

DOI: 10.3724/SP.J.1140.2014.04107

南海北部陆缘合浦盆地烃源岩特征与 低熟油气及生物气勘探前景

张景茹^{1,2}, 何家雄², 陆军文^{3,4}, 杨希冰⁵, 朱继田⁵, 龚晓峰^{1,2}, 张伟^{1,2}

(1. 中国科学院大学, 北京 100049; 2. 中国科学院 边缘海地质重点实验室, 广州 510640;

3. 浙江大学 地球科学系, 杭州 310027; 4. 中国人民解放军 75711 部队, 广州 510515; 5. 中海油 湛江分公司研究院, 湛江 524057)

摘要:南海北部陆缘广西合浦盆地油气勘探迄今尚未取得突破,其根本原因是对该区基本油气地质条件及油气地质规律认识尚不够深入。合浦盆地主要烃源岩与百色盆地一样,均属成熟度偏低的始新统中深湖相暗色泥质岩系,其低熟烃源岩与低熟油气特征及其成藏地质条件亦基本一致。在深入分析研究合浦盆地低熟烃源岩有机质丰度、生源母质类型及热演化特征的基础上,重点对其低熟油气及生物气的地球化学特征与百色盆地进行了类比,指出合浦盆地古近系具备低熟油气/生物气的基本地质条件,其油气勘探方向及勘探策略,应借鉴百色盆地的成功经验,重点勘探寻找低熟油气及生物气资源。

关键词: 低熟烃源岩;低熟油气/生物气;地球化学特征;勘探前景;合浦盆地

中图分类号:P744.4

文献标识码:A

文章编号:0256-1492(2014)04-0107-10

20世纪90年代以来,国内外学者均相继报道了在加拿大、印度尼西亚、以色列等国家及地区和中国古、新近系含油气盆地中发现了较丰富的低熟油气资源,且在其低熟油气成因理论研究及油气勘探实践上亦取得了长足的进展。低熟油气在中国东部古、新近系盆地中是一种颇具勘探潜力的油气资源。目前,中国的生物气与低熟油气探明地质储量已达亿吨级水平。深入开展生物气及低熟油气形成机理与运聚成藏条件研究,无疑对指导那些地温场低、烃源岩有机质演化程度偏低的盆地及地区的油气勘探,提高低熟油气勘探成功率、降低勘探风险等均具有重要意义。

1 区域地质及油气勘探概况

南海北部陆缘合浦盆地位于广西南部北海市合浦县及浦北县一带,其分布范围为21°20'~22°00' N, 108°40'~109°50' E。盆地沿南流江流域呈NE—SW向展布,东窄西宽呈喇叭状,主体分布在

陆地上,西南段则延伸到北部湾海域。合浦盆地属中小型盆地,总面积约为1200 km²,其中,陆上部分面积为1140 km²,海域部分面积约60 km²,其是一个在华南褶皱系的基础上发展起来、受扭动断裂控制的中新生代断拗型复合盆地(图1)。合浦盆地北面 and 东面分别为六万大山隆起,南面为青山岭隆起,东北收敛,其西南敞开而进入北部湾海域。

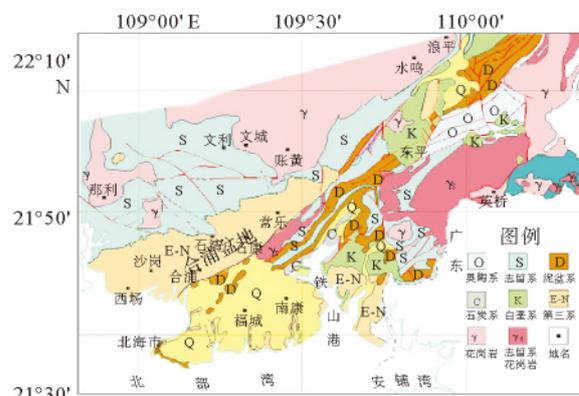


图1 广西合浦盆地区域地质与构造展布特征

Fig. 1 The regional geological and tectonic distribution characteristics of Hepu Basin

合浦盆地区域构造上,处于华南板块(亦称华南褶皱带)西南部,六万大山隆起区合浦-博白-岑溪断裂带,主要受北东向和北西向两组断裂的控制,其是在晚燕山-喜山构造活动期,在合浦-博白-岑溪老断

基金项目:国家自然科学基金项目(41176052);国家重点基础研究发展规划项目(2009CB219501)

作者简介:张景茹(1987—),女,博士,主要从事石油地质综合研究, E-mail: zhangjrgucas@163.com

通讯作者:何家雄(1956—),男,研究员,博士,长期从事石油地质综合研究, E-mail: hejx@gig.ac.cn

收稿日期:2013-08-18;改回日期:2013-10-20. 周立君编辑

裂的不断拉分断陷作用下,发育形成的以古、新近纪沉积为主体的陆相断陷盆地。根据前人的研究,合浦盆地的成生演化过程具有以下几个重要特点:①前新生代为断拗阶段;②新生代古近纪早期为断陷演化阶段;③新近纪晚期为拗陷、断拗转换或萎缩阶段。换言之,合浦盆地古、新近纪主要经历了上述3个构造演化过程而最终形成目前的由西场凹陷、上洋凸起及常乐凹陷3个次一级构造单元所构成的盆地基本构造格局(图2)。其中:盆地西部的西场凹陷,长约32 km,宽约17 km,面积约540 km²,呈椭圆状展布,基底最大埋深,即上白垩统底为4 100 m,古、新近系底为3 400 m。盆地东部的常乐凹陷,长约40 km,宽约12~15 km,面积约600 km²,呈长条状展布,古、新近系沉积基底最大埋深4 600 m。盆地中部的上洋凸起,面积约60 km²,沉积基底浅,古、新近系地层沉积非常薄。

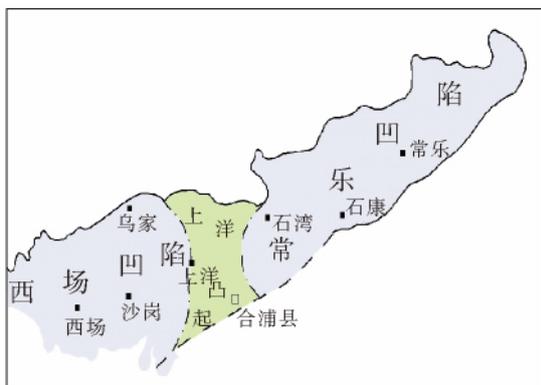


图2 广西合浦盆地构造区划及主要构造单元展布特征(周大钰等,2010)

Fig. 2 Tectonic division and distribution pattern of major tectonic units of Hepu Basin in Guangxi Province

合浦盆地晚白垩世至渐新世沉积物构成了盆地的主体,沉积地层系统从老到新主要由前白垩系基底、上白垩统乌家组(K₂w)、古近系古新统上洋组(E₁s)、古近系始新统酒席坑组(E₂j)、古近系渐新统沙岗组(E₃s)、新近系中新统白沙江组(N₁b)及第四系合浦组(Qh)所构成^[1-4]。目前勘探初步证实,该区始新统酒席坑组(E₂j)湖相沉积泥质岩系为主要烃源岩,其是在潮湿温暖气候下沉积充填的一套近海平原沼泽相—浅湖相和中深湖相富含有机质的暗色泥页岩(图3)。

合浦盆地自20世纪50年代末开始石油地质调查及地球物理勘探以来,迄今尚未获得商业性油气流,未能取得油气勘探突破。虽然如此,但通过多年

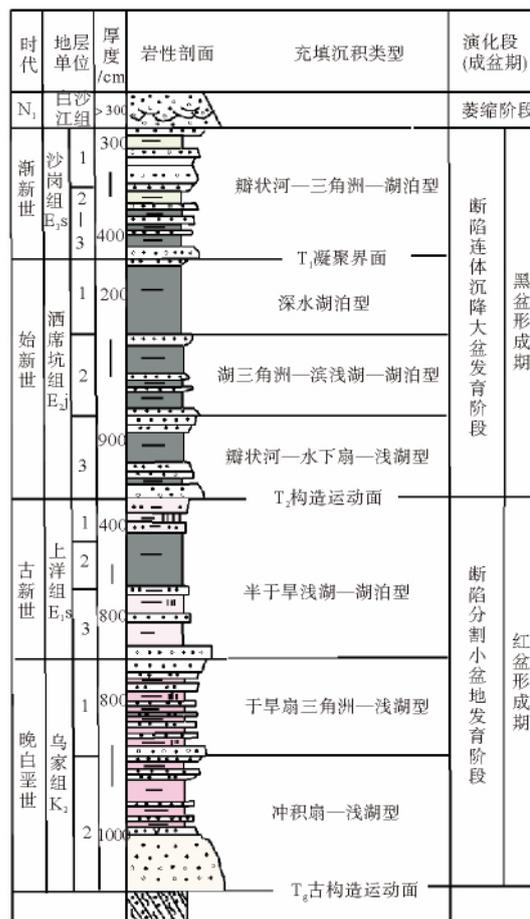


图3 合浦盆地地层层序及岩性组合特征(周大钰等,2010)

Fig. 3 Stratigraphic and lithologic characteristics in Hepu Basin

的油气勘探及油气地质研究工作,仍然获取了大量区域地质及油气地质地球物理资料和重要的油气地质信息,同时,亦初步证实了该区具备了低熟油气及生物气形成的基本地质条件^[1-4]。

2 烃源岩特征及与百色盆地的对比

根据区域油气地质条件分析及合浦盆地西场凹陷和常乐凹陷10口探井钻遇古、新近系烃源岩地球化学分析评价,并与已发现低熟油气的百色盆地古、新近系地层及烃源岩进行对比(图4),可以看出,合浦盆地古近系始新统酒席坑组(E₂j)和古新统上洋组二段(E₁s²)两套低熟生油岩系,与百色盆地中上始新统那读组和百岗组低熟烃源岩对比关系良好,具有形成低熟油气/生物气的资源潜力,但百色盆地低熟烃源岩层位稍显年轻,相当于合浦盆地中上始新统酒席坑组^[5]。以下重点对合浦盆地低熟烃源岩特征进行深入剖析与系统阐述。

2.1 合浦盆地低熟烃源岩基本特征

2.1.1 有机质丰度

生油岩中有机质丰度是油气形成的物质基础,也是决定生烃潜力的重要因素之一,有机质丰度主要根据有机碳(TOC)、氯仿沥青“A”含量、总烃含量(HC)和岩石热解生烃潜量(S₁+S₂)等参数进行综合分析评价。以下根据合浦盆地东西两个凹陷主要探井钻遇始新统及古近统暗色泥页岩的有机地球化学分析结果(表 1),结合低熟源岩的有机质丰度评价标准(表 2),对其有机质丰度进行分析评价与阐述。

从表 1 可以看出,合浦盆地西部的西场凹陷古

近系不同层位暗色泥岩有机质丰度较高^[6],根据探井钻遇暗色泥岩地球化学分析表明,酒席坑组(E_{2j})在西场凹陷厚约 200~400 m,其中暗色泥岩厚度为 150~300 m。有机碳平均含量为 2.85%~4.31%,氯仿沥青“A”平均含量为 0.143 1%~0.442 3%,总烃含量(HC)为(107.84~1 842)×10⁻⁶,生烃潜量(S₁+S₂)为 9.23~57.20 mg 烃/g 岩石,依据低熟源岩的有机质丰度评价标准(表 2)^[7],达到好的生油岩标准。

合浦盆地东部常乐凹陷钻遇的始新统酒席坑组暗色泥岩有机质丰度亦较高。根据近期钻探的乐 2X 井及以前钻探的几口探井地球化学分析结果,始新统酒席坑组暗色泥岩 TOC 平均含量为 0.29%~

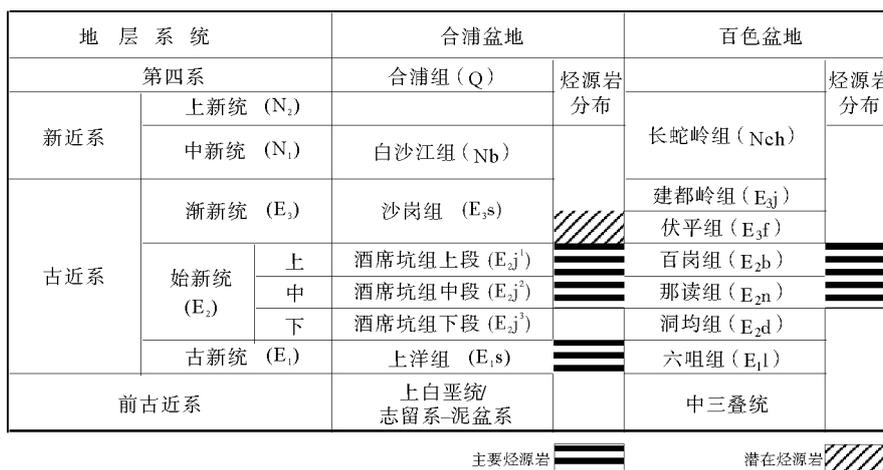


图 4 合浦盆地与百色盆地地层系统及地层层序与主要烃源岩分布特征对比

Fig. 4 Comparison of stratigraphic sequence and the main characteristics of hydrocarbon source rocks in Baise Basin and Hepu Basin

表 1 合浦盆地西场凹陷与常乐凹陷古、新近系潜在在烃源岩有机质丰度分布特征及综合评价

Table 1 The abundance and evaluation of Tertiary potential source rocks in Hepu Basin

凹陷/地区	井号	层位层段	深度/m	分布厚度/m	TOC/%	氯仿沥青“A”/%	HC/ ×10 ⁶	“A”/ TOC /(mg/g)	(S ₁ +S ₂) /(mg/g)	综合评价
西场凹陷	西 1 井	E _{2j}	1 204.5~1 715.0	282.00	4.31/34	0.442 3/28	107.84/18	131.46/28	38.97/18	好
	西参 2 井		914.0~1 300.5	251.50	3.16/49	0.413 1/44	369.66/8	46.24/44	14.57/8	好
	亚 1 井		7 920~1 098	217.50	3.74/14	0.217 8/14	493.20/5	53.65/14	18.63/5	好
	路 1 井		738.0~1 067.5	176.50	4.24/15	0.251 2/15	1 842.00/3	52.34/15	57.20/3	好
	南 1 井		233.0~451.5	152.00	2.85/2	0.201 0/2	262.78/2	70.97/2	9.23/2	好
常乐凹陷	乐参 1 井	E _{2j}	1 969.0~2 296.0	119.00	2.10/29	0.103 6/12	437.00/12	47.98/12	18.64/12	好
	沙 1 井		582.0~1 279.5	116.50	2.25/9	0.067 1/7	224.50/2	35.06/7	11.73/2	好
	龙 1 井		532.6~751.0	10.05	1.08/2	0.067 8/2		62.81/2		较好
	石 1 井		284.0~665.6	49.50	2.18/7	0.123 9/7		49.14/7		较好
	乐 2X 井	E _{2j} ¹	1 977.5~2 130.0	88.50	1.70/13	0.11/13		64.71/13	5.44	较好
		E _{2j} ²	2 130.2~2 250.1	25.50	0.42/12	0.06/12		142.86/12	0.50	较好-差
		E _{2j} ³	2 471.0~2 560.0		0.29/5	0.064/5		220.69/5	0.35	较好-差

注:分子为平均值,分母为样品数。

表2 低熟烃源岩的有机质丰度评价标准
Table 2 Evaluation standard of abundance of low mature organic source rocks

源岩级别	有机碳/%	氯仿沥青“A”/%	总烃/ ($\mu\text{g/g}$)	产油潜力 mg 烃/g 岩石	显微组分 总量/%
好	>1.4	>0.1	>500	>6	>4
较好	1.4>0.8	0.1~0.05	500~200	6~2	4~2.5
较差	0.8~0.5	0.05~0.01	200~100	2~0.5	2.5~1.0
非烃源岩	<0.5	<0.01	<100	<0.5	<1.0

2.25%，大多数样品 TOC 多在 1.7% 以上；氯仿沥青“A”为 0.06%~0.1239%，平均为 0.1138%；总烃 HC 含量平均为 392.4×10^{-6} ；生烃潜力 $S_1 + S_2$ 为 0.35~18.64 mg 烃/g 岩石，平均为 10.60 mg 烃/g 岩石。其中，酒席坑组一段(E_2j^1)暗色泥岩的 TOC(1.7%)、氯仿沥青“A”(0.11%)和生油潜力 $S_1 + S_2$ (5.44 mg 烃/g 岩石)等指标较高，均明显优于酒席坑组二段(E_2j^2)和酒席坑组三段(E_2j^3)，达到了好烃源岩的有机质丰度的标准。其与西场凹陷相比，其有机质丰度指标基本相当或略低。

2.1.2 有机生源母质类型

有机生源母质类型决定了生油岩的质量，而且很大程度上决定了生油气潜能的高低，影响有机质类型的主要因素，是沉积物中有机质的生物来源构成和沉积时的保存条件，两者都受沉积环境的控制。根据干酪根元素分析、可溶有机质特征、岩石热解分析等资料，笔者分别对西场凹陷与常乐凹陷始新统烃源岩有机质类型进行了综合分析评价。

(1) 干酪根元素分析指示生源母质类型

盆地西部西场凹陷始新统酒席坑组暗色泥岩有机质干酪根 H/C 原子比为 1.14~1.68，O/C 原子比为 0.11~0.19，在干酪根类型范氏图上多处在偏腐泥混合型或腐泥型区域(图 5)，即以 II_1 型干酪根为主，其中 II_1 —I 型干酪根含量大于 50% 以上。另外，亚 1 井、路 1 井和乐 2X 井暗色泥岩热解分析所获有机生源母质类型的信息，亦与干酪根元素分析和干酪根镜检分析结果基本吻合，均证实西场凹陷始新统酒席坑组暗色泥岩干酪根类型主要以 II_1 型为主，少量 I 型。此外，该暗色泥岩的烃类有机质转化率指标“A”/TOC 为 46.24~131.46 mg/g(表 1)，这对于未熟、低熟生油岩而言属偏高的数值，亦暗示其生源母质类型具有偏腐泥类型的特点^[8]。

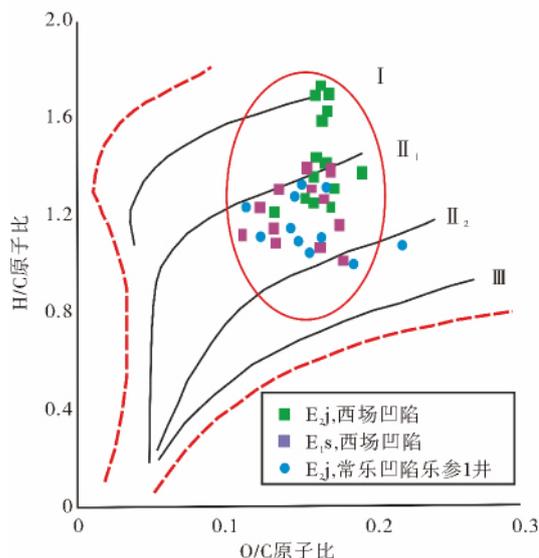


图5 合浦盆地古近系暗色泥岩干酪根类型范氏图(据文献[8]修改)

Fig. 5 The D. W. Van Krevelen figure of Paleogene mudstone kerogen type in Hepu Basin

常乐凹陷始新统酒席坑组暗色泥岩有机质干酪根元素分析样品来自乐参 1 井，H/C 原子比为 1.088~1.35，O/C 原子比为 0.108~0.188，在范氏图上主要分布在 II_1 — II_2 型之间的区域，但以 II_2 型为主，其次是 II_1 型，少量 III 型(图 5)，表明其生源母质类型具有偏腐殖混合型的特点。

(2) 可溶有机质表征生源母质类型

烃源岩可溶有机质饱和烃分布信息及其一些特殊的生物标志物甾萜烷等，能够有效地判别与确定烃源岩生源母质类型，综合分析判别有机母质输入类型、生源构成特点及其保存环境的氧化还原条件。

西场凹陷暗色泥岩饱和烃分布特征：由图 6 所示，西场凹陷始新统酒席坑组及古新统上洋组暗色泥岩饱和烃分布特征，多呈单峰型和双峰型，且以双峰型居多(图 6a-d)。表明该区暗色泥岩有机生源母质类型，属于以低等水生生物为主的偏腐泥混合型，表征低等水生生物输入的低碳数峰群相对较高，但个别样品代表高等陆生植物生源的高碳数峰群亦高，说明生源母质构成较复杂。异戊二烯烃分布可以提供原始沉积环境及细菌作用的信息，该区样品多为 0.8~1.2，姥鲛烷与植烷基本处于均势，表明暗色泥岩有机质沉积环境主要处在较深水的中深湖相沉积的还原环境，但可能受到了海侵的影响(图 6a-b)。

西场凹陷暗色泥岩甾萜烷分布特征：从该区始新统酒席坑组暗色泥岩饱和烃分布图上可以明显

看出,西场凹陷酒席坑组湖相泥岩甾萜烷生物标志物含量十分丰富,其含量及分布接近甚至大大高于正构烷烃(图 6a-c)。据邵昌民研究^[8],酒席坑组暗色泥岩甾萜烷分布及组成特点,表征出的生源母质类型信息亦具有偏腐泥混合型母质的特征。其中,甾萜烷组成中含有丰富的 $C_{28} \sim C_{30}$ 4-甲基甾萜烷类,其与正常甾萜烷的比值为 1.03~1.57,表明这种甾萜烷可能主要来源于甲藻类生源,生源物质输入以低等水生生物为主。古生物分析亦表明,该区酒席坑组富含藻类,而且在甾萜烷分布中检测出大量的藿烯和 $\beta\beta$ 藿烯以及 $\alpha\beta$ 、 $\beta\alpha$ 藿烷,亦说明生源母质的输入以低等生物为主。同时,甾萜烷总体分布中藿烷与正常甾萜烷比值远远大于 1,亦反映了大量细菌生源的输入,生源母质类型属偏腐泥混合型。

常乐凹陷暗色泥岩饱和烃及甾萜烷分布特征:由图 5 所示,常乐凹陷始新统酒席坑组暗色泥岩饱和烃分布特征呈双峰型和后峰型,且以双峰型居多(图 6e-h),表征陆生高等植物输入的高碳数峰群相对较高,反映该区暗色泥岩有机生源母质类型属于以陆生高等植物为主的偏腐殖混合型。Pr/Ph 值为 0.8~3.2,表明暗色泥岩有机质沉积环境主要为弱氧化沉积环境。由图 7 所示,该凹陷暗色泥岩甾萜

萜生物标志物分布特征图上可以看出,在 $C_{27} \sim C_{29}$ 甾萜烷分布中,虽然 C_{29} 甾萜烷含量明显高于 C_{27} 甾萜烷,但由于存在高含量 C_{30} 4-甲基甾萜烷这种藻类生源母质的贡献(图 7),故其有机质生源母质应属偏腐殖混合型(II_2),部分可能属以陆生高等植物输入为主的陆源腐殖型(III)^[8]。

(3) 岩石热解分析判识生源母质类型

对常乐凹陷乐 2X 井烃源岩层段泥岩样品进行热解分析实验,获得了大量岩石热解分析的实验数据(表 3)。其中,始新统酒席坑组上段氢指数(HI)平均为 241.8 mgHC/gTOC,氧指数(OI)较低,平均为 44.7 mgCO₂/gTOC。烃产率较高,平均为 22.2,类型指数(S_2/S_3)大,平均在 9 以上,因此,综合判识酒上段烃源岩类型为腐泥腐殖混合型(II);始新统酒席坑组中段及下段和古新统上洋组氢指数(HI)平均为 21~74.4 mgHC/gTOC,氧指数(OI)较高,平均为 92.7~215 mgCO₂/gTOC,类型指数(S_2/S_3)偏低,平均仅 0.2~1.0,烃产率低,平均仅 9.8~13.8。综合判识酒中段及下段和上洋组烃源岩类型为腐殖型(III)。这可能主要是由于其沉积充填时属偏氧化的沉积环境,有机质保存条件差所致。

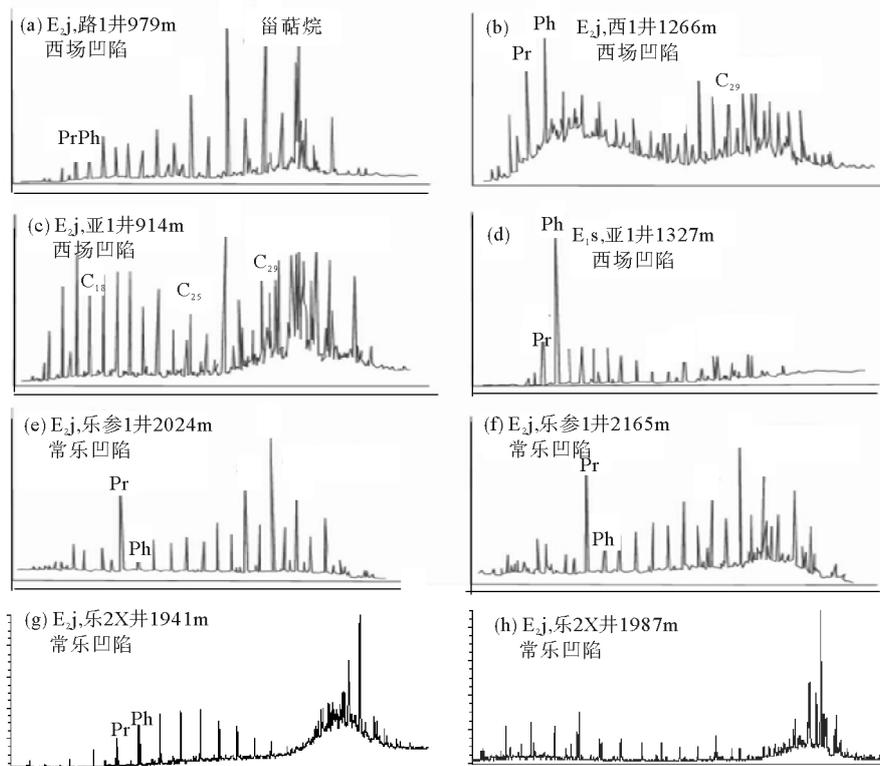


图 6 合浦盆地西部西场凹陷与东部常乐凹陷古近系暗色泥岩饱和烃分布特征
Fig. 6 The distribution of saturation hydrocarbon in dark mudstone of Paleogene in Xichang sag and Changle sag of Hepu Basin

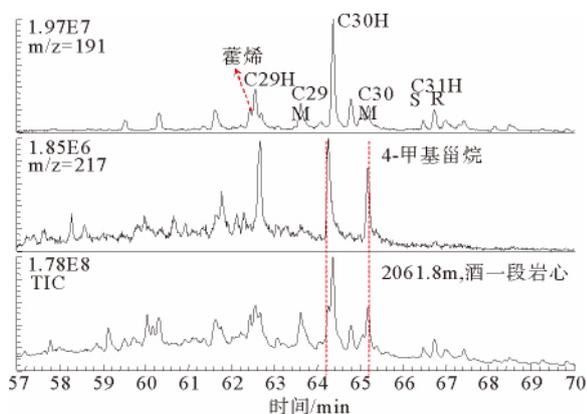


图7 合浦盆地常乐凹陷始新统酒席坑组一段泥岩甾萜烷分布特征

Fig. 7 The distribution characteristic of steranes and terpane in dark mudstone in Eocene Jiuxikeng Group in Changle sag, Hepu Basin

表3 常乐凹陷乐2X井不同层位层段泥岩有机质生源母质类型特征及评价

Table 3 Types of organic biogenic precursors of the mudstone in different layers in Le 2X well of Changle sag

层段 样品数	降解率 D=PC/TOC	类型指数 S ₂ /S ₃	氢指数 HI	氧指数 OI	综合 判识与 评价
酒席坑组 上段(13)	9.0~48.0 22.2 (II ₁)	0.4~34.3 9.0 (II ₁)	64~550 241.8 (II)	64~155 44.7 (II)	II
酒席坑组 中段(12)	7.0~20.0 13.8 (II ₂)	0.0~5.1 1.0 (III)	0~185 65.3 (III ₂)	36~660 215 (III)	III
酒席坑组 下段(5)	5.0~21.0 10.0 (II ₂)	0.1~1.6 0.76 (III)	11~175 74.4 (III ₁)	47~120 95 (III)	III
上洋组 (23)	5.0~18.0 9.8 (III)	0.0~0.9 0.2 (III)	0~96 21 (III ₂)	23~183 92.7 (III)	III

注:依次为数值范围、平均值和类型。

综上所述,根据暗色泥岩干酪根 H/C 及 O/C 元素比、可溶有机质地球化学特征、岩石热解分析参数等资料综合判识,合浦盆地西部西场凹陷始新统酒席坑组(E_{2j})可能烃源岩的类型主要为 II 型,且 II₁ 型为主,亦含少量 I 型。盆地东部常乐凹陷始新统酒席坑组(E_{2j})可能烃源岩的类型主要为 II 型和 II₂ 型为主,含有少量 III 型,古新统上洋组(E_{1s})烃源岩类型主要为 III 型。

2.1.3 有机质成熟度

合浦盆地总体上是一个低热盆地,尤其在西场凹陷,沉积物薄,埋深 2 500 m 左右即为基底,始新

统酒席坑组(E_{2j})最大埋深不超过 2 000 m,暗色泥岩有机质镜质体反射率(Ro)均低于 0.6% 以下,多处为 0.3%~0.6%;暗色泥岩的最大热解峰温(Tmax)大大低于 435℃;泥岩可溶有机质饱和烃奇偶优势明显(OEP 值为 1.4~4.7)^[7]。而且,始新统酒席坑组暗色泥岩甾烷组成中以生物构型的 ββ α 和 $\alpha\alpha\beta$ 型为主,尚未见到地质构型的 $\alpha\beta\beta$ 甾烷,萜烷分布中还见到丰富的表征低熟和生物构型的甾烯和藿烯,且 C₂₉ 甾烷 20S/(S+R) 成熟度参数偏低,仅 0.11~0.38,上述这些成熟度资料均证实该区烃源岩成熟度偏低,仅达到低熟门槛或刚刚进入早成熟演化阶段^[7]。

常乐凹陷暗色泥岩最大热解峰温 Tmax 为 436℃,OEP 为 1.76~4.07,藿烯 C₃₁ $\beta\beta$ /(S+R) 为 0.332,藿烯 C₂₉₋₃₁ $\beta\beta$ /C₂₉₋₃₁ $\alpha\beta$ 为 0.44^[8],这些成熟度资料证实了该区烃源岩成熟度偏低。此外,常乐凹陷埋藏虽较西场凹陷深,但其地温梯度约比西场凹陷低 1℃/100m,根据乐 2X 井暗色泥岩有机质镜质体反射率(Ro)实测剖面图(图 8)可以看出,2 000 m 以上的始新统酒席坑组上部泥岩有机质处于未熟阶段,有机质镜质体反射率(Ro)小于 0.4%;2 000 m 以下(始新统酒席坑组上段下部及中段)则进入低成熟门槛,镜质体反射率大于 0.4%,其 Ro 值为 0.4%~0.5%,处在低熟/未熟演化阶段。

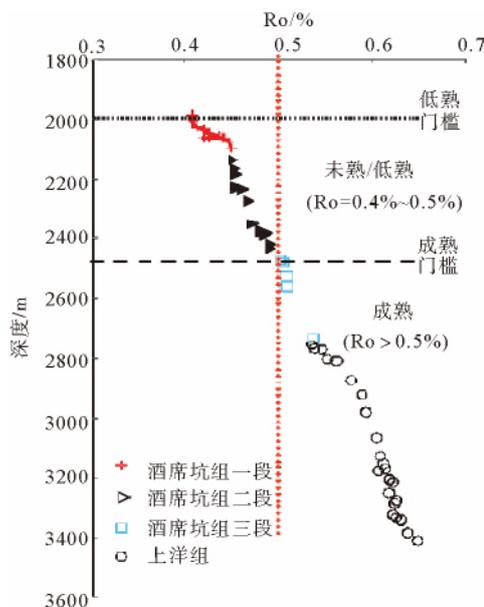


图8 常乐凹陷乐2X井古近系有机质热演化剖面
Fig. 8 The thermal evolution section of Paleogene organic matter in Le 2X wells of Changle sag

2.2 与百色盆地低熟烃源岩及低熟油气对比

根据合浦盆地的地质背景及低熟油气的地球化学特征与已发现低熟油气和生物气的百色盆地进行对比研究,对合浦盆地的低熟油及生物气勘探前景进行综合评价。

2.2.1 合浦盆地与百色盆地区域地质背景对比

百色盆地作为南方中小盆地之一,其盆地发育和地质背景与合浦盆地类似,都是以古、新近纪沉积为主体的内陆型断陷盆地^[2],均具有“三元”沉积构成,在盆地中可划分出3个构造沉积幕,各盆地内的相对应的构造沉积幕不仅发育时间完全一致,而且所反映的古气候条件和含矿性也相似。第一构造沉积幕都是水进型充填系列,以主要沉积代表干旱-半干旱条件的红色岩系和发育蒸发盐类矿物为主要特征,除合浦盆地外,该阶段的岩层一般生油潜力小;第二构造沉积幕发生在盆地的最大扩张期,以半深-深湖相暗色泥岩沉积为主,相对的生油条件最好。百色盆地的那读组和合浦盆地的酒席坑组都是该阶段的沉积产物,并都是相应盆地的主力生油岩系;第三构造沉积幕属水退型充填系列,普遍表现为构造活动不断增强和盆地内部分异明朗化的发育过程,并导致盆地的萎缩和最后消亡,以不同程度的含有煤线和煤层为特征。

2.2.2 合浦盆地与百色盆地低熟油气地球化学特征对比

据以往对百色盆地油气地化特征的研究^[8-12],百色盆地始新统那读组为主力烃源岩,烃源岩有机质丰度不是很高,有机碳(TOC)平均含量仅1.28%,远远低于合浦盆地;总烃含量为(243~297)×10⁻⁶,也低于合浦盆地;生烃潜量(S₁+S₂)为11 mg 烃/g 岩石,仅比合浦盆地常乐凹陷始新统酒席坑组(10.06 mg 烃/g 岩石)稍高,但比不上西场凹陷酒席坑组(24.90 mg 烃/g 岩石)。有机质干酪根类型以II₁型为主,I型、II₂型次之,与合浦盆地干酪根类型类似。

据黄第藩对百色盆地低成熟原油饱和烃分布特征研究^[13],其原油饱和烃色谱峰主峰碳为nC₂₁或nC₂₃,且nC₂₁~nC₃₁具有明显的奇偶优势(OEP值最高达1.31),显示低演化程度和高等植物蜡质输入的特征。该盆地低熟油中含有较高含量的藿烷系列以及C₁₄—C₁₆补身烷系列,表明了细菌微生物生源产物对该原油的形成作出了重要贡献。此外,还检测到18 α -奥利烷以及微量的高等植物裸子植物门的特征成分,表明高等植物参与了该低熟油的形

成。因此,百色盆地低熟油的生烃母质大都与高等植物和微生物类脂物有关,高等植物的蜡质大量参与了百色低熟油的形成,因为这些高等植物的显微组分具有较低活化能,在未熟阶段就有利于生烃^[12]。

综上所述,低熟烃源岩要形成丰富的低熟油气,要求低熟烃源岩有较好的有机质丰度、类型及易于在低熟阶段生烃的有机母质。

合浦盆地古近系暗色泥岩,不论是有机碳含量、总烃含量、生烃潜量还是有机质类型,均不逊色于百色盆地,甚至有些指标远远优于百色盆地。再者对合浦盆地烃源岩可溶有机质族组成、饱和烃气相色谱特征以及甾萜烷生物标记物的分析研究表明,合浦盆地的生烃母质具有陆源高等植物的蜡质、微生物类脂物以及大量细菌活动的参与等,进一步说明了合浦盆地具备较高有机质丰度的暗色泥岩及易于在低熟阶段生烃的有机母质。

根据百色盆地低熟油气形成及运聚富集规律,大部分低熟油气藏的分布富集均与其浅层生物气藏形成与分布密切相关^[14-17]。从百色盆地浅层气的甲烷 $\delta^{13}C$ 与C₁/C₁+C₂天然气“Bernard”分类图(图9)中可以看出,百色盆地浅层气半数以上的样品数据点群,均落在生物成因气区域内,其他样品则基本上分布于混合区,没有数据点落在热成因气区范围。这表明百色盆地的浅层气主要为生物成因气,但混有不同比例的热成因气。根据戴金星等^[18]和张义纲等^[19]成熟天然气与生物气的判别划分标准,结合百色盆地浅层气具有烷烃气中甲烷居绝对优势(高达99%以上),C₂⁺以上重烃含量极低(低于1%),且甲烷碳同位素偏轻($\delta^{13}C_1$ 低于-68‰)等基本特点,判别确定浅层气属生物气无疑。

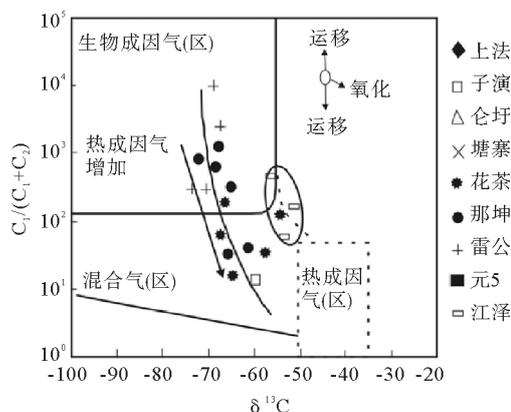


图9 百色盆地浅层气“Bernard”图(据文献^[19]修改)

Fig. 9 The “Bernard” figure of shallow gas in Baise Basin

合浦盆地近年来钻探的多口浅层水井的钻井过程中均发现和见到了非常强烈的天然气显示,多口井水样中采集的天然气燃烧火焰均呈蓝色并高达数米,表明其天然气气藏可能具有一定的自然产能和天然气产量。从表 4 百色盆地与合浦盆地浅层生物气的地球化学特征对比,可以看出,合浦盆地浅层天然气以甲烷居绝对优势, ($C_1/C_1 + C_2 > 99\%$), C_2^+ 的重烃含量甚微,几乎没有,甲烷碳同位素较低 ($\delta^{13}C_1 < -55\%$),属于典型的生物气且可与百色盆地浅层生物气对比。由此可见,合浦盆地与百色盆地浅层生物气形成及分布富集特点基本类似,并且存在一定的成因联系,合浦盆地具有形成浅层生物气

的潜力。

3 低熟油气及生物气勘探前景

根据合浦盆地西场凹陷西 1 井、西参 2 井、亚 1 井及路 1 井和常乐凹陷乐参 1 井、乐 2X 井等探井资料及多项地化指标综合分析,合浦盆地始新统烃源岩有机质丰度较好,其中始新统酒席坑组基本上达到好生油岩标准;有机质类型主要为 II 型,其中西场凹陷低熟烃源岩的生源母质类型主要以 II₁ 型为主,亦含少量 I 型,常乐凹陷低熟烃源岩生源母质类型主要以 II₂ 型为主,含有少量 III 型,且这两个凹陷

表 4 百色盆地浅层生物气地球化学特征及与合浦盆地浅层生物气的对比
Table 4 The comparison of geochemistry of shallow biogenic gas in Baise Basin and Hepu Basin

地区	油气藏/样品	代表井	层位	深度/m	天然气组成/%				$\delta^{13}C/\%$, PDB		δD (SMOW‰)	气层厚度/m	天然气产量/(m ³ /d)	气层上下相邻煤层 Ro/(%)
					CH ₄	C ₂ ⁺	CO ₂	N ₂	C ₁	C ₂				
百色盆地	仑圩气藏	仑 2-16	E ₂ b	328.6~335.4	92.83	3.93		2.92	-68.60	-54.30	-213.70	6.8	2930	0.48
	元 5 气藏	元 5	E ₂ n	654.1~656.9	97.65	1.73		0.61	-54.03		-218.00	2.8	673	
	江泽气藏	江 1	E ₂ n	578.8~673	98.08	0.32		1.58				22	1.6×10 ⁴	0.53~0.70
	百 51 油气点	百 51	E ₂ b	1 502.5~1517	84.78	11.79		3.42	-58.81	-38.48	-237.90			
	上法气藏	百 4-9	E ₃ f	257	98.99			1.01	-74.60					
	上法油气藏	法 1	T ₂ l	1 648~1 680	66.94	29.31		3.48	-58.53			17.2	14×10 ⁴	<0.56
	仑圩油气藏	仑 21	E ₂ n	889~912	87.79	7.34		4.46	-59.16		-231.30			
	塘寨油气藏	百 25	E ₂ b ¹	263~419	97.69	0.41	0.11	1.80	-69.00	-61.10				
	塘寨油气藏	百 32	E ₂ b	991~1 002					-59.30		-240.80			
	花茶油气藏	仑 4	T ₂ l	604~662	82.419	6.36	1.73	7.59	-64.78		-245.80			
合浦盆地	雷公油气藏	雷 2	E ₂ b ³	537	97.84	0.08		2.02	-67.20	-50.50				
	那坤油气藏	坤 10-2	E ₂ n ²	845	95.05	3.39	0.16	1.25	-61.10	-36.10				
	小瓶 6-1				86.01			13.99			-56.42			
	小瓶 1-1				81.53			18.47			-56.18			
	小瓶 3-1		Q-N ₁	30~100	86.29			13.71			-55.70			
	大瓶 4-1				77.43			22.57			-55.70			

始新统烃源岩多处未熟/低熟热演化阶段的早期低熟油气窗范围,具有一定的生烃潜力及勘探前景。

此外,根据合浦盆地低熟烃源岩及低熟油气/生物气地球化学特征分析,通过与已发现低熟油气资源的百色盆地进行综合对比研究,确证合浦盆地具有形成未熟-低熟油气及浅层生物气的潜力,且在该盆地浅层水井钻探中发现了强烈的生物气显示。因此,合浦盆地具备形成低熟油气/生物气的基本地质条件,勘探寻找低熟油气/生物气应是该区油气勘探的主要方向和必然选择。

综上所述,合浦盆地低熟油气及生物气地球化学特征与百色盆地相似,应该与该盆地一样,具有良好的低熟油气及生物气勘探前景。因此,在油气勘探中应该借鉴百色盆地油气勘探的成功经验和科学技术方法,重点勘探寻找低熟油气和浅层生物气。同时,在油气地质研究上,根据已有探井地质资料,深入分析研究低熟烃源岩分布及有效烃源灶与烃源供给系统,确定有效烃源供给系统展布范围,综合预测与圈定有利的低熟油气运聚富集区带,在此基础上,最终评价优选与精细刻画出最有利的含油气勘探目标,为油气勘探部署提供最佳钻探目标,争取尽快获得低熟油气勘探的突破。

4 结论

(1) 根据西场凹陷西1井、西参2井、亚1井及路1井和常乐凹陷乐参1井、乐2X井等探井资料以及有机地球化学综合分析,合浦盆地迄今为止所钻遇古、新近系烃源岩,多属于较高有机质丰度的偏腐殖混合型/偏腐泥混合型低熟烃源岩,由于其成熟度偏低,多处未熟或低熟热演化阶段的早期低熟油气窗,具备了低熟油气及生物气形成的基本地质条件。

(2) 根据合浦盆地低熟烃源岩及低熟油气/生物气地球化学特征分析,其与百色盆地一样,始新统具有有机质丰度较高、生烃潜力较大、成熟度偏低的偏腐泥/偏腐殖混合型烃源岩,完全能够形成一定规模的未熟-低熟油气及浅层生物气,具有较大的资源潜力及勘探前景。

(3) 合浦盆地未来油气勘探方向及重点勘探领域,应主要立足勘探寻找低熟油气及浅层生物气,争取尽快获得油气勘探的突破。

参考文献 (References)

- [1] 陆明德. 广西合浦盆地油气资源综合评价研究[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1994. [LU Mingde. Comprehensive Evaluation of Oil and Gas Resources in Hepu Basin, Guangxi[M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 1994.]
- [2] 叶加仁, 陆明德, 周大钰. 广西合浦盆地油气勘探远景和方向[J]. 广西科学, 1995, 2(1): 34-37. [YE Jiaren, LU Mingde, ZHOU Dayu. Exploration prospects and direction of the Hepu Basin, Guangxi[J]. Guangxi Sciences, 1995, 2(1): 34-37.]
- [3] 高志龙, 陈建渝, 何生, 等. 合浦盆地的油气远景评价与研究[J]. 广西地质, 1997, 10(4): 41-46. [GAO Zhilong, CHEN Jianyu, HE Sheng, et al. Study and prospective evaluation on oil and gas in Hepu Basin[J]. Guangxi Geology, 1997, 10(4): 41-46.]
- [4] 何生, 张博全, 高志龙, 等. 广西合浦盆地地层剥蚀、油气形成及油气运移报告[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1994. [HE Sheng, ZHANG Boquan, GAO Zhilong, et al. The Report of Denudation, Oil and Gas Formation and Hydrocarbon Migration in Hepu Basin, Guangxi[M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 1994.]
- [5] 王连进, 吴冲龙, 李绍虎, 等. 广西百色盆地油气系统[J]. 石油实验地质, 2006, 28(2): 113-116. [WANG Lianjin, WU Chonglong, LI Shaohu, et al. Petroleum system of the Baise Basin, Guangxi Province[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2006, 28(2): 113-116.]
- [6] 王铁冠, 钟宁宁, 候读杰, 等. 低熟油气形成机理与分布[M]. 北京: 石油工业出版社, 1995. [WANG Tieguan, ZHONG Ningning, HOU Dujie, et al. The Formation Mechanism and Distribution of Low Mature Oil and Gas[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1995.]
- [7] 高志龙, 何生, 陈建渝. 合浦盆地生油岩有机地球化学特征[J]. 武汉: 地球科学, 1995, 20(1): 101-106. [GAO Zhilong, HE Sheng, CHEN Jianyu. Organic geochemical characters of source rocks in Hepu Basin[J]. Earth Science, 1995, 20(1): 101-106.]
- [8] 邵昌民, 赵斌. 广西合浦、南宁、宁明、百色盆地烃源岩有机地球化学特征与勘探潜力分析[J]. 海相油气地质, 2011, 16(1): 33-44. [SHAO Changmin, ZHAO Bin. Organic geochemical characteristics and exploration potential analysis of hydrocarbon source rocks in Hepu, Nanning, Ningming and Baise Basins, Guangxi Province[J]. Marine Origin Petroleum Geology, 2011, 16(1): 33-44.]
- [9] 罗毅, 李学著, 薛秀丽. 百色盆地油气运聚特征分析[J]. 沉积与特提斯地质, 2003, 23(2): 76-81. [LUO Yi, LI Xuezhong, XUE Xiuli. The oil and gas migration in the Baise Basin, Guangxi[J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 2003, 23(2): 76-81.]
- [10] 谢刚平, 王玉静, 余宏忠, 等. 百色盆地古近系层序地层模式与油气勘探[J]. 大地构造与成矿学, 2003, 27(4): 378-383. [XIE Gangping, WANG Yujing, YU Hongzhong, et al. Mode of Paleogene sequence stratigraphy and hydrocarbon exploration of the Baise Basin[J]. Geotectonica et Metallogenia, 2003, 27(4): 378-383.]
- [11] 王青春, 朱扬明. 百色盆地油气地球化学特征及集聚成藏分析[M]. 浙江大学, 2006: 5. [WANG Qingchun, ZHU Yang-

- ming. Geochemistry Characters Discussion and Convergency Analysis for Oil and Gas of Baise Basin[M]. Zhejiang University, 2006:5.]
- [12] 曾凡刚, 妥进才, 李原, 等. 百色盆地低熟油的地球化学特征及成因机制[J]. 沉积学报, 1998, 16(1): 92-97. [ZENG Fangan, TUO Jincan, LI Yuan, et al. Geochemical characteristics and genetic mechanism of Immature oils from Baise Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 1998, 16(1): 92-97.]
- [13] 黄第藩, 张大江, 王培荣, 等. 中国未成熟石油成因机制和成藏条件[M]. 北京: 石油工业出版社, 2003, 1981: 1-58. [HUANG Difan, ZHANG Dajiang, WANG Peirong, et al. The Formation Mechanism and Reservoir Conditions of Chinese Immature Petroleum[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2003, 1981: 1-58.]
- [14] 滇黔桂石油地质志编写组编. 中国石油地质志(滇黔桂油气区)[M]. 北京: 石油工业出版社, 1992: 357-366. [Writing Group of Petroleum Geology of China in Yunnan, Guizhou and Guangxi province. Petroleum Geology of China (oil and gas zone in Yunnan, Guizhou and Guangxi province) [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1992: 357-366.]
- [15] 刘文汇, 黄第藩, 熊传斌, 等. 成烃理论的发展及国外未熟-低熟油气的分布与研究现状[J]. 天然气地球科学, 1999, 10(1/2): 1-22. [LIU Wenhui, HUANG Difan, XIONG Chuanbin, et al. The development of hydrocarbon generation theory and the distribution and research status of foreign immature-low mature oil and gas[J]. Natural Gas Geoscience, 1999, 10(1/2): 1-22.]
- [16] 史继扬, 向明菊, 屈定创, 等. 低成熟油气成因中的母质和烃源问题[J]. 天然气地球科学, 1993, 4(6): 47-56. [SHI Jiyang, XIANG Mingju, QU Dingchuang, et al. Parent material and source of low mature of oil and gas[J]. Natural Gas Geoscience, 1993, 4(6): 47-56.]
- [17] 黄第藩, 李晋超. 陆相沉积中的未熟石油及其意义[J]. 石油学报, 1987, 8(1): 1-9. [HUANG Difan, LI Jinchao. Immature oil and its significance in continental sedimentary [J]. Acta Petroli Sinica, 1987, 8(1): 1-9.]
- [18] 戴金星, 等. 中国天然气地质学(卷一)[M]. 北京: 石油工业出版社, 1992. [DAI Jinxing, et al. Natural Gas Geology in China (volume one) [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1992.]
- [19] 张义纲, 等. 天然气的生成和气源岩评价方法[C]//石油和天然气地质文集(第4集). 北京: 石油工业出版社, 1994. [ZHANG Yigang, et al. Generation of Natural Gas and Evaluation Method of Gas Source Rock[C]// Collection of Oil and Gas Geology (fourth) [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1994.]

THE CHARACTERISTICS OF HYDROCARBON SOURCE ROCKS AND EXPLORATION PROSPECTS OF LOW MATURE OIL AND GAS/BIO-GAS IN HEPU BASIN

ZHANG Jingru^{1,2}, HE Jiaxiong², LU Junwen^{3,4}, YANG Xibing⁵,
ZHU Jitian⁵, GONG Xiaofeng^{1,2}, ZHANG Wei^{1,2}

(1. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

2. Key Laboratory of Marginal Sea Geology, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China;

3. Earth Sciences Department, Zhejiang University, Hangzhou, 310027, China;

4. Chinese 75711 People's Liberation Army troops, Guangzhou 510515, China; 5. Zhanjiang Branch Institute of CNOOC, Zhanjiang 524057, China)

Abstract: No breakthrough has been made so far in the Hepu Basin, the northern margin of the South China Sea, for oil and gas exploration, due to lack of in-depth understanding of geological conditions for petroleum accumulation. Major hydrocarbon source rocks in the basin are low matured dark mudstone series in the center of an Eocene deep lake, and its characteristics and geological conditions for accumulation of the low matured oil and gas from immature source rocks are similar to those in the Baise Basin. In this paper, in-depth analysis of the abundance, type and maturity of organic matters of the low matured source rocks in the Hepu basin is made, focusing on comparison with the analogy of the Baise Basin. It is concluded that the Paleogene hydrocarbon source rocks in the Hepu Basin have favorable geological conditions for generation of low mature oil and gas/bio-gas. Therefore, we can learn from the case in the Baise Basin, which has earned successful experience in exploration of low matured oil and gas / bio-gas, to establish the exploration direction and strategy for low maturity oil and gas and biogas resources in the Hepu Basin.

Key words: immature source rocks; low mature oil and gas/biogas; geochemical characteristics; exploration prospects; Hepu Basin