

埃及西沙漠盆地中生界烃源岩特征及剩余资源分布

杨晓兰

(中国石化 国际石油勘探开发有限公司,北京 100029)

摘要:西沙漠盆地是埃及三大主要含油气区之一,已发现大量的油气田,现处勘探发现中期,预探风险增大。为此,在详细评价盆地烃源岩地球化学特征基础上,运用盆地数值模拟技术定量分析剩余资源潜力。研究认为,中侏罗统 Khatatba 组 Safa 段和 Zahra 段煤系暗色泥页岩以及上白垩统 Abu Roash 组 AR-F 段暗色泥页岩是盆地的 3 套主力烃源岩,各凹陷烃源岩广泛分布,厚度变化较大。Khatatba 组烃源岩 TOC 含量在 0.5%~10%,裂解烃 S_2 含量高,为中等-很好烃源岩;Abu Roash 组 AR-F 段烃源岩 TOC 主要在 0.5%~3%,裂解烃 S_2 含量中-高,属中等-好烃源岩。这 3 套烃源岩有机质干酪根类型以混合 II 型为主,其次是 III 型,少量为 I 型。指出 Khatatba 组 2 套烃源岩全盆处于热演化成熟大量生排烃阶段,凹陷中心达高熟生烃、局部过熟生气阶段,油气共生;Abu Roash 组 AR-F 段烃源岩仅 Abu Gharadig 和 Natrun 凹陷进入成熟生烃阶段。提出盆地北部地区主要由侏罗系 Khatatba 组烃源岩供给油气,东南部地区则有侏罗系 Khatatba 组和白垩系 AR-F 段双源供烃。计算表明,盆地剩余可采资源量达 6.51×10^8 t,剩余资源潜力很好;其中,南部 Abu Gharadig 凹陷古生界、侏罗系和下白垩统 AEB,北部 Matruh 凹陷古生界、Faghur 凹陷上白垩统,油气探明程度低,剩余资源可观,为下步勘探的有利方向。

关键词:数值模拟;剩余资源;潜力方向;烃源岩评价;西沙漠盆地;埃及

中图分类号:TE122.1

文献标识码:A

Geochemical characteristics of the Mesozoic source rocks and the remaining resources in the Western Desert Basin, Egypt

Yang Xiaolan

(International Petroleum Exploration and Production Corporation, SINOPEC, Beijing 100029, China)

Abstract: The West Desert Basin is one of the three major hydrocarbon-bearing areas in Egypt, with a large number of oil and gas fields discovered therein. At the middle stage of exploration and discovery now, the risk of preliminary prospecting increases. The study focuses on the quantitative analysis of remaining resource potential by basin numerical simulation technology following the detailed evaluation of geochemical characteristics of the source rocks. The results show that the dark shale of coal measures in the Safa and Zahra members of the Middle Jurassic Khatatba Fm and that of the AR-F member in the Upper Cretaceous Abu Roash Fm are the three sets of major source rocks in the basin; and the source rocks are widely distributed in each depression with the thickness varying greatly. The source rocks in the Khatatba Fm have a TOC content ranging from 0.5% to 10% and a high content of cracked hydrocarbon S_2 , thus are fair-to-very good source rocks. While the AR-F source rocks in the Abu Roash Fm have a TOC content varying between 0.5% and 3% and a moderate-to-high content of cracked hydrocarbon S_2 , thus belong to fair-to-good source rocks. The kerogen of these source rocks is dominated by mixed Type II, followed by Type III and minor Type I. It is pointed out that the two sets of source rocks in the Khatatba Fm within the whole basin are at the thermal evolution stage of hydrocarbon generation and expulsion in a large amount; that in the center of the depression reaches high mature stage and even over mature stage locally, with oil and gas co-generated. As for the AR-F section of the Abu Roash Fm, only the source rocks in Abu Gharadig and Natrun Sags enter the mature stage of hydrocarbon generation. It is suggested that the hydrocarbons in the northern part of the basin are mainly contributed by the source rocks of the Jurassic Khatatba Fm, while those in the southeastern part are supplied by source rocks in both the Jurassic Khatatba Fm and the Cretaceous AR-F section. The calculation

收稿日期:2019-08-05;修订日期:2020-01-28。

作者简介:杨晓兰(1973—),女,博士,高级工程师,油气田勘探与评价。E-mail: xiaolanyang.sipc@sinopec.com。

基金项目:中国石油化工集团项目(P16001);国家自然科学基金项目(41372144)。

shows that the remaining volume of recoverable resources in the basin reaches up to $6.51 \times 108t$, indicating huge resource potential. The Paleozoic, Jurassic and Lower Cretaceous AEB in the Abu Gharadig Sag in the south, and the Paleozoic in the Matruh Sag and the Upper Cretaceous in the Faghur Sag in the north, are low in exploration maturity and high in remaining resource potential, thus being favorable targets for future exploration.

Key words: numerical simulation, remaining resource, potential exploration target, evaluation of source rocks, Western Desert Basin, Egypt

西沙漠盆地位于埃及西部沙漠地区,是埃及三大主要含油气区之一。至2017年底,一共发现了363个油气田,探明石油可采储量 $3.46 \times 10^8 t$,探明天然气可采储量 $4.2 \times 10^8 m^3$ ^[1-3],现处于油气勘探发现中期阶段,预探成功率降低、风险增大。基于此,本文对盆地主要烃源岩开展地球化学特征进行详细研究,并运用盆地数值模拟技术定量计算剩余资源量,明确了剩余资源潜力,指出了剩余资源分布特点及勘探方向,为该区域持续勘探提供依据。

1 区域地质背景

埃及西沙漠盆地位于非洲板块的东北部,是一个在新元古界刚性基底之上发育起来的古-中-新生代多旋回的叠合盆地,面积约 $106\ 500\ km^2$ (图1)。盆地经历了古生代克拉通稳定地台、中生代裂谷和新生代碳酸盐岩台地3期构造演化阶段。其中,古生代克拉通地台地层较薄,仅盆地西部可能残留下志留统的热页岩烃源岩,古生代砂岩储层发育广泛,为重要的油气

储集层系;中生代裂谷包括2期裂陷和1期裂后沉降建造,主要发育海陆交互相及河流相沉积,建设了3套富有机质的烃源岩,成为盆地的主力烃灶;新生代盆地发育有巨厚的碳酸盐岩区域盖层。由此构成了纵向上多层系、多套的含油气生储盖组合(图2),中生界既是主供烃源,也是油气成藏的富集层系,成为目前勘探开发的主要目的层系^[2-5]。从中生界构造看,盆地呈现坳隆相间构造格局,分8个凹陷、3个隆起和1个台地。目前,油气田主要发现于Faghur, Shushan, Matruh, Alamein和Abu Gharadig等凹陷、凸起的古生代、侏罗系和白垩系多套层系。

该盆地中生代地层最为发育,自下至上分别为下侏罗统Ras Qattara组陆相碎屑岩、碳酸盐岩,中侏罗统Khatatba组浅海相-海陆过渡相碎屑岩、碳酸盐岩,上侏罗统Masajid组开阔大陆架环境沉积含页岩夹层的块状灰岩;下白垩统Alam El Bueb组(简称AEB组)浅海-三角洲相碎屑岩、Alamein组海相白云岩、Dahab组海相页岩和Kharita组浅海-斜坡相碎屑岩,上白垩统Bahariya组开阔海相碎屑岩、Abu Roash组海陆过渡

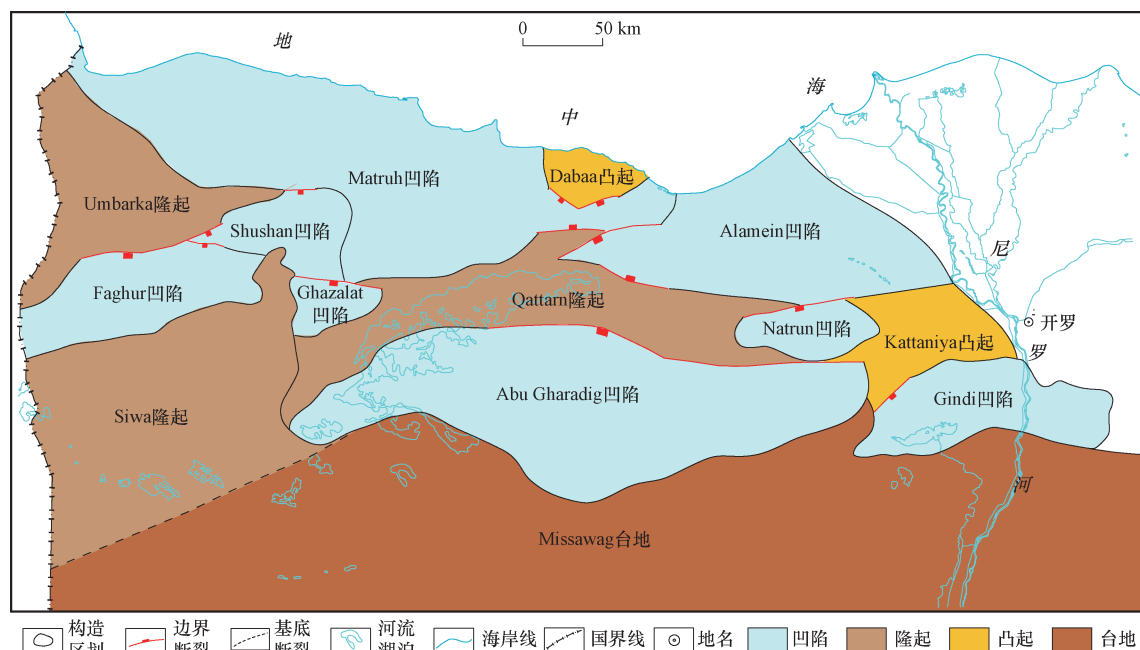


图1 埃及西沙漠盆地构造单元

Fig. 1 Tectonic units of the Western Desert Basin, Egypt

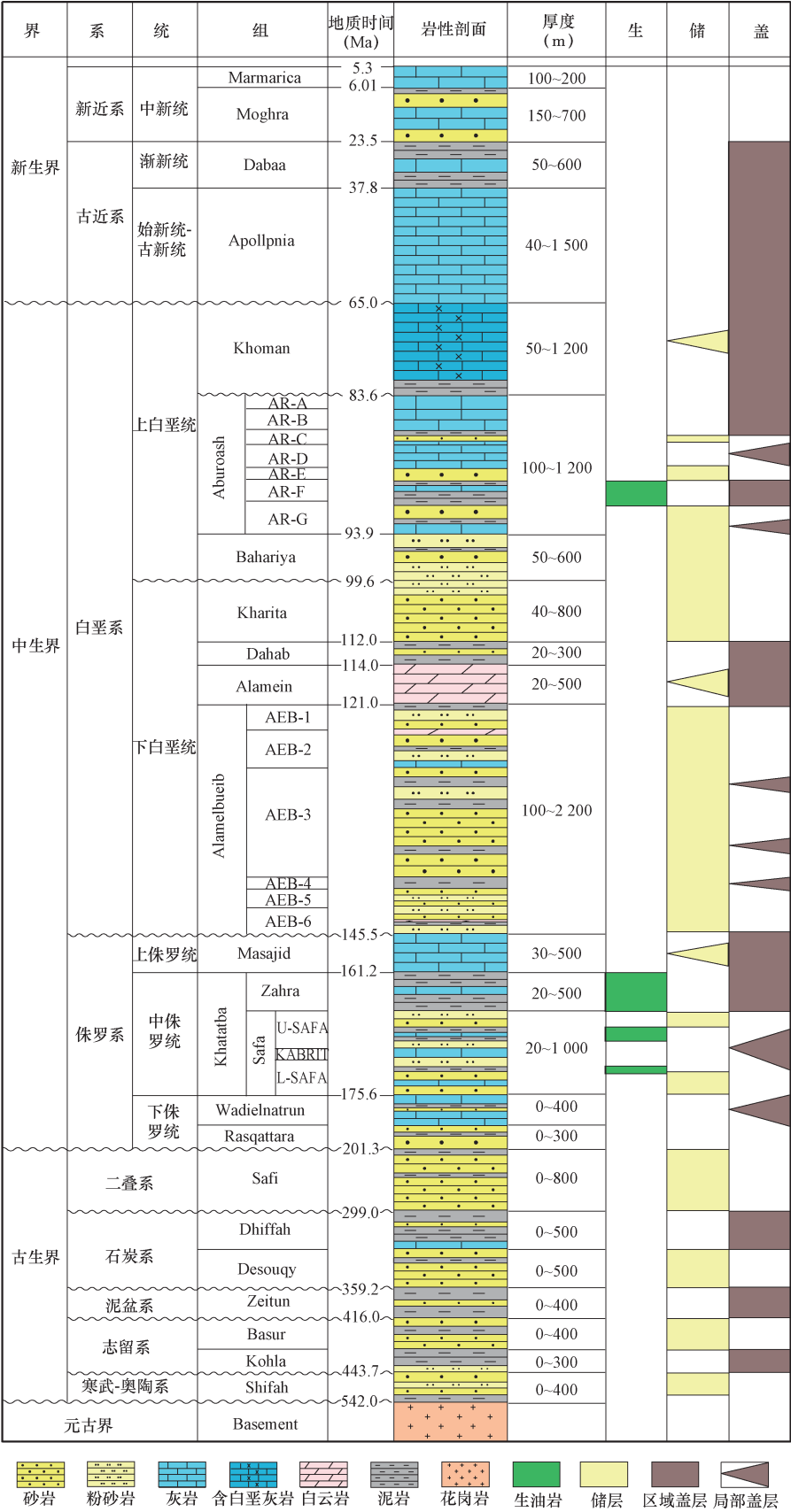


Fig. 2 Histogram showing the source-reservoir-caprock assemblage in the Western Desert Basin, Egypt

相沉积(岩性包括灰岩、白云岩、砂岩和页岩)及 Khoman 组含白垩灰岩沉积(图2)。

中生界建造了多套良好的烃源岩,包括侏罗系 Khatatba 组、白垩系 AEB 组、Bahariya 组、Abu Roash 组。其中,中侏罗统 Khatatba 组 Safa 段、Zahra 段泥岩、页岩,以及上白垩统 Abu Roash 组的泥岩、页岩,是油源对比证实的3套主力烃源岩。

2 烃源岩宏观特征

2.1 侏罗系烃源岩展布特征

侏罗纪,西沙漠盆地处于早期裂陷阶段,在中侏罗世广泛建设了 Khatatba 组海相陆棚、三角洲沉积,包括

Safa 段和 Zahra 段^[4-5]。其中,Safa 段岩性主要是富有机质的暗色页岩、泥岩及煤层;Zahra 段岩性主要为富有机质的暗色页岩、泥岩及薄煤层。钻震资料和地化数据反映,这2套烃源岩除 Umbarka, Siwa, Qattara 隆起和南部 Gindi 凹陷缺失外,广泛分布于其他7个凹陷和2个凸起上。Zahra 段烃源岩厚度一般在30~200 m,平面上各凹陷厚度有较大差异,次凹沉降中心厚度大,向周缘厚度逐渐减薄;北部各凹陷区烃源岩总体厚度比南部凹陷区的略大,在 Matruh 与 Alamein 凹陷之间、Abu Gharadig 凹陷东部沉降中心,烃源岩最大厚度超过300 m(图3a)。Safa 段烃源岩厚度一般在10~450 m,其平面分布范围、横向厚度变化特征与 Zahra 段的相似。

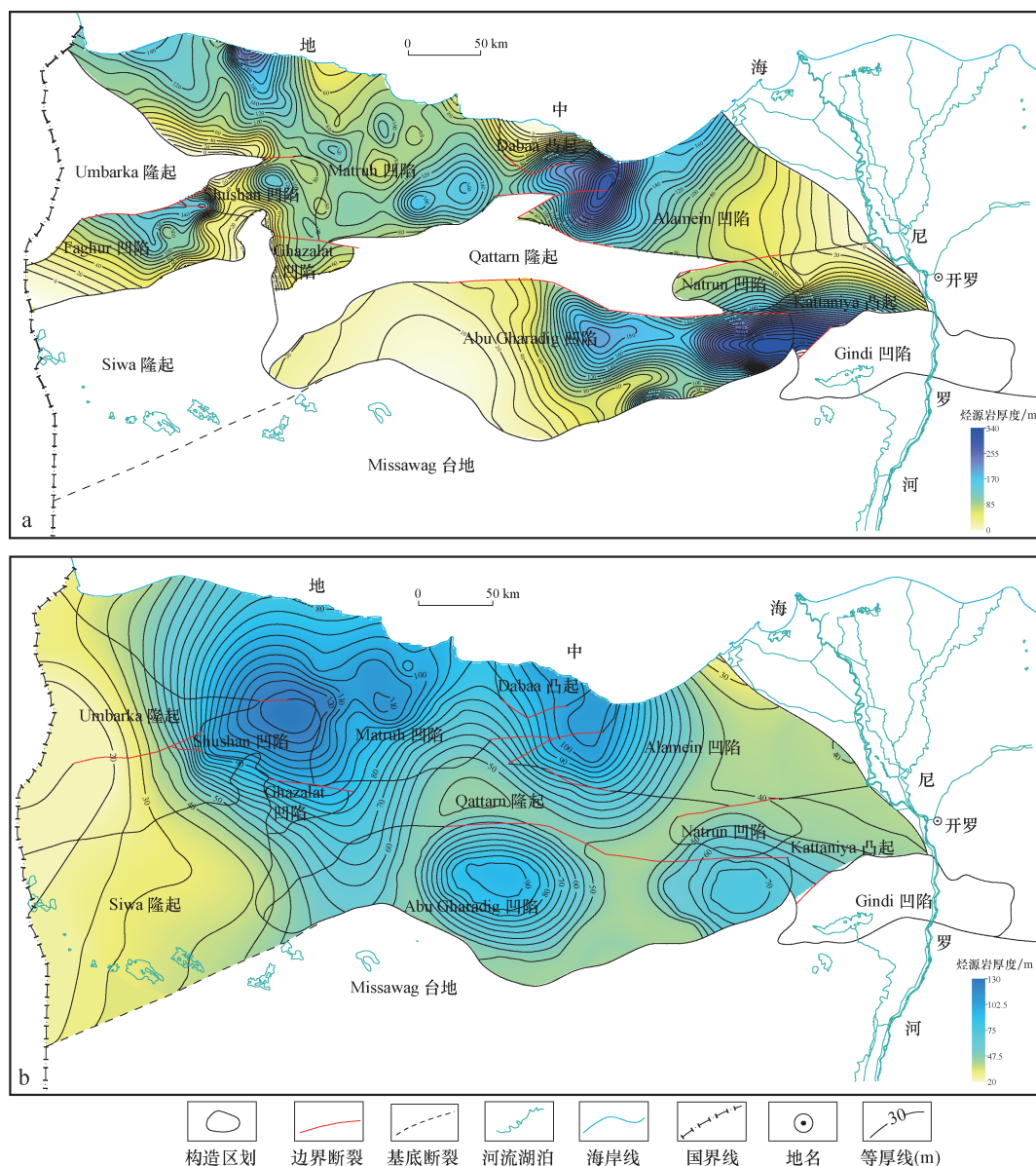


图3 埃及西沙漠盆地侏罗系 Zahra 段(a)和白垩系 AR-F 段(b)烃源岩厚度

Fig. 3 Isopach of source rocks in the Jurassic Zahra(a) and Cretaceous AR-F(b) members in the Western Desert Basin, Egypt

2.2 白垩系烃源岩展布特征

晚白垩世,西沙漠盆地处于裂后演化阶段,各凹陷、凸起、隆起构造单元形成统一连片的沉积区域,广泛接受沉积建设;其中,沉积了一套厚度可达1 200 m的Abu Roash组海陆过渡相地层,其AR-F段岩性主要为暗色泥岩、页岩烃源岩,富含有机质为烃源岩。钻井、地震和地化资料反映,本套烃源岩在凹陷和隆起构造单元上广泛分布,厚度一般在30~100 m;平面上,北部Shushan, Matruh, Alamein凹陷和南部Abu Ghara-dig凹陷共存在4个面积大小不等的烃源岩厚度中心,向周缘厚度逐渐减薄,北部各凹陷烃源岩总体厚度略大于南部凹陷的,Shushan凹陷和Matruh凹陷烃源岩厚度最大,最厚达130 m以上(图3b)。

3 烃源岩地化特征

3.1 有机质丰度

有机碳含量(TOC)、氯仿沥青“A”含量和生烃潜量($S_1 + S_2$)是评价有机质丰度和烃源岩质量的主要参数。收集了本区烃源岩大量的 TOC 和热解的裂解烃 S_2 地化数据,依据这2组参数分析烃源岩品质。统计表明,中侏罗统Khatatba组烃源岩 TOC 主要分布在0.5%~10%(图4a),总体含量较高。按层位看,Safa段烃源岩 TOC 含量主要分布在0.5%~10%,含量高于2%的样品占较大比例(图4a),含少量煤的 TOC 大于30%,反映该套为很富有机质的烃源岩;Zahra段烃源岩 TOC 含量大多在0.5%~5%,高 TOC 的样品数

量相对较少,含极少量煤的 TOC 大于30%。上白垩统Abu Roash组AR-F段烃源岩 TOC 主要分布于0.5%~3%(图4b),含量明显低于中侏罗统的烃源岩。

从生烃潜量的 S_2 含量分析,其值从0.1~200 mg/g,变化区间很大。其中,Khatatba组Safa段、Zahra段烃源岩的 S_2 主要分布在1~100 mg/g左右,上白垩统Abu Roash组AR-F段烃源岩的 S_2 主要分布于0.5~20 mg/g;各段 S_2 数值高低和分布变化与其 TOC 的变化规律是一致的。从图5的烃源岩 TOC 与 S_2 关系看,两者呈正相关关系,即烃源岩 TOC 高值,其生烃势相应也高值,反映高 TOC 即为高有机质丰度品质的烃源岩。

参照国内外海陆相烃源岩有机质丰度评价指标^[6-7],结合本区实际情况,建立了以 TOC 和 S_2 参数为指标的烃源岩有机质丰度划分方案,将中生界烃源岩划分为差、中等、好、很好4个等级。可见,Khatatba组Safa段主要为富含有机质的中等-很好烃源岩,是区内品质最好的一套烃源岩;Zahra段为较富有机质的中等-很好烃源岩,为区内品质次好的一套烃源岩;Abu Roash组AR-F段主要为较富有机质的中等-好烃源岩,其品质逊色于前两套。与此同时,地化资料也反映,各套烃源岩有机质丰度都存在相当的非均质性。据报道,有机质 TOC 含量小于2%的被称为普通烃源岩、高于2%的称优质烃源岩^[8],优质烃源岩富含有机质,其生排烃量和效率明显高于普通烃源岩的^[8-10];国内外发现大规模油气田的海陆相盆地皆有这样的物质基础共性点^[11-14],包括非常规油气^[15-16]。对比表明,西沙漠盆地Khatatba组烃源岩质量主要属优质的类型,故成为该区富油气的重要烃源动力。

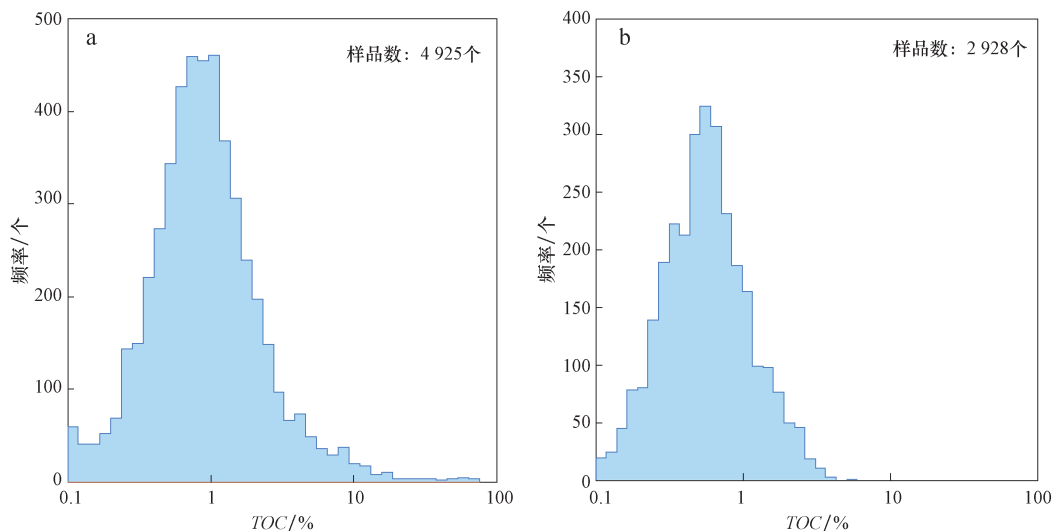


图4 埃及西沙漠盆地Khatatba组(a)和Abu Roash组(b)烃源岩 TOC 频率直方图

Fig.4 TOC frequency histogram of the source rocks in the Khatatba(a) and Abu Roash(b) Formations of the Western Desert Basin, Egypt

3.2 有机质类型

有机质类型是衡量烃源岩有机质质量的指标,它决定了烃源岩中有机质的生烃潜量和所生烃的性质(油或气),并直接影响着一个沉积盆地的含油气远景。本文利用岩石热解的轻指数(I_H)与氧指数(I_O)指标判断烃源岩有机质类型(图6)。从 I_H-I_O 关系图可知,中侏罗统 Khatatba 组烃源岩有机质类型以偏腐殖 II₂ 型为主,其次有腐殖 III 型和偏腐殖 II₁ 型,含少量腐泥 I 型,具有既可生油、也可生气的物质基础。其中,Safa 段以偏

腐殖 II₂ 型为主,其次为偏腐殖 II₁ 型和腐殖 III 型,少量腐泥 I 型;Zahra 段以偏腐殖 II₂ 型和腐殖 III 型为主,含少量偏腐殖 II₁ 型。上白垩统 Abu Roash 组 AR-F 段烃源岩有机质类型以偏腐殖 II₁ 和偏腐殖 II₂ 型为主,有部分腐泥 I 型和腐殖 III 型,具备油气兼生的物质条件。

3.3 有机质成熟度

烃源岩成熟度代表有机质向油气转化的热演化程度,决定了有机质生成油气的数量和资源潜力,包含两层含义:一是烃源岩的原始有机质随热演化发生生烃

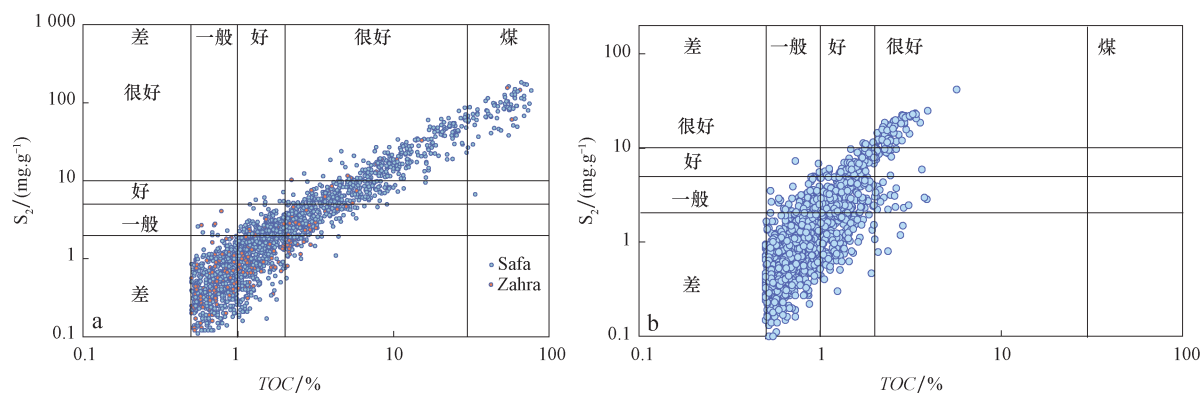


图5 埃及西沙漠盆地侏罗系 Khatatba 组(a)和白垩系 Abu Roash 组(b)烃源岩 TOC-S₂ 关系

Fig.5 TOC-S₂ relation diagram of the source rocks in the Jurassic Khatatba Fm(a) and Cretaceous Abu Roash Fm(b) in the Western Desert Basin, Egypt

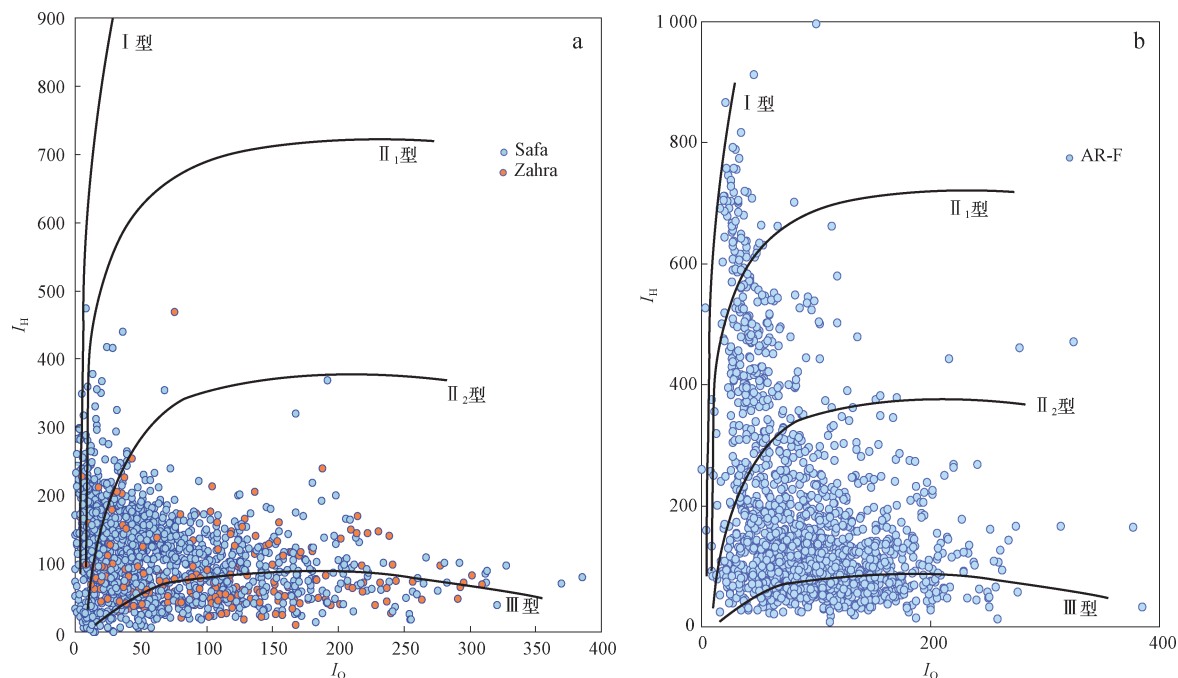


图6 埃及西沙漠盆地 Khatatba 组(a)和 Abu Roash 组(b)烃源岩 I_H-I_O 关系

Fig.6 I_H-I_O relation diagram of the source rocks in the Khatatba Fm(a) and Abu Roash Fm(b) in the Western Desert Basin, Egypt

与排烃作用;二是其中的剩余可溶有机组分又会随不断埋深而继续参与下一阶段的热演化过程。这是烃源岩一种热演化的连续动态复杂过程,有机质成熟度进入热演化干酪根降解生排烃门限是烃源岩发挥效能作用的必要前提^[18-21]。

根据研究区大量岩心的镜质体反射率(R_o)和最高热解峰温(T_{max})资料,侏罗系 Khatatba 组烃源岩 R_o 值基本大于 0.5%,进入热演化干酪根生烃阶段;大部分样品 R_o 值在 0.7%~1.3%,达到良好的成熟生油阶段;部分样品 R_o 值在 1.3%~1.8%,达到高熟的生湿气阶段。数据表明,Khatatba 组烃源岩 T_{max} 值均大于 435℃,其中 90%以上样品的 T_{max} 值在 445~480℃,达到成熟-高成熟生烃阶段^[22]。

上述烃源岩 R_o 和 T_{max} 测试数据反映的有机质热演化成熟度完全一致,说明本区供烃灶成熟度可靠,表征成熟度的分析资料有规律可循;据此,可以利用 R_o 与深度关系来确定本区烃源岩的不同成熟度阶段的生烃门限(图 7)。如图 7 所示,总体上 Khatatba 组烃源

岩埋深约 1 280~1 800 m,其 R_o 值达到 0.5%,进入了有机质差熟开始生烃阶段;埋深 2 350~3 080 m,其 R_o 值达到了 0.7%,进入了有机质良好成熟大量生排烃阶段;埋深处于 4 260~5 050 m,其 R_o 值达到 1.3%时,进入有机质高成熟大量生湿气阶段。同时看出,因不同凹陷的低温梯度、盖层发育状况等差异,其烃源岩生油气门限有所不同。其中,Matruh 凹陷 Khatatba 组烃源岩成熟生烃门限最浅,其次为 Shushan 凹陷的;Faghur 凹陷该套烃源岩起始生烃较 Ghazalat 凹陷的深,后期成熟和高成熟大量生排烃门限则浅于后者。

同样方法,确定了上白垩统 Abu Roash 组 AR-F 段烃源岩的生排烃门限。在此基础上,根据西沙漠盆地各凹陷不同层位的实测地层温度梯度数据(表 1),建立各凹陷的热史模型,并结合研究区的构造-沉积埋藏史,运用 PetroMod 含油气系统模拟软件对盆地热史进行模拟^[23-29]。模拟结果反映,各凹陷主要生烃期的有机质热演化程度与烃源岩 R_o 和 T_{max} 反映的成熟度一致,与 R_o 控制点的生排烃门限吻合。

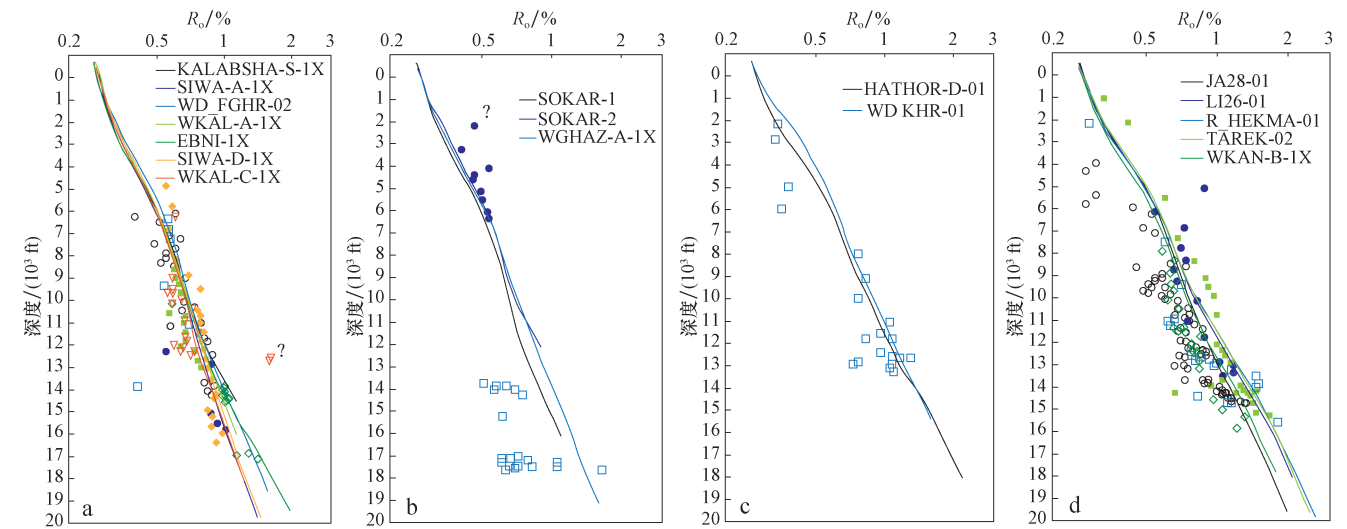


图 7 埃及西沙漠盆地各凹陷侏罗系 Khatatba 组烃源岩 R_o 与深度关系

Fig. 7 Relationship between R_o and depth of the Jurassic Khatatba Fm source rocks in different depressions of the Western Desert Basin, Egypt
a. Faghur 凹陷; b. Ghazalat 凹陷; c. Shushan 凹陷; d. Matruh 凹陷

表 1 埃及西沙漠盆地各凹陷不同层位实测地温梯度(℃/km)数据统计

Table 1 The measured geothermal gradients(℃/km) of different layers in different depressions of the Western Desert Basin									
地层	Faghur 凹陷		Ghazalat 凹陷		Shushan 凹陷		Matruh 凹陷		
	范围	平均	范围	平均	范围	平均	范围	平均	
新生界	24.9 ~ 32.8	28.9	24.1 ~ 29.5	26.8	33.9 ~ 34.4	34.2	31.5 ~ 32.8	32.2	
中生界	上白垩统	29.3 ~ 39.4	34.4	29.0 ~ 32.8	30.9	35.0 ~ 39.4	37.2	36.6 ~ 41.5	39.1
	下白垩统	23.0 ~ 28.9	26.0	24.1 ~ 27.1	25.6	30.3 ~ 34.3	32.3	31.3 ~ 35.3	33.3
	侏罗系	23.0 ~ 29.1	26.1	24.9 ~ 26.7	25.8	29.8 ~ 30.0	29.9	30.8 ~ 31.4	31.1
古生界	24.0 ~ 28.6	26.3	24.2 ~ 24.8	24.5	29.1 ~ 29.5	29.3	30.9 ~ 31.2	31.1	

譬如,中侏罗统 Khatatba 组 Zahra 段烃源岩,除 Faghur 凹陷西部、Abu Gharadig 凹陷南部小范围的烃源岩成熟度处于 R_o 值 $0.5\% \sim 0.7\%$ 外,全盆地其他地区本套优质烃源岩 R_o 全部达到大于 0.7% 的良好成熟生排烃状况(图 8a); Shushan, Matruh, Alamein, Abu Gharadig 凹陷中心部位 R_o 值超过 1.3% , 进入高成熟生湿气阶段。位于中侏罗统 Zahra 段下伏的 Safa 段烃源岩则全部进入 R_o 值大于 0.7% 的成熟-高成熟生排烃阶段,有机质成熟度更佳。上白垩统 Abu Roash

组 AR-F 段烃源岩成熟度偏低,其 R_o 值达到达到 0.7% 以上的,仅 Abu Gharadig 凹陷、Natrun 凹陷主体区,以 Abu Gharadig 凹陷中心成熟较好(图 8b)。

4 剩余资源潜力

4.1 剩余资源量分布

在上述研究基础上,运用不同方法计算了西沙漠盆地的资源量和剩余资源量。其中,按盆模法、有机碳

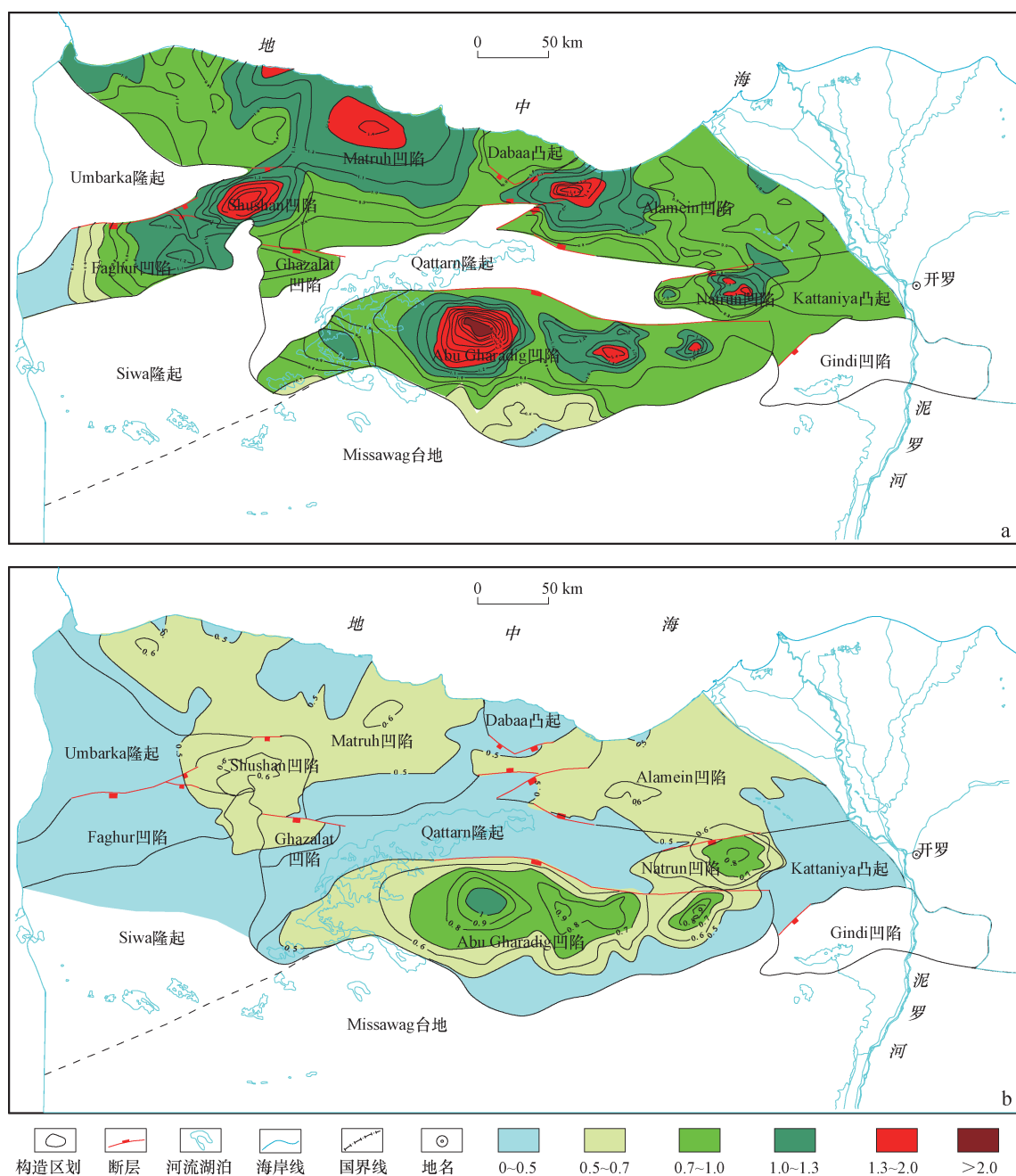


图8 埃及西沙漠盆地中侏罗统 Zahra 段 (a) 和 Abu Roash 组 AR-F 段 (b) 烃源岩今成熟度等值线 (R_o / %)

Fig.8 Isograms showing the current source rock maturity (R_o / %) of the Jurassic Zahra member (a) and Cretaceous AR-F member of Abu Rosh Fm (b) in the Western Desert Basin, Egypt

法计算得到西沙漠盆地的总生烃量分别为 587×10^8 t 和 602×10^8 t,均值为 594×10^8 t。按 10%运聚系数计算资源量均值为 59.4×10^8 t,可采资源量 11.88×10^8 t,剩余可采资源量 7.52×10^8 t;按油藏规模序列法预测,剩余可采资源量 $(5.2 \sim 8.1) \times 10^8$ t,中间值为 6.51×10^8 t。可见,西沙漠盆地拥有可观的剩余资源,总体探明程度不高;按盆模法的探明程度仅 36.7%,按油藏规模序列法估算的探明程度 40.11%,反映仍处于储量发现高峰的中期阶段,具有很好的资源潜力。

从剩余资源的层系分布看(表 2),古生界、侏罗系、下白垩统 AEB 组剩余可采资源量规模较大,约占总剩余量的 77%。从各领域勘探成果看,Abu Gharadig 凹陷的古生界、侏罗系、下白垩统 AEB,Matruh 凹陷的古生界,Faghur 凹陷的上白垩统,油气发现少,剩余资源量分布可观。

4.2 剩余资源勘探方向

纵观国内外的富油气盆地^[8,13-15,30-33],其成烃条件有 3 点共性:一是烃源岩以 $TOC > 2\%$ 的高丰度有机质为主;二是优质烃源岩热演化以 $R_o > 0.7\%$ 的成熟-高成熟烃灶为主;三是这样的高效能优质烃源岩一般有 2 套或更多套,且厚度较大、广泛分布。西沙漠盆地中生界烃源岩具有类似的成烃条件,而且剩余资源量巨大,属于典型的富油气盆地;据此,结合剩余资源分布状况,认为剩余潜力勘探方向如下。

1) 从多源高效烃灶的满凹含油条件比较^[12,32],勘探余地大。其中,Siwa,Qattara 隆起和 Kattaniya 凸起以北诸凹陷具备 Khatatba 组 Zahra 段和 Safa 段优质烃

源岩的高效能“双源烃灶”供给丰富的油气源,油、气资源并举相对均衡,在各凹陷及其毗邻的隆起和凸起区,油气可以聚集形成“满凹含油”的格局;南部诸凹陷除上述 2 套高效能烃灶外,还有上白垩统 Abu Roash 组 AR-F 段烃源岩成熟供给油源条件,存在“三源共存”的供烃条件,故其纵向勘探层系更多。目前,西沙漠盆地油气勘探主要围绕烃灶区上、下的成藏组合,工作范围明显小于满凹含油的领域,因此勘探回旋余地很大。

2) 从富油气凹陷资源分布的有序性比较^[11-13,33],多样性油藏类型潜力很大。目前,该区基本是针对构造圈闭实施勘探,也发现少量大个的地层不整合、河道岩性油气藏;总体上,油气藏类型较少,远未达到富油气盆地的油气分布连续性和有序性格局。

3) 从油气运移条件比较,具备纵横长距离输送油气聚集成藏。本区主成盆中生代时期,以 2 期裂谷断陷和 1 期裂后拗陷盆地的陆相和海陆相建造为主,断陷构造特点类似于渤海湾、苏北盆地;而苏北盆地只有普通烃源岩,其供烃灶成熟度偏低 R_o 以 $0.65\% \sim 1.30\%$ 为主,油气就能侧向运移到异地 20~25 km 外成藏,垂向运移超过 3 km 异地成藏^[21,34]。反观本区,断层相对少,输导层海相砂体为主,侧向连通性更好,油气源也丰富的得多,油气纵横运移到达异地成藏的条件更好、有效成藏范围更广;因此异地聚集成藏是下步重点关注的勘探领域之一。

4) 从各凹陷剩余资源差异看,剩余资源量较大的盆地主要集中在分布在 Shushan 凹陷、Abu Gharadig 凹陷及 Matruh 凹陷和 Faghur 凹陷,与侏罗系 Khatatba 组烃源岩高成熟度分布范围相对应。

5 结论

1) 埃及西沙漠盆地发育侏罗系 Khatatba 组(Safa 段和 Zahra 段)煤系暗色泥页岩和白垩系 AR-F 段暗色泥页岩 3 套主力烃源岩,各凹陷厚度分布变化较大。侏罗系 Khatatba 组 Safa 段烃源岩厚度一般为 10~450 m,Zahra 段为 30~200 m,总体上北部凹陷区烃源岩厚度较南部凹陷区的大。白垩系 AR-F 段烃源岩分布范围广,厚度一般在 30~100 m,由南向北地层厚度变大,Shushan、Matruh 凹陷厚度较大。

2) 3 套烃源岩品质均较好, TOC 含量和 S_2 含量均较高,且侏罗系烃源岩品质好于白垩系烃源岩;三套烃源岩均以混合 II 型干酪根为主,烃源岩成熟度差异大,侏罗系烃源岩成熟度高,全盆均已成熟,部分深凹地区

表 2 埃及西沙漠盆地剩余资源量分布情况

Table 2 The remaining resources of the Western Desert Basin

层位	剩余可采 资源量/ 10^8 t	所占 百分比/ %	主要分布领域
Abu Roash	0.65	8	Abu Gharadig 凹陷
Bahariya	0.90	11	Faghur 凹陷、Matruh 凹陷、 Abu Gharadig 凹陷、
Kharita	0.18	2	Shushan 凹陷、Matruh 凹陷
Alamein	0.18	2	Alamein 凹陷、Matruh 凹陷
AEB	1.28	16	Abu Gharadig 凹陷、Matruh 凹陷、 Faghur 凹陷
侏罗系	1.97	24	Shushan 凹陷、Matruh 凹陷、 Faghur 凹陷
古生界	2.99	37	Matruh 凹陷、Shushan 凹陷和 Abu Gharadig 凹陷、Qattara 隆起
合计	8.15	100	

达到过熟生气阶段,白垩系烃源岩成熟度低,仅在东南部的 Abu Gharadig 凹陷、Natrun 凹陷达到成熟阶段。

3) 西沙漠盆地剩余资源量可观,剩余可采资源量 6.51×10^8 t, 目前处于储量发现高峰阶段的中期,具有很好的勘探潜力。Abu Gharadig 凹陷的古生界、侏罗系、下白垩统 AEB, Matruh 凹陷的古生界, Faghur 凹陷的上白垩统, 油气发现少, 探明程度低, 是下步勘探的有利方向。

参考文献

- [1] IHS Energy Group. International petroleum exploration and production database. Englewood, Colorado, 2017.
- [2] Gazzar A M E, Moustafa A R, Bentham P. Structural evolution of the Abu Gharadig field area, Northern Western Desert, Egypt[J]. Journal of African Earth Sciences, 2016, 124: 340–354.
- [3] Beialy S Y E, Atfy H S E, Zavada M S, et al. Palynological, palynofacies, paleoenvironmental and organic geochemical studies on the Upper Cretaceous succession of the GPTSW-7 well, North Western Desert, Egypt[J]. Marine and Petroleum Geology, 2010, 27(2): 370–385.
- [4] Shalaby M R, Hakimi M H, Abdullah W H. Organic geochemical characteristics and interpreted depositional environment of the Khatatba Formation, northern Western Desert, Egypt[J]. AAPG Bulletin, 2012, 96(11): 2019–2036.
- [5] Zobaa M K, Oboh-Ikuenobe F E, Ibrahim M I. The Cenomanian/Turonian oceanic anoxic event in the Razzak Field, north Western Desert, Egypt: Source rock potential and paleo environmental association [J]. Marine and Petroleum Geology, 2011, 28: 1475–1482.
- [6] 孟元林, 申婉琪, 周新桂, 等. 东部盆地群下白垩统烃源岩特征与页岩气勘探潜力[J]. 石油与天然气地质, 2016, 36(6): 893–902.
Meng Yuanlin, Shen Wanqi, Zhou Xingui, et al. Characteristics of the Lower Cretaceous source rocks and shale gas exploration potential of eastern basin group, NE China[J]. OIL & GAS GEOLOGY, 2016, 36(6): 893–902.
- [7] Shalaby M R, Hakimi M H, Wan H A. Geochemical characteristics and hydrocarbon generation modeling of the Jurassic source rocks in the Shushan Basin, north Western Desert, Egypt[J]. Marine and Petroleum Geology, 2011, 28: 1611–1624.
- [8] 蔡希源. 湖相烃源岩生排烃机制及生排烃效率差异性——以渤海湾盆地东营凹陷为例[J]. 石油与天然气地质, 2012, 33(3): 329–345.
Cai Xiyuan. The mechanism of hydrocarbon generation and expulsion and the difference of hydrocarbon generation and expulsion efficiency of lacustrine source rocks: A case study of Dongying Sag, Bohai Bay Basin[J]. Petroleum and Natural Gas Geology, 2012, 33(3): 329–345.
- [9] 罗胜元, 陈孝红, 刘安, 李海. 中扬子宜昌地区下寒武统水井沱组页岩气地球化学特征及其成因[J]. 石油与天然气地质, 2019, 40(5): 999–1010.
Luo Shengyuan, Chen Xiaohong, Liu An, Li Hai. Geochemical features and genesis of shale gas from the Lower Cambrian Shuijingtuo Formation shale in Yichang block, Middle Yangtze region[J]. Oil & Gas Geology, 2019, 40(5): 999–1010.
- [10] 申宝剑, 秦建中, 冯丹, 等. 烃源岩有机碳含量与生排油效率动态评价[J]. 石油实验地质, 2017, 39(4): 505–510.
Shen Baojian, Qin Jianzhong, Feng Dan, et al. [J] Dynamic evaluation of organic carbon content and oil production and discharge efficiency of source rocks[J]. Petroleum experimental geology, 2017, 39(4): 505–510.
- [11] 胡朝元. 生油区控制油气田分布: 中国东部陆相盆地进行区域勘探的有效理论[J]. 石油学报, 1982, 3(2): 9–13.
Hu Chaoyuan. Source bed controls hydrocarbon habitat in continental basins, east China[J]. Acta Petrolei Sinica, 1982, 3(2): 9–13.
- [12] 胡见义, 徐树宝, 童晓光. 渤海湾盆地复式油气聚集区(带)的形成和分布[J]. 石油勘探与开发, 1986, 13(1): 1–8.
Hu Jianyi, Xu Shubao, Tong Xiaoguang. Formation and distribution of complex petroleum accumulation zones in Bohaiwan Basin[J]. Petroleum Exploration and Development, 1986, 13(1): 1–8.
- [13] 赵文智, 邹才能, 汪泽成, 等. 富油气凹陷“满凹含油”论: 内涵与意义[J]. 石油勘探与开发, 2004, 31(2): 130–142.
Zhao Wenzhi, Zou Caineng, Wang Zecheng, et al. The intension and signification of “sag-wide oil-bearing theory” in the hydrocarbon-rich depression with terrestrial origin[J]. Petroleum Exploration and Development, 2004, 31(2): 130–142.
- [14] 康洪全, 逢林安, 贾怀存, 等. 澳大利亚西北陆架北卡那封盆地资源潜力评价[J]. 石油实验地质, 2018, 40(6): 808–817.
Kang Hongquan, Lili'an, Jia Huaihai, et al. Resource Potential Assessment of NorthCARNAVON Basin on the Northwest Shelf of Australia[J]. Petroleum Experimental Geology, 2018, 40(6): 808–817.
- [15] 高辉, 何梦卿, 赵鹏云, 等. 鄂尔多斯长7页岩油与北美地区典型页岩油地质特征对比[J]. 石油实验地质, 2018, 40(2): 133–140.
Gao Hui, He Mengqing, Zhao Pengyun, et al. Comparison of geological characteristics of Chang 7 shale oil in Ordos Basin and typical shale oil in North America[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2018, 40(2): 133–140.
- [16] 周志, 翟刚毅, 石砥石, 等. 鄂西-渝东北地区五峰组-龙马溪组页岩气成藏地质条件分析[J]. 石油实验地质, 2019, 41(1): 1–9.
Zhou Zhi, Zhai Gangyi, Shizhanshi, et al. [J], Petroleum Experimental Geology, 2019, 41(1): 1–9.
- [17] 朱如凯, 邹才能, 吴松涛, 杨智, 毛治国, 杨海波, 范春怡, 惠潇, 崔景伟, 苏玲, 王焕第. 中国陆相致密油形成机理与富集规律[J]. 石油与天然气地质, 2019, 40(6): 1168–1184.
Zhu Rukai, Zou Caineng, Wu Songtao, et al. [J], Mechanism for generation and accumulation of continental tight oil in China[J]. Oil & Gas Geology, 2019, 40(6): 1168–1184.
- [18] 梁刚, 甘军, 李兴, 等. 琼东南盆地浅水区与深水区烃源岩热演化差异性影响因素研究[J]. 特种油气藏, 2019, 26(1): 69–74.
Liang Gang, Gan Jun, Li Xing, et al. Influential factors of thermal evolution difference of source rocks in shallow and deep water areas of Southeastern Hainan Basin[J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2019,

- 26(1):69-74.
- [19] 刘玉瑞. 苏北盆地与南黄海盆地中—新生界成烃对比浅析[J]. 石油实验地质, 2010, 32(6): 541-546.
- Liu Yurui. Comparison analysis of Meso-Cenozoic hydrocarbon generation between the North Jiangsu basin and the South Yellow Sea basin [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2010, 32(6): 541-546.
- [20] 范柏江, 庞雄奇, 师良. 烃源岩排烃门限在生排油气作用中的应用[J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 2012, 34(5): 65-70.
- Fan Bojiang, Pang Xiongqi, Shi Liang. Application of Hydrocarbon Expulsion Threshold in Studying the Hydrocarbon Generation and Expulsion [J]. Journal of Southwest Petroleum University: Science & Technology Edition, 2012, 34(5): 65-70.
- [21] 郑见超, 李斌, 刘羿伶, 等. 塔里木盆地寒武统玉尔吐组烃源岩热演化模拟分析[J]. 油气藏评价与开发, 2018, 8(6): 7-12.
- Zheng Jianchao, Li Bin, Liu Yiling, et al. Study on thermal evolution modeling of lower Cambrian Yuertusi source rock, Tarim Basin [J]. Reservoir Evaluation and Development, 2018, 8(6): 7-12.
- [22] Rossi C, Goldstein R H, Ceriani A, et al. Fluid inclusions record thermal and fluid evolution in reservoir sandstones, Khatatba Formation, Western Desert, Egypt: A case for fluid injection [J]. AAPG Bulletin, 2002, 86(10): 1773-1799.
- [23] Moretti I, Kerdran Y, Rodrigo G, et al. South Alamein petroleum system (Western Desert, Egypt) [J]. Petroleum Geoscience, 2010, 16: 121-131.
- [24] Metwalli F I, Pigott J D. Analysis of petroleum system criticals of the Matruh-Shushan Basin, Western Desert, Egypt [J]. Petroleum Geoscience, 2005, 11: 157-178.
- [25] Awad G M. Habitat of Oil in Abu Gharadig and Faiyum Basins, Western Desert, Egypt [J]. AAPG Bulletin, 1984, 68(5): 564-573.
- [26] Younes M A. Burial History and Hydrocarbon Generation Modeling of the Jurassic-Cretaceous Formations in the Alamein-Shushan Basins, Northern Western Desert of Egypt. AAPG, 2012.
- [27] 庞雄奇, 陈章明, 陈发景. 含油气盆地地史、热史、生留排烃史数值模拟研究与烃源岩定量评价[M]. 北京: 地质出版社, 1993.
- Pang Xiongqi, Chen Zhangming, Chen Fajing. Study on Numerical Simulation of geohistory, thermal history and hydrocarbon generation and expulsion history of petroliferous basins and quantitative evaluation of hydrocarbon source rocks [M]. Beijing: Geological Press, 1993.
- [28] The Egyptian general petroleum corporation. Western Desert, oil and gas fields (A Comprehensive Overview) [M]. 1992.
- [29] Said R. The geology of Egypt [M]. The Egyptian General Petroleum Corporation, Conoco Hurghada Inc. and Repsol Exploracion, 1990.
- [30] 贾怀存. 全球大油气田勘探进展及勘探启示[J]. 科技导报, 2014, 32(8): 76-83.
- Jia Huaiyun. Exploration Progress and Exploration Enlightenment of Global Large Oil and Gas Fields [J]. Science and Technology Report, 2014, 32(8): 76-83.
- [31] 田纳新, 殷进垠, 陶崇智, 等. 中东—中亚地区重点盆地油气地质特征及资源评价[J]. 石油与天然气地质, 2017, 38(3): 582-591.
- Tian Naxin, Yin Jinyuan, Tao Chongzhi, et al. Petroleum geologic characteristics and resource evaluation of key basins in the Middle East-Central Asia region [J]. Petroleum and natural gas geology, 2017, 38(3): 582-591.
- [32] 张鹏, 张金功, 张亮, 等. 济阳坳陷渤南洼陷沙河街组二段多源供烃成藏模式[J]. 石油实验地质, 2018, 40(2): 159-167.
- Zhang Peng, Zhang Jingong, Zhang Liang, et al. Multi-source hydrocarbon supply and accumulation model of the second member of Shahejie Formation in Bonan Depression, Jiyang Depression [J]. Petroleum experimental geology, 2018, 40(2): 159-167.
- [33] 徐田武, 张成富, 吕立爽, 等. 形成规模油田成烃要素下限探讨——以东濮凹陷马寨油田为例[J]. 断块油气田, 2019, 26(02): 137-141.
- Xu Tianwu, Zhang Chengfu, Lyu Lishuang, et al. Lower limit discussion of hydrocarbon generation factor for large scale oilfield: taking Mazhai Oilfield of Dongpu Depression as an example [J]. Fault-Block Oil and Gas Field, 2019, 26(02): 137-141.
- [34] 孙同文, 高喜成, 吕延防, 付广, 王海学, 王浩然. 断裂转换带作为油气侧向、垂向运移通道的研究进展[J]. 石油与天然气地质, 2019, 40(5): 1011-1021.
- Sun Tongwen, Gao Xicheng, Lyu Yanfang, Fu Guang, Wang Haixue, Wang Haoran. Research progress in fault transformation zones as lateral or vertical hydrocarbon migration pathways [J]. Oil & Gas Geology, 2019, 40(5): 1011-1021.

(编辑 张玉银)