

文章编号: 1001-6112(2011)03-0297-06

珠江口盆地文昌B凹陷及 周边油气成藏特征与有利勘探领域

张迎朝^{1,2}, 陈志宏^{1,2}, 李绪深², 徐新德², 李琦³

(1. 中国地质大学 资源学院, 武汉 430074; 2. 中国海洋石油总公司
湛江分公司 研究院, 广东 湛江 524057; 3. 中国地质大学, 北京 100083)

摘要: 利用烃源岩分析、油—源对比和成藏综合分析等技术, 研究了文昌B凹陷及周边的油气来源和成藏历程, 阐明了不同区带的主力烃源岩与油气成藏特征, 深化了油气成藏主控因素认识, 提出了有利油气勘探方向。研究认为, 文昌B凹陷文昌组浅湖相烃源岩是凸起区成藏的主要贡献者, 是该区除众所周知的中深湖相优质烃源岩外的另一种优质烃源岩。南断裂带下降盘文昌组湖相烃源岩沉积期未经历了构造反转抬升, 具有“延迟生排油、多期持续油充注”的成藏过程, 三号断裂带下降盘具有“早期生排油、多期油气充注”的成藏过程。良好的文昌组湖相烃源岩、多幕式断裂活动、多套区域性优质储盖组合是该区复式油气成藏的主控因素。提出文昌B凹陷反转陡坡带、北斜坡中深层古近系、琼海凸起珠江组一段上部是有利油气勘探方向。

关键词: 浅湖相烃源岩; 成藏过程; 成藏主控因素; 勘探方向; 文昌B凹陷及周边; 珠江口盆地

中图分类号: TE122.3

文献标识码: A

Petroleum accumulation characteristics and favorable exploration directions in Wenchang B Sag and its surrounding areas, Pearl River Mouth Basin

Zhang Yingzhao^{1,2}, Chen Zhihong^{1,2}, Li Xushen², Xu Xinde², Li Qi³

(1. China University of Geosciences, Wuhan, Hubei 430074, China;

2. Research Institute of Zhangjiang Branch Company, CNOOC, Zhanjiang, Guangdong 524057, China;

3. China University of Geosciences, Beijing 100083, China)

Abstract: Based on source rock analysis, oil—source correlation and accumulation comprehensive analysis, oil source and accumulation process in the Wenchang B Sag and its surrounding areas were studied. Main source rock and hydrocarbon accumulation features in different regions were illustrated. Main controlling factors of hydrocarbon accumulation and favorable exploration directions were pointed out. Shallow lacustrine source rock of the Wenchang Formation in the Wenchang B Sag was the main contributor for accumulation in uplifting region besides the well-known middle—deep lacustrine source rock. At the end of deposition, lacustrine source rock of the Wenchang Formation in the downthrow of southern fault experienced tectonic inversion, resulting in the delay of oil generation and expulsion as well as the multi-stages of oil charging. The downthrow of fault No. 3 was also characterized by early oil generation and expulsion as well as multi-stages of oil charging. Favorable lacustrine source rock of the Wenchang Formation, multi-stages of fault activities and sets of reservoir—caprock assemblages worked as the main controlling factors for hydrocarbon accumulation. Favorable exploration directions were pointed out, including the inverse abrupt slope and the middle—deep buried Paleogene of the northern slope in the Wenchang B Sag as well as the first member of Zhujiang Formation in the Qionghai uplift.

Key words: shallow lacustrine source rock; accumulation process; main controlling factors for accumulation; exploration direction; Wenchang B Sag and its surrounding areas; Pearl River Mouth Basin

基于石油地质学、构造地质学、石油地球化学理论、方法等, 已有许多学者对珠江口盆地西部油气成藏机理和分布规律进行了研究, 取得了大量创新性成

果, 丰富了南海珠江口盆地油气勘探理论和方法^[1-9]。

文昌B凹陷位于珠江口盆地西部珠三坳陷(图1), 是南海北部大陆架主要的产油区之一。自1984年

收稿日期: 2011-01-18; 修订日期: 2011-04-09。

作者简介: 张迎朝(1971—), 男, 博士, 高级地质师, 主要从事南海油气勘探、科研工作。E-mail: zhangyingzh@cnoc.com.cn。

基金项目: 国家科技重大专项项目(2008ZX05023-01)资助。

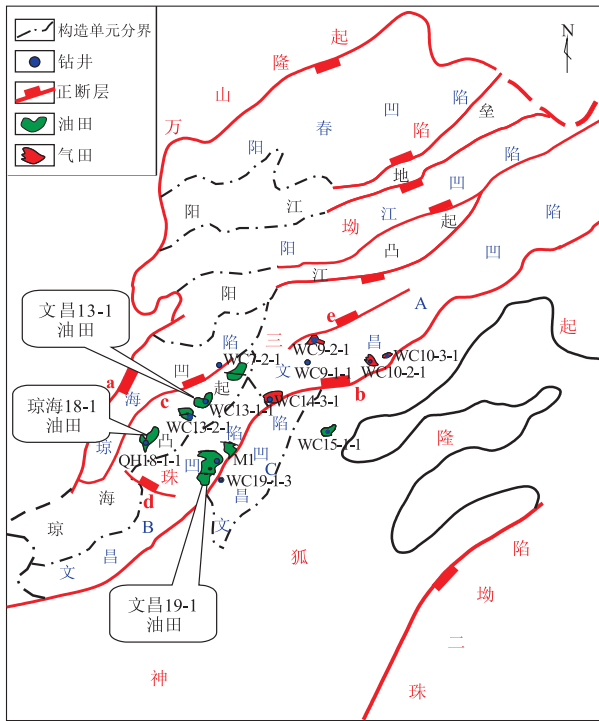


图 1 珠江口盆地西部构造区划

a. 西断裂; b. 南断裂; c. 二号断裂; d. 三号断裂; e. 六号断裂

Fig. 1 Tectonic division of western Pearl River Mouth Basin

进行文昌 19-1 构造勘探以来,先后发现了文昌 B 凹陷文昌 19-1 油田、琼海凸起琼海 18-1 油田和文昌 13-1、文昌 13-2 油田^[10-11]。文昌 19-1 构造 2 井、3 井揭示了始新统文昌组湖相烃源岩。文昌 B 凹陷烃源岩干酪根和原油碳同位素特征表明,该区石油来自始新统文昌组中深湖相、浅湖相 2 种烃源岩,但关于两者对不同区带成藏贡献、油气分布规律研究报道少见。此外,与文昌 A 凹陷不同,文昌 B 凹陷文昌组烃源岩沉积期后经历了构造反转,使烃源岩埋藏史、成熟演化史、油气运聚史复杂化。因此,文昌 B 凹陷主力烃源岩展布、烃源岩埋藏—成熟演化及油气运聚等影响下步勘探的重要问题有待

解决。笔者在文昌 B 凹陷及周边油气来源及成藏历程研究的基础上,开展成藏主控因素分析,提出有利油气勘探方向,指导该区油气勘探实践,“十一五”期间在文昌 B 凹陷反转陡坡带、琼海凸起东缘获得了新突破,取得了良好勘探效益。

1 烃源岩地化特征

文昌 B 凹陷烃源岩主要是始新统文昌组。下始新统文昌组三段主要为浅湖相暗色泥岩,主体厚度为 200~800 m,总有机碳(TOC)为 0.66%~2.41%;中始新统文昌组二段主要为中深湖相泥岩和页岩,主体厚度为 250~800 m,总有机碳为 1.75%~4.02%,有机质丰度高。烃源岩以文昌 B 凹陷南断裂为沉积中心,沿沉积中心呈北东—南西向展布,向北西的琼海凸起方向厚度逐渐减小。

从有机质类型来看,文昌组三段浅湖相烃源岩干酪根碳同位素值为 -27.10‰~-28.49‰,为 II—III 型有机质;文昌组二段中深湖相干酪根碳同位素值为 -22.13‰~-25.82‰,以 II 型有机质为主。相比而言,文昌组二段烃源岩比三段烃源岩更加偏向于腐泥型。

文昌 B 凹陷始新统烃源岩现今成熟度中心位于文昌 B 凹陷三号断裂下降盘,烃源岩处于高成熟阶段,镜质体反射率(R_o)大于 2.0%。沿这个中心,向东、向西、向北烃源岩成熟度降低。东部文昌 19 区一带因文昌组沉积期后构造反转,文昌组烃源岩镜质体反射率值为 0.6%~1.2%,文昌 B 凹陷北坡镜质体反射率值为 0.6%~1.0%。

文昌 B 凹陷文昌组烃源岩成熟演化存在明显差异。尽管南断裂陡坡带文昌 19 区是文昌组沉积中心之一,但在沉积期后发生构造反转,延迟了烃源岩进入生油门限,自渐新世进入成熟门限以来,现今仍处于油窗(图 2a),扩大了有效成油时限,有利于该构

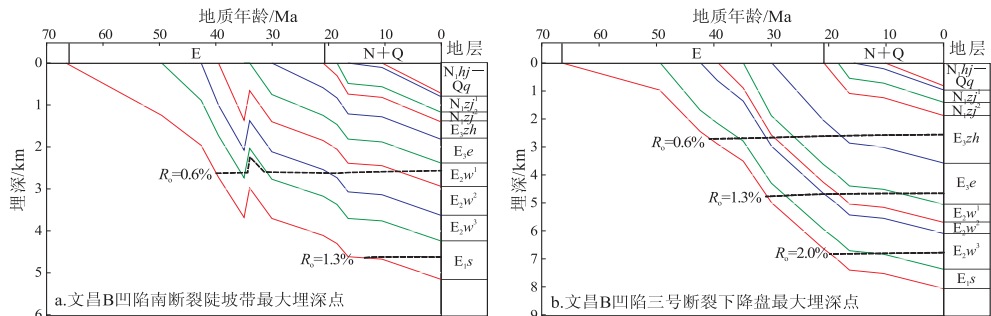


图 2 珠江口盆地西部文昌 B 凹陷文昌组烃源岩埋藏—成熟演化史

E_1s , 古新统神狐组; E_2w^3 , 始新统文昌组三段; E_3e , 下渐新统恩平组; E_3zh , 上渐新统珠海组; N_1zj^2 , 下中新统珠江组二段; N_1hj-Qq , 中中新统韩江组—第四系琼海组

Fig. 2 Burial and maturation histories of Wenchang Formation in Wenchang B Sag, western Pearl River Mouth Basin

造带纵向“多组合复式”成藏;三号断裂下降盘烃源岩在始新世晚期就已进入成熟阶段,较南断裂陡坡带早约5 Ma进入生油门限;现今是决定文昌组烃源岩最终成熟度的时期(图2b)。

2 油气地化特征及来源

文昌19-1油田原油以密度小于 0.85 g/cm^3 的轻一中质油为主,主要分布在南断裂下降盘,原油含蜡量总体较高,均值为18%;琼海凸起原油含蜡量则较低,均值为7.5%,为偏腐殖型烃源岩生成的产物。

文昌19-1油田区原油碳同位素有2种特征,一种是偏重,略大于 -25‰ ,为文昌组偏腐泥型中深湖相烃源岩的产物,如2,4,5井和N1井等,其分布时空较小,油藏主要呈近源分布;另一类全油碳同位素小于 -25‰ ,多分布在 $-27\text{‰}\sim-30\text{‰}$ 之间,为文昌组腐泥—腐殖型浅湖相烃源岩的产物,如1,6井,以及琼海凸起区的文昌13-1、文昌13-2、琼海18-1油田(图3),其分布时空较广,文昌B凹陷内及周边凸起等都有分布。很显然,本区文昌组存在中深湖相和浅湖相2类烃源岩,中深湖相优质烃源岩生成的油具有“近源、凹中分布”的特点;浅湖相烃源岩则是文昌B凹陷及周边凸起区成藏的主要贡献者,具有“长距离运移、凸起分布”的特

点,本区发现的油田多呈现此种特点,说明文昌组腐泥—腐殖型浅湖相烃源岩对本区实际成藏贡献更大,具有深远的勘探意义。

文昌19-1油田区天然气中非烃气体含量有高低,主要是与南断裂活动相关的幔源二氧化碳。粤海组气藏(埋深820 m)天然气甲烷含量为71.80%,干燥系数为0.97,为干气。甲烷碳同位素较轻, $\delta^{13}\text{C}_1$ 为 -55.10‰ ,天然气成熟度较低, $\delta^{13}\text{C}_2$ 值为 -24.6‰ ,二氧化碳碳同位素值为 -6.30‰ ,具有生物—热催化过渡带天然气特征^[12]。珠江组一段气藏(埋深1000~1300 m)天然气特征与粤海组气藏相似,均应来自浅层成熟度较低的含有机质泥岩。

3 油气成藏历程

“荧光定性分期、均一温度定量分期”的包裹体分析方法及地质分析方法均表明,文昌B凹陷及周边油气成藏具有多期特征,不同地区油气成藏具有时序性。

在文昌19-1油田发现2组可测温气液两相石油包裹体,存在2期油气充注。第一期以偏暗黄色荧光的石油包裹体为主,均一温度为 $61\sim 72\text{ °C}$,目前没有发现与石油包裹体共生关系很好的可测温的气液两相盐水包裹体,但在石英加大边中发现了一组 $100\sim 110\text{ °C}$ 的盐水包裹体,代表早期烃类运

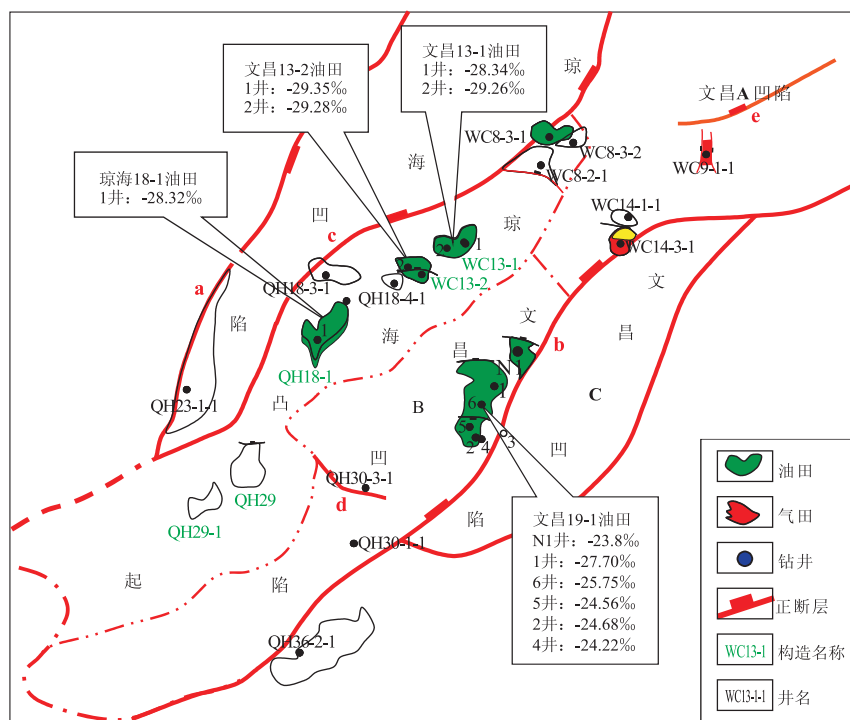


图3 珠江口盆地西部文昌B凹陷内及周边油田全油碳同位素分布

a. 西断裂; b. 南断裂; c. 二号断裂; d. 三号断裂; e. 六号断裂

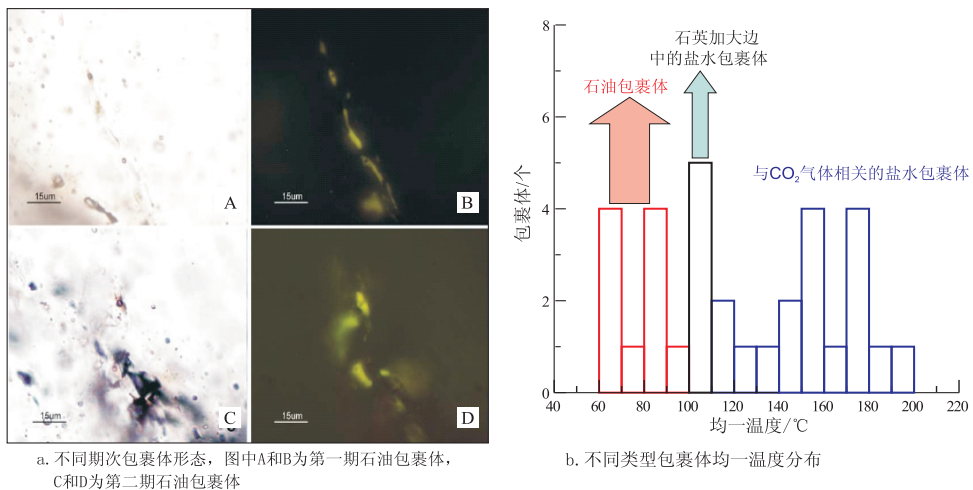


图 4 珠江口盆地西部 WC19-1-4 井储层包裹体形态及均一温度分布特征
文昌组, 2 278.5 m。

Fig. 4 Morphotypes and homogenization temperatures of fluid inclusions
from Wenchang Formation(2 278.5 m) in well WC19-1-4, western Pearl River Mouth Basin

移充注,发生于 16.5~5 Ma,反映了深部文昌组源岩中新世晚期正常成熟阶段生成的原油聚集;第二期主要以黄色荧光油包裹体为主,均一温度范围为 83~92 °C,发生于 5~0 Ma,代表晚期烃类运移充注,反映了文昌组源岩上新世以来高成熟阶段生成的原油聚集(图 4)。事实上,珠江组沉积期末(16.5 Ma)研究区以近南北向拉张应力为主,所产生的断裂沟通了深部文昌组烃源岩,能够将生成的石油运移至珠海组、珠江组,且此时珠海组二段、珠江组二段的上覆区域性或局部盖层已形成,油气成藏时空匹配条件良好,奠定了文昌 19-1 油田纵向“多组合复式”成藏的基础。

琼海凸起同样存在 2 期不同的储层包裹体,表明该区带存在 2 期油气充注。以西段琼海 18-1 油田、东段文昌 13-1 油田为例来分析,储层中以含烃盐水包裹体及固体沥青包裹体为主,可测温的气液两相烃类包裹体相对少见。早期含烃盐水包裹体在透光下为灰色,气泡壁较厚,蓝光激发下呈黄色—黄绿色,均一温度分布在 90~100 °C 左右,储层沥青、沥青包裹体多与含烃盐水包裹体共生,反映了中新世早期来自三号断裂下降盘文昌组生成的石油充注,但由于此时珠江组一段下部“龟背泥岩”尚未成为有效盖层,早期充注的油遭到破坏;晚期气液两相烃类包裹体在透光下为无色,蓝光激发下为黄色荧光,其均一温度分布在 100~110 °C 之间,代表了中新世中期以来的油气充注。

地质分析同样表明文昌 B 凹陷及周边不同区带在油气成藏时间上存在差异。在南断裂下降盘,由于文昌 19-1 油田区烃源岩沉积后发生构造反

转,自渐新世早期,油田区深部文昌组烃源岩开始成熟进入生排烃阶段,至现今,该区文昌组进入成熟—高成熟早期,仍处于油窗,文昌 19-1 构造经历了中中新世、上新世等多期、持续油充注与成藏,具有“延迟生排油、多期、持续油充注”的油气成藏过程。在三号断裂带下降盘,自始新世晚期以来,文昌组烃源岩开始成熟并向琼海凸起方向供烃,至中新世末期,该区文昌组烃源岩就已进入成熟—高成熟早期,具有“早期生排油、多期油气充注”的成藏过程。

4 油气成藏主控因素

4.1 烃源岩展布与成熟演化控制油气藏分布

文昌组烃源岩发育中心及其热演化控制了油气分布。南断裂下降盘是始新世文昌期古湖泊沉积中心,发育厚达 800 m 的中深湖相优质烃源岩,也是目前凹陷内复式油气聚集条件、油气发现和勘探效果最好的区带。文昌组烃源岩的成熟度控制了油气相态,受控于文昌组沉积期末的构造反转,南断裂带下降盘文昌 19 区文昌组烃源岩自早渐新世(30 Ma)进入成熟阶段,现今仍处于油窗,所发现油气藏相态也以原油为主,文昌 19-1 油田浅部粤海组、珠江组一段气藏为低成熟度的生物—热催化成因气。在珠江口盆地西部,只有在文昌 19-1 油田发现重碳同位素的原油,且与文昌组中深湖相烃源岩干酪根碳同位素相一致,同样呈现出烃源岩展布控制油气藏分布的特点;代表文昌 B 凹陷最大埋深部位的三号断裂带下降盘地区,其文昌组烃源岩自晚始新世(35 Ma)就已进入成熟阶段,到中

新世末(10.5 Ma)已处于高成熟的凝析油—湿气阶段,油气运移早,在琼海凸起发现的新近系珠江组油藏有中、重质油,并且发现储层沥青和沥青包裹体,这与新近系油藏有效盖层形成晚有关。

4.2 多储盖组合控制油气复式聚集

文昌B凹陷多幕构造旋回导致多期次断裂体系和多储盖组合发育,奠定了多油气成藏组合形成的地质基础。综合区域性储盖组合和油气分布特点^[13],可将文昌B凹陷及周边储盖岩系划归3个组合。

上部储盖组合以珠江组一段上部—韩江组浅海相泥岩为区域盖层,以珠江组一段下部滨海临滨砂、浅海滨外砂坝砂和珠江组二段滨海潮坪砂为主要储层,油气来自文昌A凹陷或B凹陷以始新统文昌组为主的湖相烃源岩^[14]。无论是琼海凸起还是文昌B凹陷,该组合的油气藏埋藏较浅,为1 200~1 700 m,油质较好,圈闭类型好,以背斜或断背斜油藏为主,珠江组一段还发育构造—岩性低阻油藏。该组合在各构造带油气富集程度有别,表现在纵向上发育数量及储量规模不等的主力油气藏,如琼海凸起文昌13-1、文昌13-2油田纵向上主力油气藏最多、储量规模大、油气最富集。

中部储盖组合以珠海组一段海侵泥岩为区域盖层,以珠海组二段三角洲或扇三角洲砂岩为主要储层,油气主要来自深部以文昌组湖相泥岩、页岩为主的烃源岩层系。该组合分布于文昌B凹陷,主要发育与断裂带有成生关系的断块构造型油气藏,有效圈闭是油气聚集规模的主控因素。文昌B凹陷珠海组油藏埋藏相对较浅(1 600~2 400 m),储层物性好,如南断裂带文昌19-1油田等。

下部储盖组合分布在古近系文昌组、恩平组,它们是断陷湖盆烃源岩发育的层系,是“自生自储自盖”源内成藏的主要层系。该组合储层为文昌B凹陷陡坡带扇三角洲和前缘浊积砂以及缓坡带三角洲和滩坝砂,埋藏较深(3 000~4 000 m),目前发现的含油构造储层呈现低渗特征,以断块油藏为主。文昌B凹陷深洼区、北部沉积斜坡带是发现该组合油气藏的潜在勘探领域。

总之,在文昌B凹陷及周边,珠海组一段、珠江组一段上部—韩江组两大区域盖层控制了油气的分布,油气藏具有“平面分区带、纵向分组合”的显著特点。

4.3 构造运动形成圈闭与通源断裂

珠海期—珠江组沉积期末,受近南北向拉张构造应力作用,文昌B凹陷南断裂陡坡带发育近东

西向断裂体系。一方面断裂控制断块圈闭的形成,另一方面断裂沟通了深、浅部地层,形成深部文昌组烃源岩和珠海组、珠江组储层间流体势差,使得文昌组烃源岩生成的油气能够沿断裂向上垂向运移进入浅部的储层。如文昌19-1油田北部雁列式断裂带,断裂切穿深部文昌组烃源岩,并持续活动至韩江期末(10.5 Ma),充当了油气垂向运移通道。断裂活动期与本地区晚中新世、上新世2期油气充注、成藏期相匹配。同时,油气沿断裂向上垂向运移进入浅部的珠江组海相储层后,也能在区域性盖层之下沿高孔渗砂岩侧向长距离运移至琼海凸起披覆背斜聚集。

5 有利勘探领域和方向

文昌B凹陷及周边油气成藏条件和勘探开发实践证明,该区油气资源潜力大,具备形成大中型油气田的物质基础。根据油气成藏特征与成藏主控因素、海上勘探技术条件等综合分析,当前主要勘探领域和方向有:1)文昌B凹陷南断裂陡坡带断块油气藏。按照反转陡坡带“延迟生排油、垂向运聚、复式成藏”的理论认识,利用三维地震加强南断裂带珠江组、珠海组、恩平组或文昌组复杂断块构造描述和储层预测,近期在文昌19区、文昌14区针对珠海组、珠江组实施预探井钻探;2)琼海凸起低幅度背斜油藏及其相关次生低阻油藏。按照“油气长距离侧向运移、背斜聚集”的成藏理论认识,进一步加强琼海凸起区2个成生关系的认识,一个是优势油气运移聚集方向与油藏的成生关系;另一个是珠江组披覆背斜油藏与上覆低阻油藏的成生关系,利用高分辨率三维地震准确描述低幅度背斜、低阻油藏浅海滩坝储层分布,重视文昌A、B凹陷文昌组浅湖相优质烃源岩生排烃模式及生烃潜力分析,近期在琼海凸起东缘解剖勘探;3)文昌B凹陷北斜坡带古近系地层—岩性型隐蔽油气藏。该区带为继承性沉积斜坡,文昌组—珠海组沉积期发育缓坡三角洲前缘浊积砂、湖相滩坝砂岩等,发育区域性展布的文昌组二段、恩平组一段湖侵泥岩和珠海组一段海侵泥岩,且该区带处于油气运移必经之路,尤其是浅湖相优质烃源岩发育,近期展开综合研究,有望取得较大突破。

上述研究成果较好地指导了近期勘探实践,新发现了南断裂带下降盘N构造、琼海凸起东缘L1、L2构造等3个整装规模储量的商业性油田和一批含油气构造。在文昌N断背斜构造古近系珠海组获得了高产轻质原油,证实了自1984年发现

文昌 19-1 油田以来,南断裂反转陡坡带仍蕴藏着良好的勘探潜力。在琼海凸起东缘文昌 L1,L2 披覆背斜构造新近系珠江组一段低阻油层获得了较高产轻质原油,证实了琼海凸起珠江组新类型油藏具有良好的勘探前景,勘探效益显著。

6 结论

1)文昌 B 凹陷中深湖相优质烃源岩生成的原油具有“近源、凹中分布”的特点;浅湖相源岩是另一种重要的优质烃源岩,是文昌 B 凹陷中及周边凸起区成油的主要贡献者,其生成的原油具有“长距离运移、凸起分布”的特点。2 种优质烃源岩及其成油分布规律大大拓展了珠江口盆地西部油气勘探空间。

2)文昌 B 凹陷南断裂带下降盘文昌组湖相烃源岩沉积期末经历构造反转抬升,具有“延迟生排油、多期持续油充注”的成藏过程,现今仍处于生油窗,优于文昌 A 凹陷南断裂带成藏条件;三号断裂带下降盘具有“早期生排油、多期油气充注”的成藏过程。

3)良好的文昌组湖相烃源岩与构造反转控制下的特殊埋藏及成熟演化史、多幕式断裂活动、多套区域性优质储盖组合是复式油气成藏主控因素,文昌 B 凹陷反转陡坡带、琼海凸起珠江组一段上部、北斜坡中深层古近系隐蔽油气藏是有利原油勘探方向,近期前 2 个区带勘探获得了新突破,取得了良好的勘探效益。

致谢:中国海洋石油总公司湛江分公司研究院甘军高级工程师、黄保家高级工程师、谢瑞永工程师、中国科学院广州地球化学研究所田辉副教授等也参加了研究工作,在此深表谢意!

参考文献:

[1] 朱伟林,黎明碧,吴培康. 珠江口盆地珠三拗陷石油体系[J]. 石油勘探与开发,1997,24(6):21-23.

[2] 朱伟林,黎明碧,段佩潜,等. 珠江口盆地珠三拗陷古湖泊与油气[J]. 中国海上油气,1997,11(4):14-18.

[3] 邹雯雯,郭乃燕. 珠江口盆地珠三拗陷有机包裹体初步研究[J]. 中国海上油气,1997,11(4):233-239.

[4] 徐思煌,朱义清. 烃源岩有机碳含量的测井响应特征与定量预测模型:以珠江口盆地文昌组烃源岩为例[J]. 石油实验地质,2010,32(3):290-295.

[5] 于水明,施和生,梅廉夫,等. 过渡动力学背景下的张扭性断陷:以珠江口盆地惠州凹陷古近纪断陷为例[J]. 石油实验地质,2009,31(5):485-489.

[6] 王春修,张群英. 珠三拗陷典型油气藏及成藏条件分析[J]. 中国海上油气,1999,13(4):248-254.

[7] Zhou Wenwen, Jiang Wenrong, Li Rongxi. Organic inclusion and its application on petroleum system in Zhu III Depression, Pearl River Mouth Basin[J]. Petroleum Exploration and Development, 2004, 31(2):128-134.

[8] 姜华,王华,肖军,等. 珠江口盆地珠三拗陷构造反转与油气聚集[J]. 石油学报,2008,29(3):372-377.

[9] 朱俊章,施和生,舒誉,等. 珠江口盆地烃源岩有机显微组分特征与生烃潜力分析[J]. 石油实验地质,2007,29(3):301-306.

[10] 欧阳健,龚再升. 中国油气勘探(第四卷 近海油气区)[M]. 北京:地质出版社,1999:1088-1163.

[11] 龚再升. 中国近海大油气田[M]. 北京:石油工业出版社,1997:7-67.

[12] 徐永昌,王志勇,王晓锋,等. 低熟气及我国典型低熟气田[J]. 中国科学(D辑:地球科学),2008,38(1):87-93.

[13] 张迎朝,甘军,邓勇,等. 珠江口盆地西部文昌 B 凹陷及周边油气成藏组合[J]. 中国海上油气,2009,21(5):303-307.

[14] 徐新德,黄保家,李里,等. 珠三拗陷琼海凸起油气运聚研究[J]. 石油勘探与开发,2000,27(4):41-44.

(编辑 韩 或)



(上接第 296 页)

[38] Frenzel M. Persistence, bioremediation and fate of unresolved complex mixtures (UCMs) of hydrocarbons in the environment[D]. Exeter, UK: University of Exeter, 2008.

[39] Smith E, Wraige E, Rowland S, et al. Hydrocarbon humps in the marine environment: synthesis, toxicity, and aqueous solubility of monoaromatic compounds [J]. Environmental Toxicology and Chemistry, 2001, 20 (11): 2428-2432.

[40] Scarlett A, Galloway T S, Rowland S J. Chronic toxicity of unresolved complex mixtures (UCM) of hydrocarbons in marine sediments [J]. Journal of Soils and Sediments, 2007, 7(4):200-206.

[41] Frenzel M, James P, Burton S K, et al. Towards bioreme-

diation of toxic unresolved complex mixtures of hydrocarbons; identification of bacteria capable of rapid degradation of alkyltetralins [J]. Journal of Soils and Sediments, 2009, 9(2):129-136.

[42] Ventura G T, Simoneit B T, Nelson R K. Resolving the origin of unresolved complex mixtures in hydrothermal petroleum: novel methods for comprehensive two-dimensional gas chromatography [C]// 24th International Meeting on Organic Geochemistry, Bremen, 2009:316.

[43] Reddy C M, Eglinton T I, Hounshell A, et al. The west Falmouth oil spill after thirty years: the persistence of petroleum hydrocarbons in marsh sediments [J]. Environment Science and Technology, 2002, 36(2):4754-4760.

(编辑 黄 娟)