/g(图 7c).

综上所述,月桂峰组是凹陷最主要的生烃层系,生烃能力最强,累计生烃率达 363 mg/g,且生油率大于生气率;灵峰组次之,累计生烃率达 328 mg/g,生油率亦大于生气率;明月峰组生烃能力最弱,累积生烃率仅为 24 mg/g;且三者主要生烃时期均在古新世晚期至始新世. 显然,椒江凹陷烃源岩生烃潜力强,具有广阔的油气勘探前景,应围绕烃源岩生烃中心尤其是月桂峰组烃源岩生烃中心选择形成于中新世之前的有效圈闭进行钻探.

5 结论

(1)月桂峰组和灵峰组生烃潜力高于明月峰组. 月桂峰组和灵峰组泥岩属于好级别烃源岩,有机质丰度高,以 II 型干酪根为主且处于中—高成熟阶段;明月峰组多数属于差级别烃源岩,有机质丰度低,以 III 型干酪根为主且处于低成熟阶段.

(2)有机质输入和保存条件是导致月桂峰组、灵峰组和明月峰组生烃潜力差异的重要因素. 月桂峰组和灵峰组沉积于弱氧化—弱还原环境,有机质为水生生物和陆源高等植物混合来源;明月峰组沉积于氧化环境,有机质主要为陆源高等植物来源.

(3)椒江凹陷古新统烃源岩生烃潜力强,且主要生烃期为古新世晚期至始新世,油气勘探应围绕烃源岩生烃中心尤其是月桂峰组烃源岩生烃中心选择形成于中新世之前的有效圈闭进行钻探.

References

Behar, F., Vandenbroucke, M., Tang, Y., et al., 1997. Thermal Cracking of Kerogen in Open and Closed Systems: Determination of Kinetic Parameters and Stoichiometric Coefficients for Oil and Gas Generation. *Organic Geochemistry*, 26(5/6): 321–339. [https://doi.org/10.1016/S0146-6380\(97\)00014-4](https://doi.org/10.1016/S0146-6380(97)00014-4)

Cai, J., Qi, P., Cui, M., et al., 2016. Well Analysis of Information from Drilled Wells and Revelation to Oil & Gas Exploration in Jiaojiang Sag. *Offshore Oil*, 36(4): 33–39 (in Chinese with English abstract).

Chen, C.F., Zhu, W.L., Fu, X.W., et al., 2017. Provenance Change and Its Influence in Late Paleocene, Jiaojiang Sag, East China Sea Shelf Basin. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 45(10): 1522–1530, 1548 (in Chinese with English abstract).

Chen, J.P., Zhao, C.Y., He, Z.H., 1997. Criteria for Evaluating the Hydrocarbon Generating Potential of Organic Matter in Coal Measures. *Petroleum Exploration and Development*, (1): 1–5, 91 (in Chinese with English abstract).

Cui, J.P., Zhao, J., Ren, Z.L., et al., 2020. Geochemical Characteristics of Lower Cretaceous Source Rocks and Thermal History in the Huhehu Depression, Hailar Basin. *Earth Science*, 45(1): 238–250 (in Chinese with English abstract).

Dan, M., 1978. Some Remarks on the Development of Sedimentary Basins. *Earth and Planetary Science Letters*, 40(1): 25–32. [https://doi.org/10.1016/0012-821X\(78\)90071-7](https://doi.org/10.1016/0012-821X(78)90071-7)

de Adegoke, A. K., Abdullah, W. H., Hakimi, M. H., et al., 2015. Geochemical Characterisation and Organic Matter Enrichment of Upper Cretaceous Gongila Shales from Chad (Bornu) Basin, Northeastern Nigeria: Bioproductivity versus Anoxia Conditions. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 135: 73–87. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2015.08.012>

Didyk, B. M., Simoneit, B. R. T., Brassell, S. C., et al., 1978. Organic Geochemical Indicators of Palaeoenvironmental Conditions of Sedimentation. *Nature*, 272(5650): 216–222. <https://doi.org/10.1038/272216a0>

Hakimi, M. H., Abdullah, W. H., 2015. Thermal Maturity History and Petroleum Generation Modelling for the Upper Jurassic Madbi Source Rocks in the Marib-Shabawah Basin, Western Yemen. *Marine and Petroleum Geology*, 59: 202–216. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2014.08.002>

Hanson, A.D., Zhang, S.C., Moldowan, J.M., et al., 2000. Molecular Organic Geochemistry of the Tarim Basin, Northwest China. *AAPG Bulletin*, 84: 1109–1128. <https://doi.org/10.1306/a9673c52-1738-11d7-8645000102c1865d>

Huang, D.F., Zhang, D.J., Li, J.C., 1989. On Origin of 4-Methyl Steranes and Pregnanes. *Petroleum Exploration and Development*, 16(3): 8–15 (in Chinese with English abstract).

- English abstract).
- Jiang, Z. L., Li, Y. J., Du, H. L., et al., 2015. The Cenozoic Structural Evolution and Its Influences on Gas Accumulation in the Lishui Sag, East China Sea Shelf Basin. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 22: 107–118. <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2014.11.024>
- Lei, C., Ye, J.R., Wu, J.F., et al., 2014. Dynamic Process of Hydrocarbon Accumulation in Low-Exploration Basins: A Case Study of Xihu Depression. *Earth Science*, 39(7): 837–847 (in Chinese with English abstract).
- Lei, C., Yin, S. Y., Ye, J. R., et al., 2021. Characteristics and Deposition Models of the Paleocene Source Rocks in the Lishui Sag, East China Sea Shelf Basin: Evidence from Organic and Inorganic Geochemistry. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 200: 108342. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2021.108342>
- Li, D. Y., Guo, T. Y., Jiang, X. D., et al., 2015. Erosion Thickness Recovery and Tectonic Evolution Characterization of Southern East China Sea Shelf Basin. *Oil & Gas Geology*, 36(6): 913–923 (in Chinese with English abstract).
- Li, S. J., 1999. Sedimentary Environmental Significance of Normal Alkane and the Ratio of Pristane to Phytane. *Journal of the University of Petroleum, China (Edition of Natural Science)*, 23(5): 14–16 (in Chinese with English abstract).
- Makeen, Y. M., Abdullah, W. H., Pearson, M. J., et al., 2016. Thermal Maturity History and Petroleum Generation Modelling for the Lower Cretaceous Abu Gabra Formation in the Fula Sub-Basin, Muglad Basin, Sudan. *Marine and Petroleum Geology*, 75: 310–324. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2016.04.023>
- Moldowan, J. M., Sundararaman, P., Schoell, M., 1986. Sensitivity of Biomarker Properties to Depositional Environment and/or Source Input in the Lower Toarcian of SW-Germany. *Organic Geochemistry*, 10(4/5/6): 915–926. [https://doi.org/10.1016/S0146-6380\(86\)80029-8](https://doi.org/10.1016/S0146-6380(86)80029-8)
- Peters, K. E., Moldowan, J. M., 1991. Effects of Source, Thermal Maturity, and Biodegradation on the Distribution and Isomerization of Homohopanes in Petroleum. *Organic Geochemistry*, 17(1): 47–61. [https://doi.org/10.1016/0146-6380\(91\)90039-M](https://doi.org/10.1016/0146-6380(91)90039-M)
- Qian, Y., Zhang, T., Wang, Z. D., et al., 2018. Organic Geochemical Characteristics and Generating Potential of Source Rocks from the Lower-Middle Jurassic Coal-Bearing Strata in the East Junggar Basin, NW China. *Marine and Petroleum Geology*, 93: 113–126. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2018.02.036>
- Sachsenhofer, R. F., Popov, S. V., Akhmetiev, M. A., et al., 2017. The Type Section of the Maikop Group (Oligocene–Lower Miocene) at the Belaya River (North Caucasus): Depositional Environment and Hydrocarbon Potential. *AAPG Bulletin*, 101(3): 289–319. <https://doi.org/10.1306/08051616027>
- Sinninghe Damsté, J. S., Kenig, F., Koopmans, M. P., et al., 1995. Evidence for Gammacerane as an Indicator of Water Column Stratification. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 59(9): 1895–1900. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(95\)00073-9](https://doi.org/10.1016/0016-7037(95)00073-9)
- Sweeney, J.J., Burnham, A.K., 1990. Evaluation of a Simple Model of Vitrinite Reflectance Based on Chemical Kinetics. *AAPG Bulletin*, 74: 1559–1570. <https://doi.org/10.1306/0c9b251f-1710-11d7-8645000102c1865d>
- ten Haven, H. L., de Leeuw, J. W., Rullkötter, J., et al., 1987. Restricted Utility of the Pristane/Phytane Ratio as a Palaeoenvironmental Indicator. *Nature*, 330(6149): 641–643. <https://doi.org/10.1038/330641a0>
- Tian, B., Li, X. Y., Pang, G. Y., et al., 2012. Sedimentary Systems of the Superimposed Rift–Subsidence Basin: Taking Lishui–Jiaojiang Sag of the East China Sea as an Example. *Acta Sedimentologica Sinica*, 30(4): 696–705 (in Chinese with English abstract).
- Tian, Y., Ye, J. R., Lei, C., et al., 2016. Development Controlling Factors and Forming Model for Source Rock of Yueguifeng Formation in Lishui–Jiaojiang Sag, the East China Sea Continental Shelf Basin. *Earth Science*, 41(9): 1561–1571 (in Chinese with English abstract).
- Tong, Z. G., Zhao, Z. G., Yang, S. C., et al., 2012. Research on Thermal Evolution and Hydrocarbon Expulsion History of Source Rocks in Low-Exploration Basins: A Case Study on Jiaojiang Sag, East China Sea Basin. *Petroleum Geology & Experiment*, 34(3): 319–324, 329 (in Chinese with English abstract).
- Volkman, J. K., 1986. A Review of Sterol Markers for Marine and Terrigenous Organic Matter. *Organic Geochemistry*, 9(2): 83–99. [https://doi.org/10.1016/0146-6380\(86\)90089-6](https://doi.org/10.1016/0146-6380(86)90089-6)
- Wang, S. J., Hu, S. B., Li, T. J., et al., 2000. The Terrestrial Heat Flow in Junggar Basin. *Chinese Science Bulletin*, 45(12): 1327–1332 (in Chinese).
- Wu, F. D., Li, S. T., Lu, Y. C., et al., 1998. The Tertiary Sea Level Changes in the East China Sea Shelf Basin. *Scientia Geologica Sinica*, 33(2): 214–221 (in Chinese with English abstract).
- Xu, J. Y., Zhu, X. F., Song, Y., et al., 2019. Geochemical

- Characteristics and Oil-Source Correlation of Paleogene Source Rocks in the South Yellow Sea Basin. *Earth Science*, 44(3): 848–858(in Chinese with English abstract).
- Yang, F., Wang, Q., Hao, F., et al., 2020. Biomarker Characteristics of Source Rock and Oil-Correlation in Raoyang Depression, Jizhong Sub-Basin. *Earth Science*, 45(1): 263–275(in Chinese with English abstract).
- Yin, S., Ding, W.L., Hu, Q.J., et al., 2016. Hydrocarbon Source Rock Characteristics and Favorable Hydrocarbon-Generating Area Evaluation of Carboniferous-Permian Coal Measures Strata in Qinshui Basin, Shanxi, China. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 43(2): 163–176(in Chinese with English abstract).
- Yin, S.Y., He, S., Lei, C., et al., 2014. Characteristics and Hydrocarbon Generation-Expulsion History of Yueguifeng Formation Source Rock in Lishui-Jiaojiang Depression, East China Sea Shelf Basin. *Marine Geology Frontiers*, 30(8): 35–41, 65(in Chinese with English abstract).
- Zhang, L. P., Huang, D. F., Liao, Z. Q., 1999. Gammacerane-Geochemical Indicator of Water Column Stratification. *Acta Sedimentologica Sinica*, 17(1): 136–140(in Chinese with English abstract).
- Zhang, S.L., Xia, B., 2005. Characters of Tectonic Evolution of the Lishui-Jiaojiang Sag and Oil Accumulation. *Natural Gas Geoscience*, 16(3): 324–328(in Chinese with English abstract).
- Zhu, Y.M., Zhou, J., Gu, S.X., et al., 2012. Molecular Geochemistry of Eocene Pinghu Formation Coal-Bearing Source Rocks in the Xihu Depression, East China Sea Shelf Basin. *Acta Petroli Sinica*, 33(1): 32–39 (in Chinese with English abstract).
- 附中文参考文献**
- 蔡佳, 祁鹏, 崔敏, 等, 2016. 椒江凹陷已钻井分析及对油气勘探的启示. *海洋石油*, 36(4): 33–39.
- 陈春峰, 朱伟林, 付晓伟, 等, 2017. 东海椒江凹陷晚古新世物源变化. *同济大学学报(自然科学版)*, 45(10): 1522–1530, 1548.
- 陈建平, 赵长毅, 何忠华, 1997. 煤系有机质生烃潜力评价标准探讨. *石油勘探与开发*, (1): 1–5, 91.
- 崔军平, 赵金, 任战利, 等, 2020. 海拉尔盆地呼和湖凹陷下白垩统烃源岩地球化学特征及热演化史. *地球科学*, 45(1): 238–250.
- 黄第藩, 张大江, 李晋超, 1989. 论 4-甲基甾烷和孕甾烷的成因. *石油勘探与开发*, 16(3): 8–15.
- 雷闯, 叶加仁, 吴景富, 等, 2014. 低勘探程度盆地成藏动力学过程: 以西湖凹陷中部地区为例. *地球科学*, 39(7): 837–847.
- 李德勇, 郭太宇, 姜效典, 等, 2015. 东海陆架盆地南部剥蚀厚度恢复及构造演化特征. *石油与天然气地质*, 36(6): 913–923.
- 李守军, 1999. 正烷烃、姥鲨烷与植烷对沉积环境的指示意义: 以山东济阳坳陷下第三系为例. *石油大学学报(自然科学版)*, 23(5): 14–16.
- 田兵, 李小燕, 庞国印, 等, 2012. 叠合断陷盆地沉积体系分析: 以东海丽水—椒江凹陷为例. *沉积学报*, 30(4): 696–705.
- 田杨, 叶加仁, 雷闯, 等, 2016. 东海陆架盆地丽水—椒江凹陷月桂峰组烃源岩发育控制因素及形成模式. *地球科学*, 41(9): 1561–1571.
- 全志刚, 赵志刚, 杨树春, 等, 2012. 低勘探程度盆地烃源岩热演化及排烃史研究: 以东海椒江凹陷为例. *石油实验地质*, 34(3): 319–324, 329.
- 王社教, 胡圣标, 李铁军, 等, 2000. 准噶尔盆地大地热流. *科学通报*, 45(12): 1327–1332.
- 武法东, 李思田, 陆永潮, 等, 1998. 东海陆架盆地第三纪海平面变化. *地质科学*, 33(2): 214–221.
- 徐建永, 朱祥峰, 宋宇, 等, 2019. 南黄海盆地古近系烃源岩地球化学特征及油源对比. *地球科学*, 44(3): 848–858.
- 杨帆, 王权, 郝芳, 等, 2020. 冀中坳陷饶阳凹陷北部烃源岩生物标志物特征与油源对比. *地球科学*, 45(1): 263–275.
- 殷世艳, 何生, 雷闯, 等, 2014. 东海陆架盆地丽水—椒江凹陷月桂峰组烃源岩特征及生排烃史. *海洋地质前沿*, 30(8): 35–41, 65.
- 尹帅, 丁文龙, 胡秋嘉, 等, 2016. 沁水盆地石炭—二叠煤系地层烃源岩特征及生烃有利区评价. *成都理工大学学报(自然科学版)*, 43(2): 163–176.
- 张立平, 黄第藩, 廖志勤, 1999. 伽马蜡烷: 水体分层的地球化学标志. *沉积学报*, 17(1): 136–140.
- 张胜利, 夏斌, 2005. 丽水—椒江凹陷构造演化特征与油气聚集. *天然气地球科学*, 16(3): 324–328.
- 朱扬明, 周洁, 顾圣啸, 等, 2012. 西湖凹陷始新统平湖组煤系烃源岩分子地球化学特征. *石油学报*, 33(1): 32–39.