

北部湾盆地福山凹陷烃源岩地球化学 特征及地质意义

陈善斌¹,甘华军¹,时 阳²,赵迎冬¹,王 祥¹

(1.中国地质大学(武汉)资源学院,湖北 武汉 430074; 2.中国石油南方石油勘探开发有限责任公司,广东 广州 510240)

摘要:福山凹陷烃源岩地球化学特征对资源量评价及勘探目标优选具有重要意义。福山凹陷流沙港组烃源岩地球化学特征多参数分析和对比研究表明,流三段烃源岩主要发育于淡水、弱氧化湖泊环境,有机质丰度较高,有机质类型以II₁-II₂型为主,属于优质烃源岩;流二段烃源岩形成于淡水—微咸水、弱氧化—弱还原的湖泊环境,有机质丰度高,以II₁型有机质为主,属于优质—高丰度烃源岩;流一段烃源岩主要沉积于淡水、弱氧化的湖泊环境,有机质丰度较高,有机质类型以II₂型为主,属于次优质烃源岩。福山凹陷流沙港组烃源岩在流一段沉积晚期(38 Ma)开始生油,涸一段沉积早期(30 Ma)进入生油高峰期,新近系早期(20 Ma)进入生气门限,目前仍处于大量生烃阶段。白莲次凹现今生烃强度高于皇桐次凹,白莲含油气子系统的下部含油气系统是最佳含油气系统,环白莲次凹油气聚集带的流三段—亚段—流二段储盖组合具有较大勘探潜力。

关键词:流沙港组 烃源岩 地球化学特征 北部湾盆地 福山凹陷

中图分类号:TE112.113

文献标识码:A

文章编号:1009-9603(2015)01-0014-06

Geochemical features and geologic significance of source rocks in Fushan sag, Beibuwan basin

Chen Shanbin¹, Gan Huajun¹, Shi Yang², Zhao Yingdong¹, Wang Xiang¹

(1. Faculty of Earth Resources, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan City, Hubei Province, 430074, China; 2. South Petroleum Exploration and Development Co., Ltd., Guangzhou City, Guangdong Province, 510240, China)

Abstract: Geochemical features of source rocks have great significance on resource evaluation and exploration target optimization in Fushan sag. Multiple geochemical parameters analysis and comparison of the source rocks in the Liushagang Formation of Fushan sag suggest that hydrocarbon source rocks in the 3rd member of the formation developed in freshwater lakes, weak oxidation environments with high abundance of organic matter which is type II₁-II₂. They are high quality source rocks. The source rocks in the 2nd member of the Liushagang Formation developed in freshwater or brackish water, weak oxidation or slightly deoxidization environments with higher abundance of organic matter which is mainly type II₁. They are high quality and high abundance source rocks. The source rocks in the 1st member of the Liushagang Formation developed in freshwater, weak oxidation sedimentary environment with high abundance of organic matter which is type II₂. They are secondary high quality source rocks. Source rocks of the Liushagang Formation entered into its oil generation threshold at the late depositional stage of the E₂l₁ Formation (about 38 Ma), reached the peak period of oil generation at the early depositional stage of E₃w₁ (about 30 Ma), and entered into its gas generation threshold at the early depositional stage of N (about 20 Ma), and it is still in the stage of a large amount of hydrocarbon generation. At present, hydrocarbon-generating intensity of Bailian subsag is higher than that of Huangtong subsag. The geochemical features of source rocks show that the lower petroleum system of Bailian subsag is the best in Fushan sag, and the exploration potential in the E₂l₃¹ and

收稿日期:2014-11-14。

作者简介:陈善斌(1989—),男,河南原阳人,在读硕士研究生,从事油气成藏规律方面的研究。联系电话:18086431475, E-mail: chensb1989@163.com。

基金项目:国家自然科学基金青年基金“北部湾盆地涸西南凹陷含烃流体运移特征及其地温异常效应分析”(41202074),中国博士后科学基金“川东南志留系页岩气储层评价及成藏条件分析”(201104465)。

E_{2l_2} Formation in Bailian is greater with better reservoir-seal assemblage.

Key words: Liushagang Formation; source rocks; geochemical features; Beibuwan basin; Fushan sag

烃源岩是在天然条件下曾经产生和排出过烃类并已形成工业性油气聚集的细粒沉积^[1]。烃源岩的品质决定着盆地的勘探前景,具有良好烃源岩是沉积盆地形成油气聚集的首要条件^[2-4]。福山凹陷流沙港组烃源岩属于湖相烃源岩,湖水因盐度不同而形成上下分层水体,湖盆底部出现缺氧环境,最大限度地保存了陆源输入有机质和湖盆水生有机质。一般认为湖相是发育优质烃源岩的有利沉积环境^[5-8]。丁卫星等对福山凹陷流沙港组油气生成、运移、聚集和保存等成藏诸要素及其关系进行了研究^[9],李美俊等研究了福山凹陷流沙港组油气运移和充注方向^[10],并对福山凹陷天然气的成因和来源进行了分析^[11],他们均对福山凹陷流沙港组烃源岩进行了简单评价,认为流沙港组烃源岩有机质丰度较高,有机质类型为Ⅱ—Ⅲ型,有机质演化程度较高;但这些研究都着重于石油、天然气的来源与成藏规律的探讨,对福山凹陷流沙港组烃源岩地球化学特征缺乏系统的分析及全面的认识。笔者通过对福山凹陷流沙港组烃源岩进行大量系统采样、地球化学分析和生烃史模拟,较全面地研究了流沙港组烃源岩地球化学特征,对于评价福山凹陷流沙港组烃源岩的生烃潜力和资源量以及勘探目标优选具有重要意义。

1 地质背景

福山凹陷位于南海大陆架北部湾盆地的东南缘,是受燕山运动影响在古生界及中生界白垩系岩层基底上发育起来的一个近北东东向展布的箕状断陷,面积约为2 920 km²。福山凹陷在古近纪经历了多期构造运动,导致凹陷内部地质结构比较复杂。凹陷整体上呈东西向隆凹相间、北断南超、南北分带的构造格局,凹陷由南向北划分为南部斜坡带、中部构造带、中北断槽带和北部断阶带;自东向西又可划分为海口次凹、白莲次凹与皇桐次凹,其间以云龙凸起和花场次凸相间隔^[8,12-20](图1)。

福山凹陷沉积序列以新生代沉积为主,其基底为中、古生界变质岩,沉积盖层由古近系长流组(E_{1c})、流沙港组(E_{2l})、涠洲组(E_{3w}),新近系(N)和第四系(Q)组成^[19-20]。 E_{1c} 和 E_{3w} 以河流相和冲积扇相沉积为主, E_{2l} 则主要为湖相沉积。沉积建造以砂

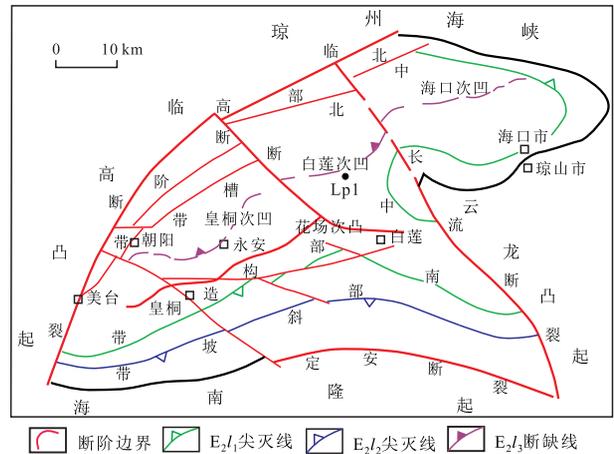


图1 福山凹陷构造纲要

Fig.1 Structural division and its location of Fushan sag

砾岩和泥岩为主。 E_{2l} 自上向下可细分为流一段(E_{2l_1})、流二段(E_{2l_2})和流三段(E_{2l_3}), E_{3w} 从上到下又可划分为涠一段(E_{3w_1})、涠二段(E_{3w_2})和涠三段(E_{3w_3})。根据勘探需要,将 E_{2l_3} 由上向下划分为 $E_{2l_3}^1$ 、 $E_{2l_3}^2$ 和 $E_{2l_3}^3$ 共3个亚段。

E_{2l_3} 在研究区的南部、西部及东北部均有辫状河三角洲发育,研究区北部为半深湖及深湖相暗色泥岩分布区,约占研究区总面积的一半^[19],是该时期烃源岩最为发育的区域,烃源岩厚度为200~600 m,主要分布于白莲次凹和皇桐次凹,为福山凹陷的有效烃源岩; E_{2l_2} 深水湖泊相最为发育,研究区北半部几乎全为深湖亚相分布区,加上其周围的半深湖亚相,占研究区总面积的70%以上^[20],是烃源岩最为发育的层段,烃源岩厚度为250~750 m,为福山凹陷最具生烃潜力的烃源岩; E_{2l_1} 沉积范围比 E_{2l_2} 小很多,然而其沉积相分布格局与 E_{2l_2} 比较相似,研究区北部地区仍为深湖亚相区^[19],只是该期烃源岩分布范围明显缩小,厚度为200~700 m,主要发育于白莲次凹和皇桐次凹中心。

2 烃源岩地球化学特征

2.1 有机质丰度

烃源岩有机质丰度反映烃源岩中有机质的数量特征,表征有机质丰度的指标主要包括烃源岩中的有机碳含量(TOC)、氯仿沥青“A”含量(EOM)、总烃含量(HC)、生烃潜量(S_1+S_2)等^[21]。采用黄第藩等提出的陆相油源岩有机质评价标准^[22],对福山凹陷

E_2l 烃源岩进行评价。

从统计结果来看,研究区 E_2l 烃源岩有机碳含量主要为 0.12%~6.00%, 平均值达 1.42%, 显示研究区有机碳含量总体较高。其中, E_2l_3 有机碳含量为 0.12%~4.73%, 平均为 1.43%; E_2l_2 有机碳含量为 0.64%~6.00%, 平均为 1.61%; E_2l_1 有机碳含量为 0.18%~2.61%, 平均为 1.23%。总体来讲, 研究区 E_2l_2 有机碳含量最高, 属于优质—高丰度烃源岩; E_2l_3 次之, 属于优质烃源岩; E_2l_1 相对较差, 属于次优质烃源岩。

研究区 E_2l 烃源岩氯仿沥青“*A*”含量主要为 0.004 8%~0.247 0%, 平均值为 0.096 8%。其中, E_2l_3 氯仿沥青“*A*”含量为 0.009 4%~0.226 2%, 平均为 0.105 5%; E_2l_2 氯仿沥青“*A*”含量为 0.013 2%~0.247 0%, 平均为 0.109 7%; E_2l_1 氯仿沥青“*A*”含量为 0.004 8%~0.179 2%, 平均为 0.075 1%。总体显示出 E_2l_2 烃源岩品质最好, 这与有机碳含量统计得出的结论一致。

E_2l_3 烃源岩总烃含量为 14×10^{-6} ~ $1 580 \times 10^{-6}$, 平均为 611×10^{-6} , 生烃潜量为 1.88~9.31 mg/g, 平均为 3.79 mg/g; E_2l_2 总烃含量为 204×10^{-6} ~ $1 519 \times 10^{-6}$, 平均为 612×10^{-6} , 生烃潜量为 0.50~29.28 mg/g, 平均为 4.56 mg/g; E_2l_1 总烃含量为 58×10^{-6} ~ $1 121 \times 10^{-6}$, 平均为 424×10^{-6} , 生烃潜量为 0.52~6.25 mg/g, 平均为 2.50 mg/g。同样反映出研究区 E_2l_2 烃源岩品质最好, E_2l_3 次之, E_2l_1 相对较差。

2.2 有机质类型

有机质类型是确定烃源岩生烃特性的重要参数。有机质类型不同, 其性质不同, 生烃潜力、产烃类型及门限深度(温度)也都有一定的差异^[23]。主要用干酪根镜鉴和岩石热解分析来研究有机质类型。

2.2.1 干酪根镜鉴

通过镜下观察干酪根的显微组分及其相对含量可以直接区分出干酪根的类型。 E_2l_2 烃源岩干酪根类型最好, II_1 型占样品总数的 56%, 其余为 II_2 型, 无 III 型; E_2l_3 烃源岩干酪根类型相对次之, II_1 型和 I 型仅占样品总数的 34%, II_2 型占样品总数的 43%, III 型占样品总数的 13%; E_2l_1 烃源岩干酪根类型相对较差, II_1 型仅占样品总数的 18%, II_2 型占样品总数的 58%, 其余为 III 型。

2.2.2 岩石热解分析

岩石热解分析得出的氢指数(*HI*)、氧指数(*OI*)和最高热解峰温(T_{max})等参数可以快速有效地判定有机质类型。从烃源岩 *HI* 和 *OI* 的关系(图 2a)可以

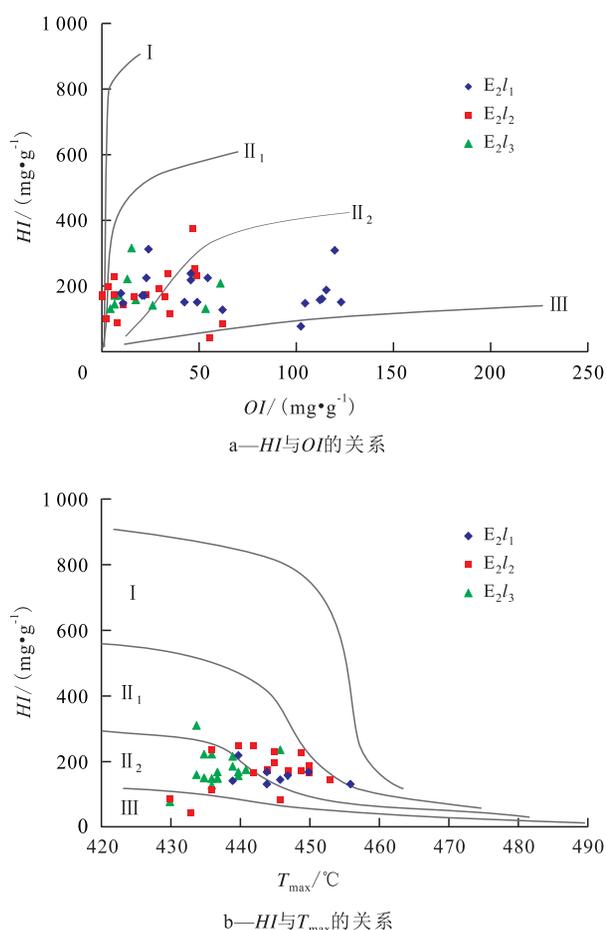


图2 福山凹陷流沙港组烃源岩有机质类型判别

Fig.2 Discrimination diagrams of organic matter types of source rocks of the Liushagang Formation in Fushan sag

看出, E_2l_3 干酪根类型主要为 II_1 型和 II_2 型; E_2l_2 干酪根类型以 II_1 型为主, II_2 型较少; E_2l_1 干酪根类型以 II_2 型为主, II_1 型次之, 局部含有 III 型。烃源岩 *HI* 和 T_{max} 关系(图 2b)显示, E_2l_3 干酪根类型主要为 II_2 型; E_2l_2 干酪根类型以 II_1 型为主, 部分含 II_2 型; E_2l_1 干酪根类型以 II_2 型为主, II_1 型和 III 型较少。总体来讲, E_2l_2 干酪根类型最好, 主要为 II_1 型; E_2l_3 干酪根类型次之, 以 II_1 — II_2 型为主; E_2l_1 干酪根类型相对较差以 II_2 型为主, II_1 型和 III 型较少。

2.3 有机质成熟度

烃源岩有机质成熟度是衡量烃源岩实际生烃能力的重要指标之一, 是评价一个地区或某一烃源岩系生烃量及资源前景的重要依据。主要依据烃源岩镜质组反射率(R_o)来研究有机质成熟度^[24]。

研究区 E_2l 烃源岩实测镜质组反射率为 0.44%~2.55%, 从未成熟到成熟的样品均有分布, 平均值约为 0.60%。其中, E_2l_3 主要为 0.52%~2.55%, 平均为 0.74%; E_2l_2 主要为 0.46%~2.39%, 平均为 0.60%; E_2l_1 主要为 0.44%~0.80%, 平均为 0.54%。总体表现为从上到下, 成熟度逐渐增高。

2.4 烃源岩沉积环境

饱和烃气相色谱可以提供有关物源、成熟度和沉积环境等信息。姥鲛烷、植烷及其比值(Pr/Ph)常作为判断原始沉积环境氧化—还原条件及介质盐度的标志^[25-26]；一般在强还原条件下以形成植烷为主,在弱氧化条件下以形成姥鲛烷为主。伽马蜡烷指数是一种反映水体分层的地球化学参数,当伽马蜡烷指数小于0.4时,反映淡水沉积环境;当伽马蜡烷指数为0.4~0.8时,反映微咸水—半咸水沉积环境;当伽马蜡烷指数大于0.8时,反映咸水沉积环境^[27]。

根据福山凹陷流沙港组烃源岩 Pr/Ph 值与伽马蜡烷指数的关系(图3), E₂l₃ 烃源岩大多数样品 Pr/Ph 值为 0.91~6.24, 伽马蜡烷指数为 0.05~0.36, 反映了淡水、弱氧化沉积环境; E₂l₂ 烃源岩大部分样品 Pr/Ph 值为 0.61~4.59, 伽马蜡烷指数为 0.05~0.44, 处于淡水—微咸水、弱氧化—弱还原沉积环境; E₂l₁ 烃源岩大部分样品 Pr/Ph 值为 0.62~4.43, 伽马蜡烷指数为 0.04~0.32, 处于淡水、弱氧化沉积环境。总体来讲, E₂l₂ 沉积时期湖泊水体稍咸于 E₂l₃ 和 E₂l₁ 沉积时期, 原因可能是 E₂l₃ 沉积时期凹陷处于初始扩张阶段, 湖泊水体较浅; E₂l₂ 沉积时期凹陷裂隙作用加剧, 湖泊范围扩大, 水体由浅变深; 至 E₂l₁ 沉积时期凹陷开始萎缩, 湖泊范围缩小, 水体再由深变浅。

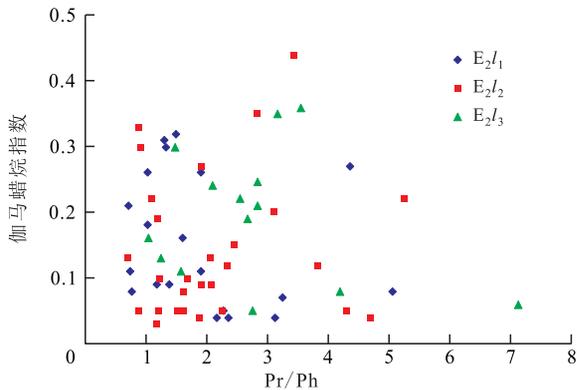


图3 福山凹陷流沙港组烃源岩 Pr/Ph 与伽马蜡烷指数关系
Fig.3 A map of the relationship between Pr / Ph and γ index of source rock of the Liushagang Formation in Fushan sag

3 生烃史

烃源岩生烃史模拟是在埋藏史模拟的基础上进行的。烃源岩的生烃史可以提供有关盆地的热背景、有机质成熟度和油气生成过程的动态信息,为油气成藏条件的时空配置以及油气资源评价等研究提供依据^[28-31]。利用美国 PRA 公司推出的 BasinMod 盆地模拟软件对福山凹陷 E₂l 烃源岩进行

生烃史模拟。

模拟结果显示, E₂l 烃源岩在 E₂l₁ 沉积晚期(38 Ma)开始生油,在 E₂w₁ 沉积早期(30 Ma)进入生油高峰期,在 N 早期(20 Ma)进入生气门限,现今仍处于大量生烃阶段(图4)。E₂l₃ 烃源岩现今已进入大量生气阶段,白莲次凹最大生气强度为 6 300×10⁶ m³/km²,皇桐次凹生气强度较小,最大生气强度仅为 2 400×10⁶ m³/km²; E₂l₂ 烃源岩现今仍处于生油阶段,白莲次凹最大生油强度为 5 600 kt/km²,皇桐次凹最大生油强度为 5 300 kt/km²,前者稍大于后者; E₂l₁ 烃源岩现今也处于生油阶段,最大生油强度为 5 100 kt/km²,其处于白莲次凹内(表1)。总体来讲,白莲次凹 E₂l 烃源岩生烃强度高于皇桐次凹。

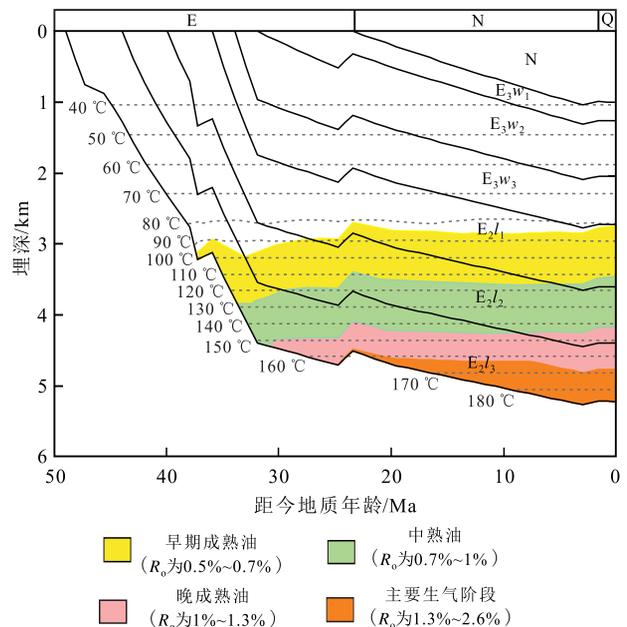


图4 福山凹陷 Lp1 井热史和有机质成熟史模拟
Fig.4 Temperature evolution and organic maturity evolution modeling of Well Lp1 in Fushan sag

表1 福山凹陷流沙港组烃源岩现今最大生烃强度统计
Table1 The present maximum hydrocarbon generating intensity of source rocks of the Liushagang Formation in Fushan sag

层位	最大生油强度/ (kt·km ⁻²)		最大生气强度/ (10 ⁶ m ³ ·km ⁻²)	
	白莲次凹	皇桐次凹	白莲次凹	皇桐次凹
E ₂ l ₁	5 100	4 800	2 100	1 500
E ₂ l ₂	5 600	5 300	2 200	1 800
E ₂ l ₃	5 400	4 900	6 300	2 400

4 地质意义

福山凹陷自身是一个完整的含油气系统。根据系统结构差异,纵向可划分出下部含油气子系统和上部含油气子系统,横向可划分出白莲含油气子

系统和皇桐含油气子系统^[32]。纵向上,下部含油气子系统烃源层为 E_{2l_2} 和 E_{2l_3} ,储层为 E_{2l_1} ,盖层为 E_{2l_2} ;上部含油气子系统烃源层为 E_{2l_1} 和 E_{2l_2} ,储层为 E_{2l_1} 和 E_{3w} ,盖层为 E_{2l_1} 。上、下含油气子系统烃源层地球化学特征具有差异性,导致2个系统内油气藏具有不同的油气赋存特征及类型。油气物性上, E_{2l_3} 主要产凝析油—轻质油,原油密度普遍低于 $0.800\ 0\text{ g/cm}^3$,平均为 $0.792\ 9\text{ g/cm}^3$; E_{2l_1} 主要产正常原油,原油密度明显偏高,平均约为 $0.844\ 6\text{ g/cm}^3$;油气藏类型上,下部含油气子系统主要为轻质油气藏和原生凝析油气藏,而上部含油气子系统则主要为次生油藏和原生日油藏。

横向上来讲,福山凹陷具有白莲次凹和皇桐次凹2个生烃中心,且白莲次凹生烃强度高于皇桐次凹。现已发现金凤、白莲、花东、花东、永安、朝阳、博厚和美台8个油气田,它们围绕2个烃源灶呈环带分布,构成2个有利的油气聚集环带(图5)。同时,2个生烃中心还决定了油气藏储量丰度,反映到油气藏规模上,依据勘探成果,受控于白莲次凹的油气藏(如花东),最大石油地质储量为 $218.57\times 10^4\text{ t}$;受控于皇桐次凹的油气藏(如美台),最大石油地质储量为 $97.22\times 10^4\text{ t}$;反映到油气发现上,目前发现的大部分油气主要分布于白莲次凹及周缘。因此,从烃源层角度,福山凹陷白莲含油气子系统的下部含油气子系统是最佳含油气系统,环白莲次凹油气聚集带的 E_{2l_3} — E_{2l_2} 储盖组合具有较大勘探潜力。

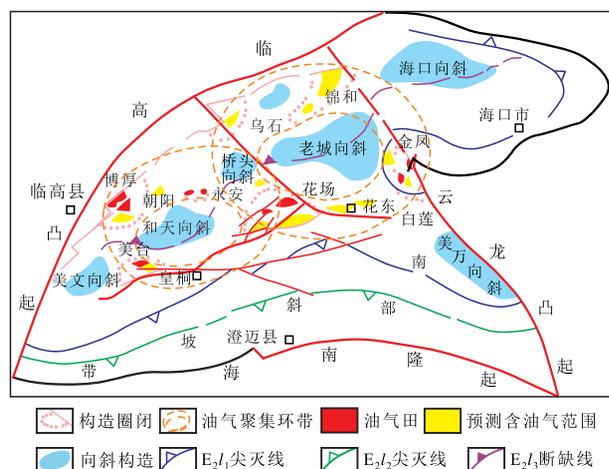


图5 福山凹陷油气有利聚集环带分布

Fig.5 A map of favorable oil and gas accumulation ring in Fushan sag

5 结论

福山凹陷 E_{2l_3} 烃源岩主要发育于淡水、弱氧化湖泊环境,有机质丰度较高,有机质类型以 II_1 — II_2

型为主,属于优质烃源岩; E_{2l_2} 烃源岩形成于淡水—微咸水、弱氧化—弱还原的湖泊环境,有机质丰度高,有机质类型主要为 II_1 型,属于优质—高丰度烃源岩; E_{2l_1} 烃源岩主要沉积于淡水、弱氧化的湖泊环境,有机质丰度较高,有机质类型以 II_2 型为主,属于次优质烃源岩。从 E_{2l_1} 到 E_{2l_3} 有机质成熟度总体表现为逐渐增高的特征。

生烃史模拟表明,福山凹陷 E_{2l} 烃源岩在 E_{2l_1} 沉积晚期(38 Ma)开始生油,在 E_{2w_1} 沉积早期(30 Ma)进入生油高峰期,在N早期(20 Ma)进入生气门限,现今仍处于大量生烃阶段;平面上,白莲次凹现今生烃强度高于皇桐次凹。

从烃源层角度,福山凹陷白莲子系统的下部含油气子系统是最佳含油气系统,环白莲次凹油气聚集带的 E_{2l_3} — E_{2l_2} 储盖组合具有较大勘探潜力。

参考文献:

- [1] Hunt J M. Petroleum geochemistry and geology [M]. New York: Freeman W H and Company, 1979.
- [2] 母国妍, 钟宁宁, 刘宝, 等. 湖相泥质烃源岩的定量评价方法及其应用[J]. 石油学报, 2010, 31(2): 218-230.
Mu Guoyan, Zhong Ningning, Liu Bao, et al. The quantitative evaluation method of lacustrine mudstone source rock and its application [J]. Acta Petrolei Sinica, 2010, 31(2): 218-230.
- [3] 张林晔. 湖相烃源岩研究进展[J]. 石油实验地质, 2008, 30(6): 591-595.
Zhang Linye. The progress on the study of lacustrine source rocks [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2008, 30(6): 591-595.
- [4] 李志明, 徐二社, 秦建中, 等. 烃源岩评价中的若干问题[J]. 西安石油大学学报: 自然科学版, 2010, 25(6): 8-12.
Li Zhiming, Xu Ershe, Qin Jianzhong, et al. Some problems on the evaluation of source rock [J]. Journal of Xi'an Shiyou University: Natural Science Edition, 2010, 25(6): 8-12.
- [5] 陈婷, 罗睿, 王君泽. 济阳坳陷沙河街组 and 孔店组烃源岩地球化学特征[J]. 重庆科技学院学报: 自然科学版, 2011, 13(6): 23-25.
Chen Ting, Luo Rui, Wang Junze. The geochemical characteristics of Shahejie formation and Kongdian formation hydrocarbon source rocks in the Jiyang depression [J]. Journal of Chongqing University of Science and Technology: Natural Science Edition, 2011, 13(6): 23-25.
- [6] Moldowan J M, Seifert W K, Gallegos E J. Relations between petroleum composition and depositional environment of petroleum source rocks [J]. AAPG Bulletin, 1985, 69(8): 1255-1268.
- [7] 高阳. 东营凹陷北部沙四段下亚段盐湖相烃源岩特征及展布[J]. 油气地质与采收率, 2014, 21(1): 10-15.
Gao Yang. Characteristics and distribution of salt lake source rocks from lower submember of 4th member of Shahejie formation, north Dongying depression [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2014, 21(1): 10-15.

- [8] 姜雪, 邹华耀, 庄新兵, 等. 辽东湾地区烃源岩特征及其主控因素[J]. 中国石油大学学报: 自然科学版, 2010, 34(2): 31-37.
Jiang Xue, Zou Huayao, Zhuang Xinbing, et al. Characteristics of hydrocarbon source rocks in Liaodong Bay area and its main controlling factors [J]. Journal of China University of Petroleum: Edition of Natural Science, 2010, 34(2): 31-37.
- [9] 丁卫星, 王文军, 马英俊. 北部湾盆地福山凹陷流沙港组含油气系统特征[J]. 海洋石油, 2003, 23(2): 1-6.
Ding Weixing, Wang Wenjun, Ma Yingjun. Characteristics of Liushagang formation petroleum system in Fushan depression of Beibuwan basin [J]. Offshore Oil, 2003, 23(2): 1-6.
- [10] 李美俊, 王铁冠, 刘菊, 等. 北部湾盆地福山凹陷原油充注方向及成藏特征[J]. 石油实验地质, 2007, 29(2): 172-177.
Li Meijun, Wang Tieguan, Liu Ju, et al. Oil charging orientation and accumulation characteristics of oil reservoirs in the Fushan sag, Beibuwan basin [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2007, 29(2): 172-177.
- [11] 李美俊, 卢鸿, 王铁冠, 等. 北部湾盆地福山凹陷岩浆活动与CO₂成藏的关系[J]. 天然气地球科学, 2006, 17(1): 55-59.
Li Meijun, Lu Hong, Wang Tieguan, et al. Relationship between magma activity and CO₂ gas accumulation in Fushan depression, Beibuwan basin [J]. Natural Gas Geoscience, 2006, 17(1): 55-59.
- [12] 刘恩涛, 王华, 李媛, 等. 北部湾盆地福山凹陷构造转换带对层序及沉积体系的控制[J]. 中国石油大学学报: 自然科学版, 2013, 37(3): 17-22.
Liu Entao, Wang Hua, Li Yuan, et al. Control of transfer zone over sequences and depositional system in Fushan sag, Beibuwan basin [J]. Journal of China University of Petroleum: Edition of Natural Science, 2013, 37(3): 17-22.
- [13] 罗进雄, 何幼斌, 高振中, 等. 海南福山凹陷古近系流沙港组重力流沉积研究[J]. 海洋石油, 2007, 27(3): 13-21.
Luo Jinxiong, He Youbin, Gao Zhenzhong, et al. Gravity flow deposits of Paleogene Liushagang formation in Fushan sag, Hainan province [J]. Offshore Oil, 2007, 27(3): 13-21.
- [14] 于俊吉, 罗群, 张多军, 等. 北部湾盆地海南福山凹陷断裂特征及其对油气成藏的控制作用[J]. 石油实验地质, 2004, 26(3): 241-248.
Yu Junji, Luo Qun, Zhang Duoqun, et al. Characteristics of faults in the Fushan depression of Hainan, the Beibuwan basin and their controlling roles to hydrocarbon pool-formation [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2004, 26(3): 241-248.
- [15] 余江浩, 廖远涛, 林正良, 等. 福山凹陷古近系沉降特征时空差异性及其形成机制[J]. 油气地质与采收率, 2012, 19(5): 34-38.
Yu Jianghao, Liao Yuantao, Lin Zhengliang, et al. Research on temporal diversity of settlement characteristics of Paleogene, Fushan sag [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2012, 19(5): 34-38.
- [16] 刘丽军, 佟彦明, 纪云龙, 等. 北部湾盆地福山凹陷流沙港组湖底扇沉积特征及发育背景[J]. 石油实验地质, 2003, 25(2): 111-114.
Liu Lijun, Tong Yanming, Ji Yunlong, et al. Sedimentary characteristics and developing background of the sublacustrine fan in the Liushagang formation of the Fushan depression, the Beibuwan basin [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2003, 25(2): 111-114.
- [17] 岳绍飞, 刘杰, 马丽娜, 等. 福山凹陷流沙港组三段储层四性关系及有效厚度下限标准[J]. 油气地质与采收率, 2013, 20(4): 42-45.
Yue Shaofei, Liu Jie, Ma Lina, et al. Study on reservoir four-property relations and effective thickness lower limit in third member of Liushagang formation, Fushan sag [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2013, 20(4): 42-45.
- [18] 刘杰, 孙美静, 岳绍飞, 等. 福山凹陷花场—白莲地区流沙港组成岩作用及储层物性影响因素[J]. 油气地质与采收率, 2013, 20(2): 21-24, 29.
Liu Jie, Sun Meijing, Yue Shaofei, et al. Analysis of diagenesis and major controlling factors on reservoir quality of the Liushagang formation in Huachang-Bailian area, Fushan depression, Beibuwan basin [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2013, 20(2): 21-24, 29.
- [19] 刘丽军, 旷红伟, 佟彦明, 等. 福山凹陷下第三系流沙港组沉积体系及演化特征[J]. 石油与天然气地质, 2003, 24(2): 141-145.
Liu Lijun, Kuang Hongwei, Tong Yanming, et al. Sedimentary systems and evolution characteristics of lower Tertiary Liushagang formation in Fushan sag [J]. Oil & Gas Geology, 2003, 24(2): 141-145.
- [20] 何幼斌, 高振中. 海南岛福山凹陷古近系流沙港组沉积相[J]. 古地学报, 2006, 8(3): 366-376.
He Youbin, Gao Zhenzhong. Sedimentary facies of the Liushagang formation of Paleogene in Fushan sag of Hainan island [J]. Journal of Palaeogeography, 2006, 8(3): 366-376.
- [21] 胡春余, 史文东, 田世澄, 等. 海南流沙港组烃源岩地球化学特征及资源潜力[J]. 油气地质与采收率, 2007, 14(1): 40-43.
Hu Chunyu, Shi Wendong, Tian Shicheng, et al. Geochemical characteristics and source potential of the source rocks in Qingnan subsag [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2007, 14(1): 40-43.
- [22] 黄第藩, 李晋超, 周翥虹, 等. 陆相有机质的演化和成烃机理[M]. 北京: 石油工业出版社, 1984.
Huang Dipan, Li Jinchao, Zhou Zhuhong, et al. Evolution and hydrocarbon generation mechanism of terrestrial organic matter [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1984.
- [23] 王安发, 徐国盛, 叶斌. 石油及天然气地质学[M]. 成都: 成都理工大学出版社, 2002: 105-115.
Wang Anfa, Xu Guosheng, Ye Bin. Geology of oil and gas [M]. Chengdu: Chengdu University of Technology Press, 2002: 105-115.
- [24] Tissot B P, Welte D H. Petroleum formation and occurrence: a new approach to oil and gas exploration [M]. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 1984.
- [25] 曾宪章, 梁狄刚, 王忠然, 等. 中国陆相原油和生油岩中的生物标志化合物[M]. 兰州: 甘肃科学技术出版社, 1989.
Zeng Xianzhang, Liang Digang, Wang Zhongran, et al. Biomarker