

文章编号:1672-6561(2014)04-0087-12

投稿网址:<http://jese.chd.edu.cn/>

下刚果盆地海相烃源岩地球化学特征、成因及其发育的控制因素

曹 军¹, 钟宁宁¹, 邓运华², 康洪全², 孙玉梅², 刘 岩³,
戴 娜¹, 黄小艳¹, 朱顺玲¹

(1. 中国石油大学(北京) 油气资源与探测国家重点实验室, 北京 102249; 2. 中海油研究总院, 北京 100028; 3. 长江大学 计算机科学学院, 湖北 荆州 434023)

摘 要:下刚果盆地深水区的油气显示出了海相原油的特征, 盐上海相烃源岩开始受到关注。通过对下刚果盆地海相烃源岩地球化学资料分析, 综合评价了盐上 4 套海相烃源岩的地球化学特征和生烃潜力, 研究了其成因并划分了成因类型, 同时探讨了不同成因类型烃源岩发育的主控因素。结果表明: 下刚果盆地盐岩层之上发育海相烃源岩, 有机质丰度中等—好, 干酪根类型为 II、III 型, 成因上以海相内源型和海相混合生源型为主; 盆地海相烃源岩整体在 3 500 m 左右深度进入生油窗, 成熟的海相烃源岩是下刚果盆地深水区油气的重要来源之一; 由于上升洋流、缺氧环境(大洋缺氧事件)和古河流的作用, 以及海洋、河流两种地质营力此消彼长的关系, 自晚白垩世至中新世, 盆地沉积环境从海湾变迁到受河流作用逐渐加强的开阔海洋, 有机质来源从以海洋有机质为主过渡到河流携带来的陆源有机质比例加重, 直到以陆源有机质为主; 海-陆二元有机质输入量的相对变化和海洋沉积环境的变迁从根本上决定了海相烃源岩的特征。

关键词:地球化学; 海相烃源岩; 生烃潜力; 生源输入; 沉积环境; 成因类型; 控制因素; 下刚果盆地

中图分类号: P618.130.2⁺7; TE122 **文献标志码:** A

Geochemical Characteristics, Origin and Factors Controlling Formation of Marine Source Rock in Lower Congo Basin

CAO Jun¹, ZHONG Ning-ning¹, DENG Yun-hua², KANG Hong-quan², SUN Yu-mei²,
LIU Yan³, DAI Na¹, HUANG Xiao-yan¹, ZHU Shun-ling¹

(1. State Key Laboratory of Petroleum Resources and Prospecting, China University of Petroleum, Beijing 102249, China; 2. CNOOC Research Institute, Beijing 100028, China; 3. School of Computer Science, Yangtze University, Jingzhou 434023, Hubei, China)

Abstract: The characteristic of petroleum in the deepwater area of Lower Congo Basin is marine, so that the marine source rock above the salt is a concern. According to the geochemical analysis data and geological information of marine source rock in Lower Congo Basin, the geochemical characteristics, hydrocarbon potential, origin and genetic types for the four sets of marine source rocks were comprehensively discussed, and the main controlling factors for the different genetic types of marine source rocks were analyzed. The results show that the marine source rocks develop above the salt rock of Lower Congo Basin, and the abundances of organic matters of them are moderate-good with types II and

收稿日期: 2014-06-10

基金项目: 国家科技重大专项项目(2011ZX05030-001)

作者简介: 曹 军(1983-), 男, 重庆市人, 理学博士研究生, E-mail: 277847115@qq.com。

通讯作者: 钟宁宁(1960-), 男, 广东佛冈人, 教授, 博士研究生导师, 理学博士, E-mail: nnzhongxp@cup.edu.cn。

III of kerogens, and the source rocks are consist primarily of the marine endogenous type and marine mixed type; marine source rocks in Lower Congo Basin enter the oil-generating window at the depth of about 3 500 m, and mature marine source rocks are important sources of petroleum in the deepwater area of Lower Congo Basin; because of the ascending current, anoxic environments (oceanic anoxic events), palae-fluvial action and the shift relationship between the geologic agents of ocean and river, the sedimentary environments in Lower Congo Basin change from the gulf to the open ocean strengthened gradually by fluvial action, and organic matter inputs vary gradually from marine-dominated to terrigenous-dominated from Late Cretaceous to Miocene; the changes of relative marine-terrigenous organic matter input and ocean sedimentary environment fundamentally determine the characteristics of marine source rocks.

Key words: geochemistry; marine source rock; hydrocarbon potential; organic matter input; sedimentary environment; genetic type; controlling factor; Lower Congo Basin

0 引言

下刚果盆地油气资源相当丰富。据美国 IHS 数据库(2011)统计资料显示,下刚果盆地油气储量(2P,概算储量)约为 129.95 亿桶油当量,是仅次于尼日尔三角洲的非洲第二大油气区。

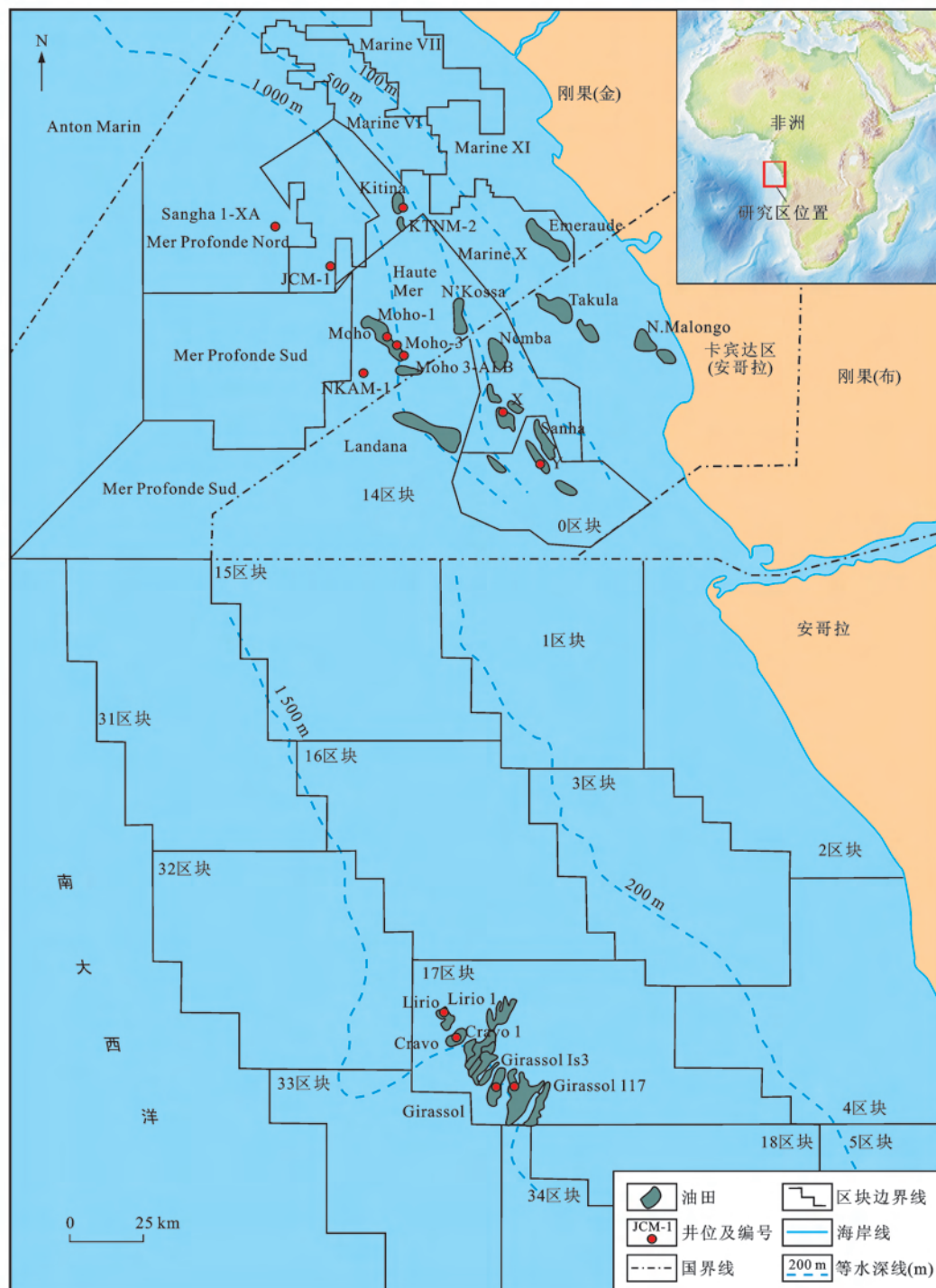
20 世纪中后叶,下刚果盆地的油气勘探实践表明,盆地油气的主力烃源岩为裂谷期形成的盐下下白垩统湖相泥岩^[1-2],而发育在岩盐层之上的海相层系烃源岩被认为是次要的烃源岩^[3],因此,未受到太多重视。自 20 世纪 80 年代以后,随着深水油气勘探的深入,越来越多的勘探实践和研究结果表明,下刚果盆地深水油气显示了盐上上白垩统以来的海相烃源岩的贡献^[4-5]。例如,下刚果盆地安哥拉卡宾达省 0 区块深水油气显示上白垩统海相烃源岩 Iabe 组和 Malembo 组贡献明显^[6],以及安哥拉深水区 Girassol 大型油气田上渐新统一中新统油气藏中的油气很大程度上来自上白垩统海相烃源岩。因此,发育在岩盐层之上的海相烃源岩应当引起关注。

由于下白垩统湖相烃源岩是以往发现的下刚果盆地油气的主要来源,所以 Cole 等对下刚果盆地裂谷期发育的下白垩统湖相烃源岩进行了详细的研究^[7-13],而对上白垩统和新生代海相烃源岩的研究却相对薄弱,且仅局限于下刚果盆地单井或单区块海相烃源岩的评价以及局部地区盐上层系海相烃源岩地球化学特征和油源对比方面^[2-3,6]。研究较为分散,缺乏较为综合的分析对比,以至于对下刚果盆地海相烃源岩的认识缺乏较系统的把握。笔者基于下刚果盆地各地区、各层系海相烃源岩的地质和地球化学资料,采用有机地球化学、同位素地球化学、分子地球化学、有机岩石学分析方法,系统研究了下刚

果盆地海相碎屑岩烃源岩的地球化学特征,从沉积环境和生源输入方面研究海相烃源岩的成因,划分其成因类型,并结合地质认识,探讨不同成因类型海相烃源岩发育的主要控制因素。

1 地质概况

下刚果盆地位于西非大陆边缘中部,从北向南横跨加蓬南部、刚果(布)、安哥拉卡宾达省、刚果(金)和安哥拉北部,盆地 75% 的面积位于海上,其他分布在陆地上(图 1)^[14-18]。下刚果盆地是伴随着非洲与南美板块分裂和大西洋开闢而形成的西非典型被动大陆边缘系列含盐盆地之一^[7,19-25]。盆地在阿普第阶(Aptian)受持续的海侵影响发育海相碳酸盐岩沉积,干旱气候导致 Loeme 盐岩的形成,该盐岩层分隔了同裂谷期湖相含油气系统和后裂谷期海相含油气系统;在阿尔布阶(Albian),伴随着后裂谷阶段南大西洋的开闢,在大陆边缘局限海洋环境下,地层发育以碳酸盐岩为主,半深海发育海相泥岩,浅海发育碳酸盐岩,近岸沉积陆源碎屑砂;晚白垩世塞诺曼阶(Cenomanian)—早始新世,下刚果盆地从局限海环境过渡到完全开阔的海洋环境^[3,7],持续海侵使得在半深海—浅海环境下发育高有机质丰度的海相泥页岩;古近纪末,大陆边缘向海方向的坍塌导致向西强烈倾斜和区域性的沉降,形成不同级次的断块和坳陷;渐新世—中新世,由浊积砂岩和粉砂质黏土构成的海退层序不整合叠置在较老的岩层之上,构成了当今大陆边缘盆地的原型^[3,7]。下刚果盆地自阿尔布阶以来的盐上层系中发育 4 套海相烃源岩(图 2),分别为:阿尔布阶的海相灰泥岩或泥灰岩(Pinda 组和 Sendji 组)、上白垩统海相泥页岩(Iabe 组和 Likouala 组)、古新统一始新统海相页岩



图件源自美国 IHS 数据库(2011)

图1 下刚果盆地位置及井位分布

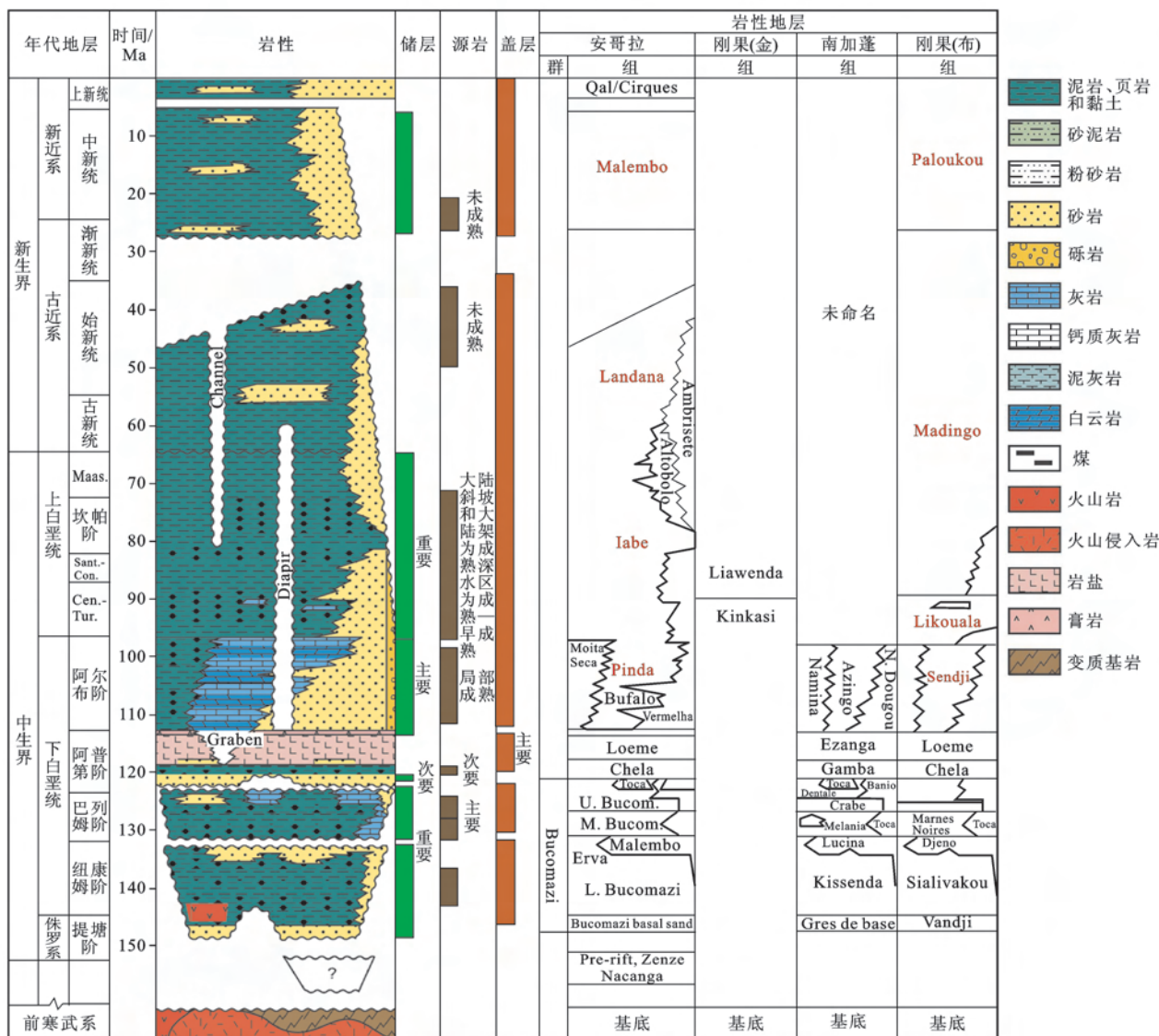
Fig. 1 Location and Distribution of Wells in Lower Congo Basin

(Landana 组和 Madingo 组上部)以及渐新统一中新统浊积体泥岩(Malembo 组和 Paloukou 组)^[3,7]。

2 海相烃源岩地球化学特征

下刚果盆地盐岩层之上广泛分布海相地层,自北向南各大油田皆有钻遇(图1)。盆地在晚白垩

世一中新世不同地区发育几套等时地层,其在发育时间和沉积环境上具有相似性,如 Pinda 组和 Sendji 组、Iabe 组和 Likouala 组及 Madingo 组下部、Landana 组和 Madingo 组上部、Malembo 组和 Paloukou 组(图2)。从岩性上看,该盆地主要有海相碳酸盐岩和海相碎屑岩两类,潜在的烃源岩包括:①海相碳酸



图件源自美国 IHS 数据库(2011);Maas. 为马斯特里赫特阶;Sant.-Con. 为三叠阶—科尼亚克阶;Cen.-Tur. 为塞诺曼阶—土伦阶

图 2 下刚果盆地地层综合柱状图

Fig. 2 Stratigraphic Chart of Lower Congo Basin

盐岩烃源岩,为发育于早白垩世阿尔布阶浅海碳酸盐环境下的泥灰岩或灰泥岩,主要见于 Sendji 和 Pinda 组;②海相碎屑岩烃源岩,为晚白垩世—中新世大陆边缘发育的、巨厚的富有有机质页岩,主要分布在安哥拉 Iabe 组、Landana 组、Malembo 组和刚果(布) Likouala 组、Madingo 组、Paloukou 组。笔者系统采集了下刚果盆地 13 口钻井(图 1)8 个层组(图 2、3)的 345 个海相烃源岩样品热解数据(表 1),综合分析其海相烃源岩的地球化学特征。

2.1 有机质丰度和类型

根据总有机碳数据(表 1 和图 3)以及热解峰温与氢指数的关系(图 4),早白垩世阿尔布阶刚果(布) Sendji 组和安哥拉卡宾达区 Pinda 组灰泥岩或

泥灰岩有机质丰度较差,平均值分别为 0.76% 和 0.78%,有机质类型为 II 型。Pinda 组氢指数为 $(87 \sim 200) \times 10^{-3}$,平均值为 129×10^{-3} ,有机质类型为 III 型;Sendji 组氢指数为 $(103 \sim 607) \times 10^{-3}$,平均值为 259×10^{-3} ,有机质类型为 II 型,少数为 I 型。上白垩统至中新统海相泥页岩有机质丰度整体较好。安哥拉卡宾达区发育较厚的上白垩统 Iabe 组页岩,总有机碳(TOC)最大高达 10%,平均值为 3.06%,氢指数(HI)为 $(247 \sim 701) \times 10^{-3}$,平均值为 394×10^{-3} ;刚果(布) Haute Mer 区 Likouala 组有机质丰度中等(图 3),平均值为 1.49%,干酪根为 II 型;安哥拉卡宾达区 Landana 组深水页岩厚度较薄,整体小于 200 m,烃源岩的总有机碳平均值为

表 1 下刚果盆地海相烃源岩综合评价结果

Tab. 1 Intergrated Evaluation Results of Marine Source Rocks in Lower Congo Basin

年代	地区	层组	总有机碳/%		总有机碳 样品数	氢指数/ 10^{-3}		氢指数样 品数	生烃潜量/ 10^{-3}		生烃潜量 样品数	镜质体 反射率/%
			范围	平均值		范围	平均值		范围	平均值		
渐新统— 中新统	安哥拉	Malembo 组	1.46~4.99	2.42	76	90~550	249	57				0.29~0.54
	刚果(布)	Paloukou 组	0.72~3.19	1.55	50	51~318	147	50	0.67~5.72	2.02	50	0.28~0.49
古新统— 始新统	安哥拉	Landana 组		1.73								
	刚果(布)	Madingo 组	0.88~4.30	2.31	12	193~561	376	12	2.12~23.3	9.8	12	0.29~0.47
上白 垩统	安哥拉	Iabe 组	2.05~4.96	3.06	33	247~701	394	33				0.46~0.70
	刚果(布)	Likouala 组	0.44~2.84	1.34	20	83~438	279	20	0.58~11.4	4.2	20	0.30~0.76
阿尔 布阶	安哥拉	Pinda 组	0.29~1.60	0.78	39	87~200	129	39				0.58~0.80
	刚果(布)	Sendji 组	0.12~1.88	0.76	73	103~607	259	73	0.77~3.39	1.58	30	0.31~0.88

注:数据来源于文献[3]、[6]、[26]、美国 IHS 数据库(2011)以及中海油研究总院提供的样品分析测试结果。

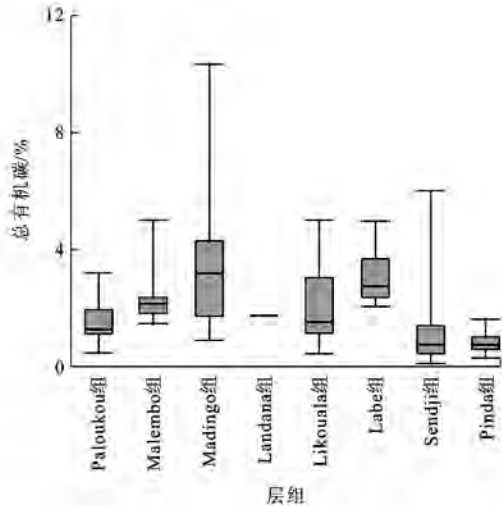


图 3 下刚果盆地各层组海相烃源岩有机质丰度分布特征

Fig. 3 Distribution Characteristics of Organic Matter Abundance of Marine Source Rocks in Each Formation of Lower Congo Basin

1.73%,氢指数为 $(83\sim438)\times10^{-3}$,平均值为 279×10^{-3} ,干酪根为Ⅱ型;刚果(布)Madingo 组泥页岩总有机碳最大高达 10.3%(图 3),平均值为 2.31%,氢指数高达 701×10^{-3} ,平均值 376×10^{-3} ,古新统一始新统海相泥岩干酪根主要为Ⅱ₁和Ⅱ₂型;安哥拉卡宾达区中新统 Malembo 组烃源岩总有机碳高达 5%,平均值为 2.42%,氢指数为 $(90\sim550)\times10^{-3}$,平均值为 249×10^{-3} ;安哥拉 17 区块渐新统泥岩厚度几十米到一百多米,有机质丰度分布在 0.39%~3.99%之间,有机质类型为Ⅲ型和Ⅱ₂型^[26];刚果(布)Paloukou 组发育巨厚(约 1 800 m)的海相泥岩(图 3),其总有机碳平均值为 1.53%,氢指数为 $(51\sim318)\times10^{-3}$,平均值为 147×10^{-3} 。

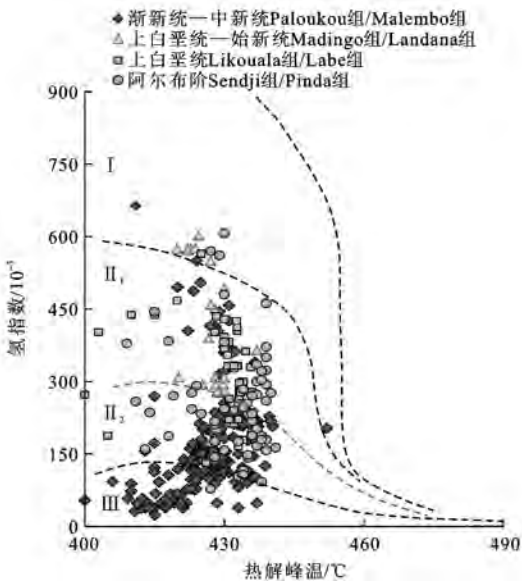


图 4 下刚果盆地不同层组海相烃源岩的干酪根类型

Fig. 4 Kerogen Types of Marine Source Rocks in Different Formations of Lower Congo Basin

自早白垩世阿尔布阶至中新世,下刚果盆地海相烃源岩有机质丰度呈现由低到高,再逐渐降低的趋势,有机质类型从Ⅱ型变化到Ⅱ型和Ⅲ型。有机质丰度和类型的变化在很大程度上取决于生源输入和沉积环境的变化。

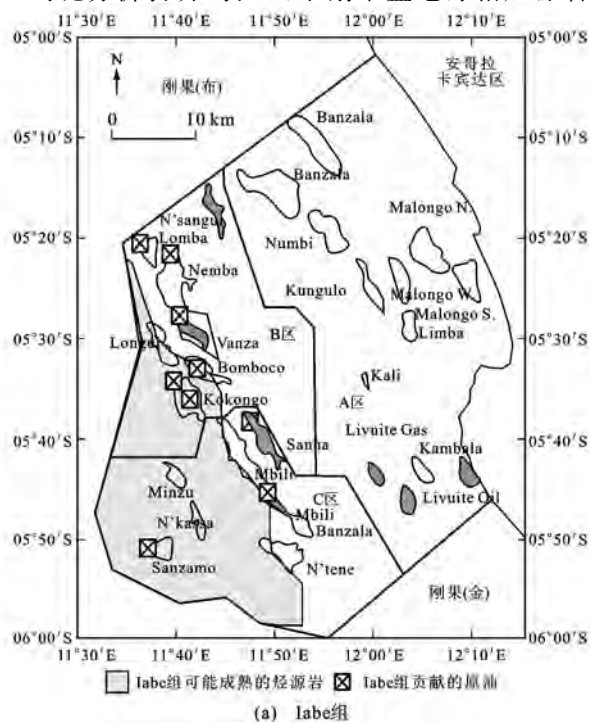
2.2 成熟度及生烃潜力

根据热解峰温和镜质体反射率统计结果(表 1 和图 4),下刚果盆地海相烃源岩热解峰温整体小于 440℃,处于未成熟—低成熟阶段。刚果(布)Haute Mer 区 Sendji 组生烃潜量为 $(0.77\sim3.99)\times10^{-3}$,平均值为 1.58×10^{-3} ,具有倾油性,镜质体反射率为 0.31%~0.88%,整体处于低成熟—成熟阶段;上白垩统 Likouala 组生烃潜量为 $(0.58\sim11.4)\times10^{-3}$,平均值为 4.2×10^{-3} ,具有倾油性,镜质体反

射率为 0.30%~0.76%,处于未成熟—低成熟阶段;古新统一始新统 Madingo 组生烃潜量为 $(2.12\sim 23.3)\times 10^{-3}$,平均值为 9.8×10^{-3} ,处于未成熟阶段,局部地区由于地层埋藏深度较大而成熟。中新统 Paloukou 组生烃潜量为 $(0.67\sim 5.72)\times 10^{-3}$,平均值为 2.02×10^{-3} ,处于未成熟阶段。在下刚果盆地安哥拉卡宾达区海相烃源岩显示了相似的成熟度和生烃潜力。如上白垩统 Iabe 组镜质体反射率为 0.46%~0.70%,处于低成熟—成熟阶段;古新统一始新统 Landana 组氧指数极低,热解类型指数较高,具有明显的倾油性^[3];渐新统一中新统 Malembo 组镜质体反射率为 0.29%~0.54%,处于未成熟—低成熟阶段,同时具有倾油性和倾气性。

已有油气勘探资料揭示,由于盐上地层发育时代比较新,上覆沉积物厚度薄,埋藏浅,因而导致整体成熟度比较低,而只有在其上覆地层比较厚的断陷或凹陷区,海相烃源岩才达到成熟。例如,安哥拉卡宾达区 O 区块,成熟的 Iabe 组/Landana 组烃源岩主要分布在埋藏较深的西部深水区^[6],而中新统 Malembo 组烃源岩只有在上覆较厚的第三系地层凹槽内的部分才有可能达到成熟阶段(图 5),Haute Mer 区块 M 井生烃门限约 3 500 m(图 6)。因此,成熟度是制约海相烃源岩生烃潜力的关键。

对比分析表明(表 4),下刚果盆地海相烃源岩

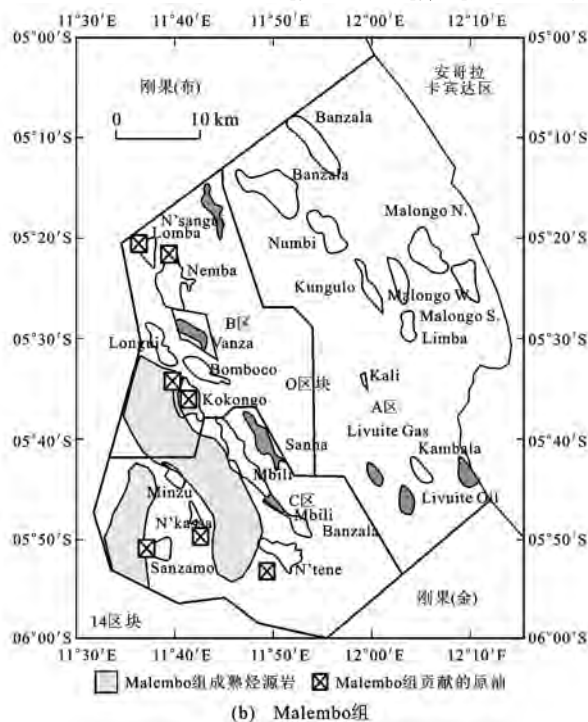


上白垩统烃源岩有机质丰度、氢指数和生烃潜量变化规律呈现由低变高,再变低的趋势,成熟度随地层时代变老逐渐增加。下白垩统阿尔布阶海相碳酸盐岩烃源岩无论是有机质丰度、氢指数,还是生烃潜量,在盐上海相烃源岩中都是最低的,但是由于其地层时代较老以及埋藏深度较大,所以其成熟度相对较高,烃源岩已经进入生油窗;上白垩统海相烃源岩生烃潜量较高,处于低成熟—成熟阶段,部分烃源岩进入生油窗,生烃潜力大;古新统一始新统海相烃源岩有机质丰度、氢指数和生烃潜量 3 项指标都最高,但成熟度低;渐新统一中新统烃源岩氢指数和生烃潜量相对较低,且整体处于未成熟阶段,仅局部地区为低成熟阶段。综上所述,下刚果盆地盐上有效烃源岩可能主要为上白垩统海相烃源岩,即成熟的海相烃源岩应是下刚果盆地深水区油气的重要来源之一。

3 生源输入与沉积环境

生物标志化合物和稳定碳同位素组成具有特殊的指向性,在反映烃源岩有机质输入和沉积环境方面具有可靠性,因此,笔者利用某些特殊的地球化学参数和指标来研究下刚果盆地海相烃源岩的成因问题。

上白垩统 Iabe 组烃源岩中 C_{27} 、 C_{28} 甾烷相对含量均大于 35%,最大达 45.3%(图 7), C_{27} 规则甾烷相对含量一般远高于 C_{29} 甾烷, C_{29}/C_{27} 甾烷比值整



图件引自文献[4]

图 5 安哥拉卡宾达区 O 区块海相原油及海相烃源岩成熟度分布

Fig. 5 Distributions of Marine Oils and Marine Source Rock Maturity of Block 0 in Cabinda Area of Angola

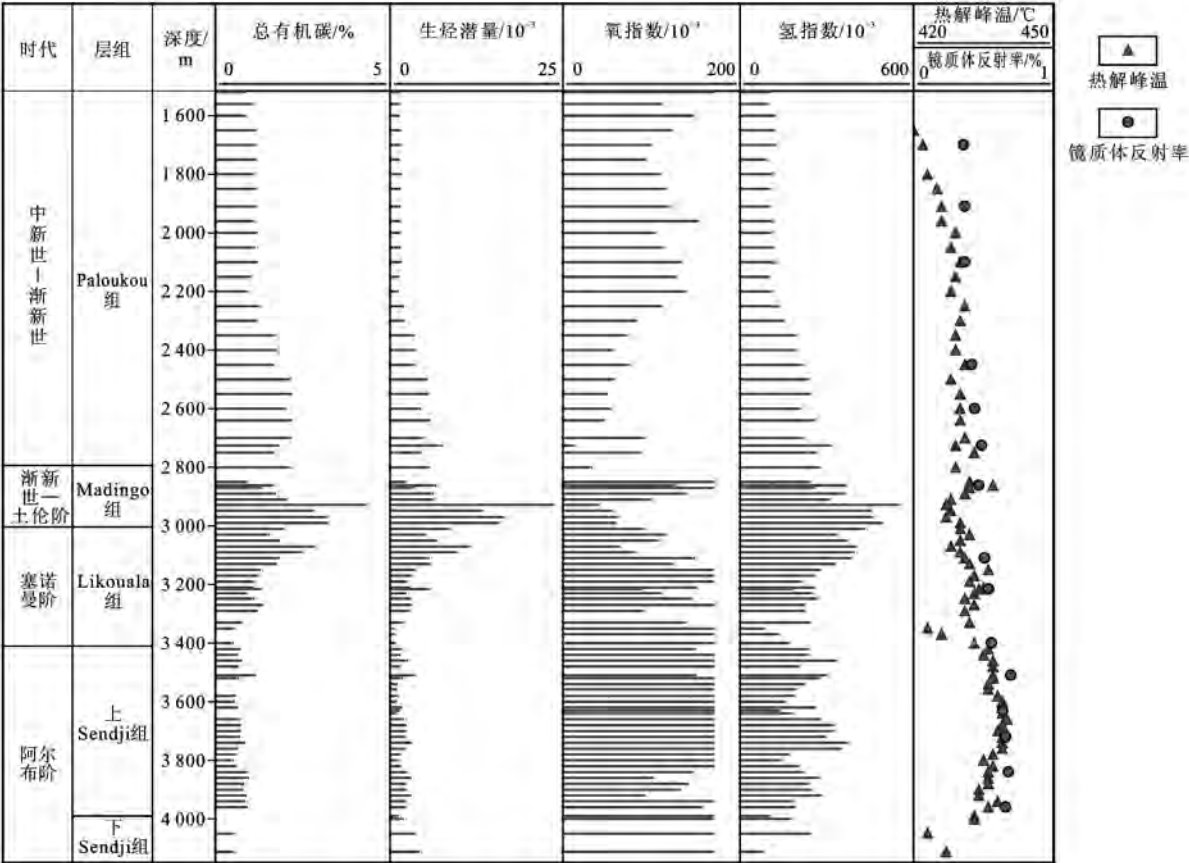


图 6 下刚果盆地 M 井海相烃源岩热解及成熟度演化剖面

Fig. 6 Profile of Maturity Evolution and Pyrolysis of Marine Source Rock of Well M in Lower Congo Basin

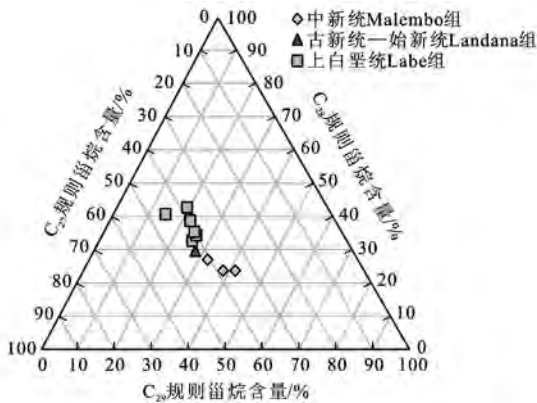


图 7 下刚果盆地海相烃源岩 C_{27} - C_{28} - C_{29} 规则甾烷分布

Fig. 7 Distributions of C_{27} - C_{28} - C_{29} Regular Steranes of Marine Source Rocks in Lower Congo Basin

体处于 0.4~0.8 之间(图 8)。通常,水生生物富含 C_{27} 和 C_{28} ,而陆生高等植物和某些藻类具有更高的 C_{29} 甾烷含量^[27]。研究区规则甾烷的分布特征可能反映了典型的海洋水生生物输入特征。奥利烷被认为是晚白垩世以来高等植物(特别是被子植物)输入的可靠标志,通常用奥利烷指数来表示沉积有机质中高等植物输入的比例^[28-29]。上白垩统烃源岩中奥利

烷指数极低(低于 0.05),表明该烃源岩受到陆源高等植物的影响极小,而海洋水生生物输入量占绝对优势。从稳定碳同位素组成上看,上白垩统 Labe 组烃源岩饱和烃 $\delta(^{13}\text{C})$ 值介于 $(-28.6 \sim -31.5) \times 10^{-3}$,芳烃 $\delta(^{13}\text{C})$ 值分布在 $(-28.7 \sim -29.5) \times 10^{-3}$,碳同位素整体偏轻(图 9)。这进一步说明生源主要来源于海洋水生生物。Pr/Ph 值是常用沉积环境的指示参数^[30]。一般情况下,Pr/Ph 值小于或大于 1.0 可分别指示还原性或氧化性沉积环境^[31]。Pr/Ph 值小于 0.5 为强还原性膏盐沉积环境^[32],介于 0.5~1.0 为还原环境,介于 1.0~2.0 为弱还原-弱氧化环境,大于 2.0 为偏氧化环境,如滨海沼泽或浅海沉积。Labe 组烃源岩中 Pr/Ph 值小于 1.5 (图 8),说明其沉积于弱还原条件下的水体环境。这与晚白垩世时期持续的海侵以及沉积环境处于半深海—深海,水体处于缺氧状态是一致的^[6]。也正是因为缺氧环境,以海洋原地生源为主的有机质才更利于保存,发育丰度高、类型好的海相烃源岩,总有机碳平均值为 3.04%,氢指数最大达 701×10^{-3} ,平均值为 394×10^{-3} ,干酪根以 II 型为主。

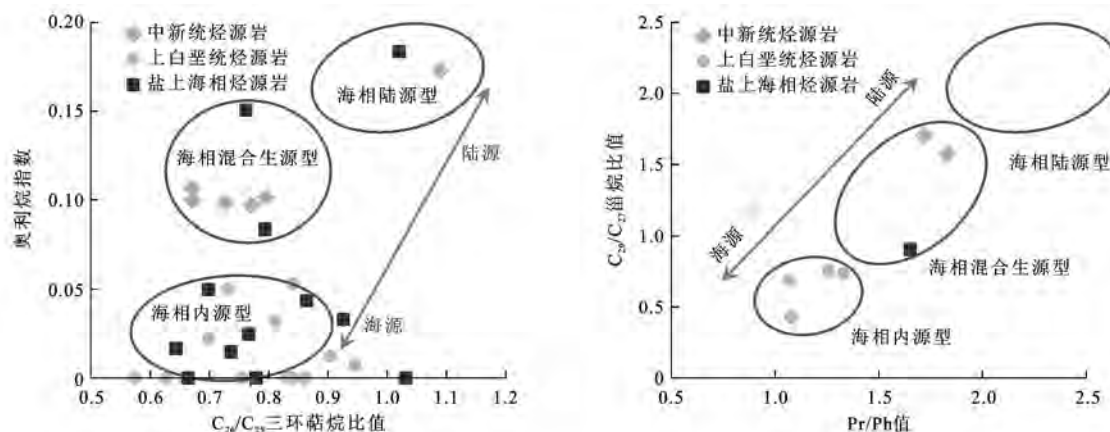


图 8 下刚果盆地海相烃源岩生物标志物特征及成因类型划分

Fig. 8 Biomarker Characteristics and Division of Genetic Types of Marine Source Rocks in Lower Congo Basin

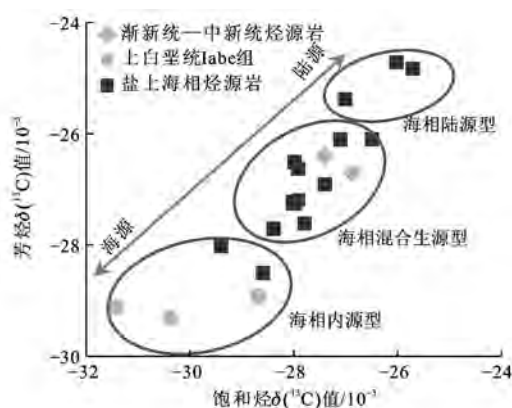


图 9 下刚果盆地海相烃源岩碳同位素分布特征及成因类型

Fig. 9 Carbon Isotope Characteristics and Genetic Types of Marine Source Rocks in Lower Congo Basin

古新统一始新统 Landana 组海相烃源岩 C_{27} 、 C_{28} 甾烷相对含量高于 C_{29} 甾烷(图 7), 但不及上白垩统烃源岩中差异明显, 说明海洋水生生物输入量可能相对上白垩统略低, 陆源有机质相对增加。但是没有更多的地球化学参数表明陆源有机质输入比重很大。另外, 在该套烃源岩中发现大量的鱼类化石、磷酸盐物质和各种有孔虫类, 反映海洋生物来源, 同时其古生物学特征说明该套烃源岩可能受到了马斯特里赫特阶(Maastrichtian)—始新世上升洋流作用强烈的影响, 在半深海—深海最小含氧区环境中, 有机质沉积于大陆边缘外陆架和斜坡, 发育富有机质沉积^[6]。烃源岩总有机碳平均值为 1.73%, 氢指数为 $(83 \sim 438) \times 10^{-3}$, 干酪根以 II 型为主。

渐新统一中新统海相烃源岩中奥利烷指数大于 0.1, 最大高达 2.0(图 8), 说明其具有显著的陆生高等植物输入特征; 较高的 C_{29}/C_{27} 甾烷比值(1.0~2.0)也反映陆源高等植物显著输入的特征。其中, 中新统水下扇 Malembo 组烃源岩中 C_{29} 规则甾烷相

对含量很高, 最高达 41%, 而 C_{28} 甾烷相对含量较少, 整体小于 30%(图 7), 反映了陆源高等植物的显著输入, 这可能是由于新生代河流携带来大量的陆生高等植物所致。饱和烃和芳烃碳同位素相对于其他烃源岩偏重, 饱和烃 $\delta(^{13}\text{C})$ 值大于 -27.0×10^{-3} , 芳烃 $\delta(^{13}\text{C})$ 值大于 -26.5×10^{-3} (图 9), 同样显示了陆源有机质的特征; 从沉积环境上看, Pr/Ph 值介于 1.5~2.0 之间(图 8), 表明烃源岩形成时的水体环境为弱氧化条件, 虽然其沉积水体较深, 但是由于受到陆源含氧淡水的稀释, 使得其还原性降低, 偏弱氧化性。因此, 上述情况对有机质的保存不是十分有利, 发育的有机质丰度处于中等程度(总有机碳平均值为 1.55%), 以陆源有机质输入为主, 使得烃源岩有机质类型以 III 型为主。其中: $\delta(^{13}\text{C})$ 为碳同位素比值。

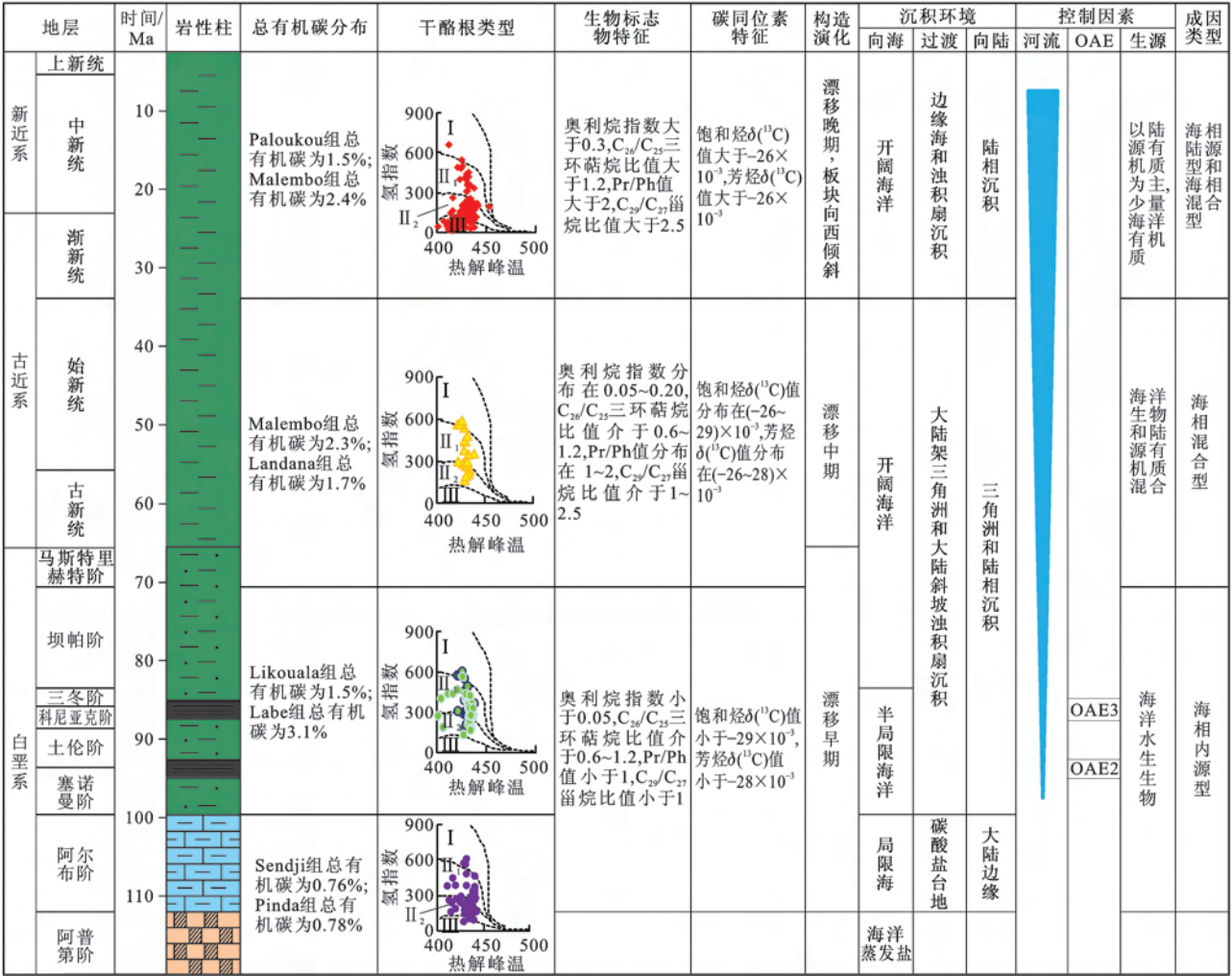
通过对各套海相烃源岩生源输入和沉积环境分析, 其成因具有一定规律性。从生源输入上看, 上白垩统海相烃源岩以海洋有机质为主; 随着地层时代的变新, 其具有海洋水生生物输入量减少, 陆源有机质输入量增大的变化趋势。在沉积环境上, 上白垩统海相烃源岩形成的水体环境偏还原性, 随着地层时代的变新, 海相烃源岩形成时的水体还原性变弱, 氧化性变强。下刚果盆地海相烃源岩发育的沉积环境和生源输入变化规律, 正是西非大陆边缘盆地形成过程中所经历的从海湾环境变迁到受河流作用逐渐加强的开阔海洋环境, 有机质输入以海洋有机质为主过渡到河流携带来的陆源有机质比例加重, 到陆源有机质深度影响的这一连续演化过程。

4 烃源岩成因类型划分及主控因素

根据稳定碳同位素、生物标志物资料, 下刚果盆

地海相烃源岩在发育时的沉积环境和生源输入上存在差异。根据大陆边缘盆地海相烃源岩成因类型划分标准^[33-34],下刚果盆地海相烃源岩显示以海相内源型和海相混合生源型两类烃源岩为主,部分地层显示海相陆源型烃源岩的特征(图 7~9)。不同成因类型海相烃源岩的发育是古构造、古沉积环境、古生物和

古气候等因素综合作用的结果。其中,伴随非洲与南美板块分裂导致的一系列构造运动、封闭及半封闭海湾环境,大型河流的影响以及区域性热带湿润气候条件对海相烃源岩的形成起着根本性的作用。古河流、上升洋流和大洋缺氧事件对局部性和阶段性海相烃源岩的发育起着最直接、最关键的控制作用(图 10)。



控制因素中,倒长三角表示河流作用自下而上加强;OAE 表示大洋缺氧事件,OAE2 表示事件 2,OAE3 表示事件 3

图 10 下刚果盆地海相烃源岩发育综合剖面

Fig. 10 Comprehensive Profile of Development of Marine Source Rocks in Lower Congo Basin

4.1 海相内源型烃源岩

海相内源型烃源岩以海洋水生生物输入为主,沉积于还原—弱还原环境水体,体现在稳定碳同位素相对较轻,饱和烃 $\delta(^{13}\text{C})$ 值小于 -28.5×10^{-3} ,芳烃 $\delta(^{13}\text{C})$ 值小于 -28.0×10^{-3} ;生物标志物体现在 C_{27} 、 C_{28} 甾烷相对含量皆大于 35%, C_{27} 甾烷相对含量最大达 45.3%, $\text{C}_{29}/\text{C}_{27}$ 甾烷比值整体小于 1.0,介于 0.5~1.0, C_{29} 甾烷比 C_{27} 规则甾烷含量相对较少,Pr/Ph 值小于 1.5,沉积于还原—弱还原环境,有机质类型主要为 II 型和 I 型干酪根。晚白垩世时

期,盆地处于漂移早期,区域性沉降导致大规模海侵,烃源岩的发育受上升洋流和大洋缺氧事件的影响^[1],以明显的海洋生物输入为主,沉积于缺氧的海湾环境,发育较厚的丰度高、类型较好的海相烃源岩,典型地层有 Iabe 组和 Likouala 组。

4.2 海相混合生源型烃源岩

海相混合生源型烃源岩生源输入相对量和沉积环境的氧化—还原条件介于海相内源型和海相陆源型烃源岩之间,具体体现在饱和烃 $\delta(^{13}\text{C})$ 值介于 $(-26.0 \sim -28.5) \times 10^{-3}$,芳烃 $\delta(^{13}\text{C})$ 值介于 $(-26.0 \sim$

$-28.0) \times 10^{-3}$, 奥利烷指数介于 $0.05 \sim 0.15$, C_{27} 和 C_{28} 甾烷相对含量高于 C_{29} 甾烷, Pr/Ph 值介于 $1.5 \sim 2.0$, 有机质类型主要为 II 型干酪根。晚白垩世以来, 板块分裂处于漂移中后期, 西非板块大陆边缘向西倾斜, 产生区域性沉降, 海洋地质营力持续作用, 来自陆地的河流作用加强, 河流携带来的陆源有机质与海洋有机质混合沉积于弱还原-弱氧化条件下的滨浅海环境以及水下河道-堤岸体系, 陆源有机质受到后期改造^[26], 与海洋原地有机质混合形成大量的无定形有机质, 其陆源有机质相对含量随地层时代变新呈不断增加趋势, 具倾油性和倾气性, 形成的烃源岩为海相混合生源型。这类烃源岩见于安哥拉卡宾达区 Landana 组、Malembo 组和刚果(布) Madingo 组、Paloukou 组。

4.3 海相陆源型烃源岩

海相陆源型烃源岩以典型的陆源高等植物输入为主, 沉积于弱氧化-氧化环境, 体现在饱和烃和芳烃碳同位素偏重, 饱和烃 $\delta(^{13}C)$ 值大于 -26.0×10^{-3} , 芳烃 $\delta(^{13}C)$ 值大于 -25.5×10^{-3} 。生物标志物方面, C_{29} 规则甾烷相对含量较高, 最高达 41%, C_{28} 甾烷相对含量较少, 整体小于 30%, 奥利烷指数大于 0.15, C_{29}/C_{27} 甾烷比值大于 1.5, Pr/Ph 值大于 2.0。显微组分中陆源有机碎屑(镜质组、惰质组和壳质组)占绝大部分, 为 70%~90%, 明显显示较高的陆源有机质输入, 干酪根类型主要为 III 型和 II₂ 型^[26]。晚渐新世板块分裂进入漂移晚期, 海退持续, 非洲大陆中部地区处于热带湿润气候, 植被繁盛, 大型河流发育, 河流携带来大量的陆源有机质, 沉积于偏氧化的海洋环境发育海相陆源型烃源岩。该类烃源岩可能见于渐新统一中新统海相地层。

5 结 语

(1) 下刚果盆地海相烃源岩的发育受古河流、上升洋流和缺氧环境(大洋缺氧事件)的影响。因海洋、河流两种地质营力彼消此长, 晚白垩世-中新世时期, 烃源岩发育的沉积环境呈现从海湾变迁到受河流作用逐渐加强的开阔海洋, 有机质输入以海洋有机质为主过渡到河流携带来的陆源有机质比例加重, 直到以陆源有机质为主的连续变化过程。海-陆二元有机质输入量的相对变化和海洋沉积环境的变迁从根本上决定了海相烃源岩的特征。阿尔布阶烃源岩有机质来源为海洋水生生物, 然而由于沉积于含氧量较高的浅海环境, 其有机质丰度较低, 干酪根类型以 II 型和 I 型为主, 具有倾油性; 上白垩统海相

烃源岩有机质以海洋水生生物为主, 沉积于缺氧的海湾环境, 有机质丰度较高, 干酪根类型以 II 型为主, 以倾油为主; 古新统一始新统海相烃源岩受大陆边缘河流携带的陆源有机质影响, 与海洋原地有机质混合沉积于半深海-深海环境, 干酪根类型以 II 型为主, 具有倾油性和倾气性; 渐新统一中新统海相烃源岩受河流携带来的陆源有机质输入影响, 沉积于深水海洋环境, 有机质丰度中等-好, 干酪根为 III、II 型, 具有倾油性和倾气性。盆地海相烃源岩整体在 3 500 m 左右进入生油窗, 成熟的海相烃源岩是下刚果盆地深水区油气的重要来源之一。

(2) 根据烃源岩成因类型划分标准, 下刚果盆地发育 3 种成因类型的海相烃源岩: 海相内源型、海相混合生源型和海相陆源型, 其中, 以海相内源型和海相混合生源型烃源岩为主。海相内源型烃源岩主要受控于上升洋流和缺氧环境(大洋缺氧事件)的影响, 见于阿尔布阶和上白垩统海相烃源岩 Iabe 组和 Likouala 组; 海相混合生源型烃源岩主要受控于河流和缺氧环境的影响, 该类烃源岩见于古新统一始新统 Landana 组和渐新统一中新统 Madingo 组; 海相陆源型烃源岩的发育主要受到河流作用的强烈影响, 中新统地层中发育该类海相烃源岩。

参考文献:

References:

- [1] BURWOOD R, CORNET P J, JACOBS L, et al. Organo-facies Variation Control on Hydrocarbon Generation: A Lower Congo Coastal Basin (Angola) Case History [J]. Organic Geochemistry, 1990, 16 (1/2/3): 325-338.
- [2] BURWOOD R. Angola: Source Rock Control for Lower Congo Coastal and Kwanza Basin Petroleum Systems [J]. Geological Society, London, Special Publications, 1999, 153: 181-194.
- [3] COLE G A, REQUEJO A G, ORMEROD D, et al. Petroleum Geochemical Assessment of the Lower Congo Basin [C] // MELLO M R, KATZ B J. Petroleum Systems of South Atlantic Margins. Boulder: AAPG, 2000: 325-339.
- [4] 李 军, 刘志鹏, 熊利平, 等. 下刚果盆地盐相关圈闭储层预测 [J]. 地球物理学进展, 2014, 29 (2): 761-766.
LI Jun, LIU Zhi-peng, XIONG Li-ping, et al. Reservoir Prediction of Salt Induced Traps in Lower Congo Basin [J]. Progress in Geophysics, 2014, 29 (2): 761-766.
- [5] 徐志诚, 吕福亮, 范国章, 等. 西非中南段盐盆成藏组合

- 及油气勘探方向[J]. 地学前缘, 2014, 21(3): 72-81.
- XU Zhi-cheng, LU Fu-liang, FAN Guo-zhang, et al. Play Analysis and Exploration Direction of the Aptian Salt Basins of West Africa[J]. Earth Science Frontiers, 2014, 21(3): 72-81.
- [6] SCHOELLKOPF N B, PATTERSON B A. Petroleum Systems of Offshore, Cabinda, Angola[C] // MELLO M R, KATZ B J. Petroleum Systems of South Atlantic Margins. Boulder: AAPG, 2000: 361-376.
- [7] BRICE S E, COCHRAN M D, PARDO G, et al. Tectonics and Sedimentation of the South Atlantic Rift Sequence: Cabinda, Angola [C] // WATKINS J S, DRAKE C L. Studies in Continental Margin Geology. Boulder: AAPG, 1983: 5-18.
- [8] TEISSERENC P, VILLEMIN J. Sedimentary Basin of Gabon: Geology and Oil Systems[C] // EDWARDS J D, SANTOGROSSI P A. Divergent/Passive Margin Basins. Boulder: AAPG, 1990: 117-199.
- [9] BAUDOUY S, LEGORJUS C. Sendji Field, People's Republic of Congo, Congo Basin[C] // FOSTER N H, BEAUMONT E A. Treatise of Petroleum Geology: Atlas of Oil and Gas Fields. Boulder: AAPG, 1991: 121-149.
- [10] DALE C T, LOPES J R, ABILIO S. Takula Oil Field and the Greater Takula Area, Cabinda, Angola[C] // HALBOUTY M T. Giant Oil and Gas Fields of the Decade 1978-1988. Boulder: AAPG, 1992: 197-215.
- [11] PASLEY M A, WILSON E N, ABREU V S, et al. Lower Cretaceous Stratigraphy and Source Rock Distribution in Pre-salt Basins of the South Atlantic; Comparison of Angola and Southern Brazil[J]. AAPG Bulletin, 1998, 82(10): 1949.
- [12] 赵红岩, 陶维祥, 于 水, 等. 下刚果盆地深水区油气成藏要素特征及成藏模式研究[J]. 中国石油勘探, 2013, 18(1): 75-79.
- ZHAO Hong-yan, TAO Wei-xiang, YU Shui, et al. Hydrocarbon Accumulation Characteristics and Model of Deepwater Zone of Lower Congo Basin[J]. China Petroleum Exploration, 2013, 18(1): 75-79.
- [13] 于 水, 文华国, 郝立华, 等. 下刚果盆地 A 区块下白垩统 Albion 阶沉积层序与古地理演化[J]. 成都理工大学学报: 自然科学版, 2012, 39(4): 353-361.
- YU Shui, WEN Hua-guo, HAO Li-hua, et al. Sedimentary Sequence and Paleogeographic Evolution of Albion Stage, Lower Cretaceous in Block A of Lower Congo Basin[J]. Journal of Chengdu University of Technology: Science and Technology Edition, 2012, 39(4): 353-361.
- [14] 杨晓娟, 李 军, 于炳松. 下刚果盆地构造特征及油气勘探潜力[J]. 地球物理学进展, 2012, 27(6): 2585-2593.
- YANG Xiao-juan, LI Jun, YU Bing-song. Structural Feature and Exploratory Potential of the Lower Congo Basin[J]. Progress in Geophysics, 2012, 27(6): 2585-2593.
- [15] 刘 琼, 陶维祥, 于 水, 等. 西非下刚果—刚果扇盆地圈闭类型和分布特征[J]. 地质科技情报, 2013, 32(3): 107-112, 117.
- LIU Qiong, TAO Wei-xiang, YU Shui, et al. Trap Types and Distribution of Lower Congo-Congo Fan Basin in West Africa[J]. Geological Science and Technology Information, 2013, 32(3): 107-112, 117.
- [16] 李 涛, 胡望水, 何瑶瑶, 等. 下刚果盆地重力滑脱构造发育特征及演化规律[J]. 大地构造与成矿学, 2012, 36(2): 197-203.
- LI Tao, HU Wang-shui, HE Yao-yao, et al. Developing Characteristics and Evolution Pattern of the Gravitational Decollement Structures in the Lower Congo Basin[J]. Geotectonica et Metallogenia, 2012, 36(2): 197-203.
- [17] 程 涛, 陶维祥, 于 水, 等. 下刚果盆地北部碳酸盐岩层序地层分析[J]. 特种油气藏, 2012, 19(2): 25-29.
- CHENG Tao, TAO Wei-xiang, YU Shui, et al. Sequence Stratigraphy of the Carbonate Rock in Northern Lower Congo Basin [J]. Special Oil and Gas Reservoirs, 2012, 19(2): 25-29.
- [18] 郭长武, 熊利平, 陈焕杰, 等. 下刚果—刚果扇盆地油气成藏分析及有利区评价[J]. 石油天然气学报, 2012, 34(7): 17-21.
- WU Chang-wu, XIONG Li-ping, CHEN Huan-jie, et al. The Main Control Factor of Hydrocarbon Accumulation and Favorable Area Evaluation in Lower Congo-Congo Fan Basin[J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2012, 34(7): 17-21.
- [19] 胡湘瑜. 西非被动大陆边缘盆地群大油气田形成条件与成藏模式[J]. 现代地质, 2013, 27(1): 133-142.
- HU Xiang-yu. Major Oil and Gas Fields Formation Conditions and Accumulation Models of West African Passive Continental Margin Basins [J]. Geoscience, 2013, 27(1): 133-142.
- [20] 汪伟光, 喻 莲, 聂明龙. 南大西洋两岸被动大陆边缘盆地油气地质特征对比[J]. 新疆石油地质, 2012, 33(2): 250-255.
- WANG Wei-guang, YU Lian, NIE Ming-long. Comparison of Hydrocarbon Geological Characteristics of Intercoastal Passive Continental Margin Basins, South

- Atlantic Ocean[J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 2012, 33(2):250-255.
- [21] 李金玺,刘树根,戴国汗,等. 南美洲沉积盆地类型及油气富集规律[J]. *新疆石油地质*, 2013, 34(3):369-373.
LI Jin-xi, LIU Shu-gen, DAI Guo-han, et al. The Sedimentary Basin Types and Hydrocarbon Enrichment Regular Patterns in South America[J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 2013, 34(3):369-373.
- [22] 张光亚,温志新,梁英波,等. 全球被动陆缘盆地构造沉积与油气成藏:以南大西洋周缘盆地为例[J]. *地学前缘*, 2014, 21(3):18-25.
ZHANG Guang-ya, WEN Zhi-xin, LIANG Ying-bo, et al. Tectonic-sedimentary Features and Petroleum Accumulation in the Passive Continental Margin Basins of South Atlantic Peripheries[J]. *Earth Science Frontiers*, 2014, 21(3):18-25.
- [23] 程建,段铁军,倪春华,等. 西非科特迪瓦盆地石油地质特征及成藏规律研究[J]. *石油实验地质*, 2013, 35(3):291-295.
CHENG Jian, DUAN Tie-jun, NI Chun-hua, et al. Petroleum Geologic Features and Accumulation Rules of Cote D'Ivoire Basin, West Africa[J]. *Petroleum Geology and Experiment*, 2013, 35(3):291-295.
- [24] 汪伟光,童晓光,张亚雄,等. 南大西洋重点被动大陆边缘盆地油气地质特征对比[J]. *中国石油勘探*, 2012, 17(1):62-69.
WANG Wei-guang, TONG Xiao-guang, ZHANG Ya-xiong, et al. Features of Major Passive Continental Margin Basins, South Atlantic Ocean[J]. *China Petroleum Exploration*, 2012, 17(1):62-69.
- [25] 胡望水,李涛,于水,等. 西非被动大陆边缘重力滑脱构造发育演化及成因机制[J]. *大地构造与成矿学*, 2012, 36(2):186-196.
HU Wang-shui, LI Tao, YU Shui, et al. Tectonic Revolution and Forming Mechanism of Gravitational Decollement Structures in the Passive Continental Margin of West Africa[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 2012, 36(2):186-196.
- [26] DENIAU I, DISNAR J R, BAUDIN F, et al. Characterization of Organic Matter in the Oligocene(Chattian) Turbiditic Fine Grained Deposits, Offshore Angola[J]. *Organic Geochemistry*, 2010, 41(2):135-145.
- [27] CZOCHANSKA Z, GILBERT T D, PHILIP R P, et al. Geochemical Application of Sterane and Triterpane Biomarkers to a Description of Oils from the Taranaki Basin in New Zealand[J]. *Organic Geochemistry*, 1988, 12(2):123-135.
- [28] EKWEOZOR C M, OKOGUN J I, EKONG D E U, et al. Preliminary Organic Geochemical Studies of Samples from the Niger Delta(Nigeria): II. Analyses of Shale for Triterpenoid Derivatives[J]. *Chemical Geology*, 1979, 27(1/2):29-37.
- [29] EKWEOZOR C M, TELNAES N. Oleananes Parameter: Verification by Quantitative Study of the Biomarker Occurrence in Sediments of the Niger Delta[J]. *Organic Geochemistry*, 1990, 16(1/2/3):401-413.
- [30] 程鹏,肖贤明,田辉,等. 成熟度对陆相烃源岩可溶有机质 Pr/Ph 比值的影响[J]. *沉积学报*, 2014, 32(1):182-188.
CHENG Peng, XIAO Xian-ming, TIAN Hui, et al. Effects of Maturity on the Pr/Ph Ratio of the Soluble Organic Matters in the Terrestrial Source Rocks[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2014, 32(1):182-188.
- [31] BROOKS J D, GOULD K, SMITH J W. Isoprenoid Hydrocarbons in Coal and Petroleum[J]. *Nature*, 1969, 222:257-259.
- [32] TEN HAVEN H L, DELEEUW J W, RULLKOTTER J, et al. Restricted Utility of the Pristane/Phytane Ratio as a Paleoenvironmental Indicator[J]. *Nature*, 1987, 330:641-643.
- [33] 戴娜. 亚大海域大陆边缘盆地海相烃源岩成因和分布模式——以 Bonaparte 盆地为例[D]. 北京:中国石油大学, 2012.
DAI Na. The Origin and Distribution Pattern on Marine Source Rock in the Continental Margin Basin of the Asian and Australia Maritime Space—A Case Study of Bonaparte Basin[D]. Beijing: China University of Petroleum, 2012.
- [34] 戴娜,钟宁宁,曹军,等. 大陆边缘盆地海相烃源岩的成因类型[C]//中国石油学会. 第十四届全国有机地球化学学术会议论文集. 北京:中国石油学会, 2013:102-103.
DAI Na, ZHONG Ning-ning, CAO Jun, et al. Genetic Type of the Marine Source Rock in the Continental Margin Basin[C]// Chinese Petroleum Society. Proceedings of the 14th National Organic Geochemistry Academic Conference, Beijing: Chinese Petroleum Society, 2013:102-103.