

DOI: 10.13745/j.esf.2018.02.013

苏丹Muglad盆地Fula坳陷油气地球化学特征与成藏意义

李 威^{1,2}, 窦立荣^{1,3,*}, 张光亚², 程顶胜², 文志刚¹, 刘爱香², 客伟利²

1. 长江大学 资源与环境学院; 长江大学 油气资源与勘探技术教育部重点实验室, 湖北 武汉 430100
2. 中国石油勘探开发研究院, 北京 100083
3. 中国石油国际勘探开发有限公司, 北京 100034

LI Wei^{1,2}, DOU Lirong^{1,3,*}, ZHANG Guangya², CHENG Dingsheng², WEN Zhigang¹, LIU Aixiang², KE Weili²

1. College of Resources and Environment, Yangtze University; Key Laboratory of Exploration Technologies for Oil and Gas Resources (Ministry of Education), Yangtze University, Wuhan 430100, China
2. PetroChina Research Institute of Petroleum Exploration & Development, Beijing 100083, China
3. China National Oil and Gas Exploration and Development Corporation Ltd., Beijing 100034, China

LI Wei, DOU Lirong, ZHANG Guangya, et al. Geochemical characteristics of crude oil and their implications for hydrocarbon accumulation in the Fula Sub-basin, Muglad Basin, Sudan. *Earth Science Frontiers*, 2018, 25(2): 121-129

Abstract: The Fula Sub-basin, located in the northeast Muglad Basin, has an area of 5000 km². The FN oilfield is the biggest oilfield discovered in this sub-basin with 100 million tons of oil reserves. Its main hydrocarbon reservoirs included the Aradeiba, Bentiu and Abu Gabra Formations of the Cretaceous. Based on a systematic geochemical analysis of crude oil, the reservoir-forming stages of the FN oilfield are discussed. The geochemical characteristics of the crude oil from the three formations are very similar, which indicates that all hydrocarbons originated from the same source rocks, i. e., the Abu Gabra source rocks. The crude oil has both normal oil characteristics, such as full series distribution of n-alkanes, hopanes and steranes, as well as biodegraded oil characteristics, such as raised chromatogram baseline and appearance of sharp UCM and 25-norhopanes. It revealed, therefore, that the FN oilfield had undergone two oil infilling stages, i. e., the earlier infilling oils had relatively low maturity and was strongly biodegraded, and the later ones had relatively high maturity. The tectonic, burial and thermal evolution histories were used to analyze the hydrocarbon generation and charging and accumulation stages of the FN oilfield. It was shown that the Abu Gabra source rocks experienced two periods of hydrocarbon generation. The first one took place during the Late Cretaceous, with the maturity (R_o) of Abu Gabra source rocks reaching 0.6% within the hydrocarbon generation window; then the crude oil suffered relatively serious biodegradation due to tectonic reversion and uplift by the end of the Cretaceous. The second one happened during the late Paleogene as the Abu Gabra source rocks entered the hydrocarbon generation peak stage. This was the most important process for hydrocarbon generation and oilfield formation in the region. The structural traps related to the second period are the main targets for hydrocarbon exploration in the Fula Sub-basin.

收稿日期:2017-09-10;修回日期:2017-10-20

基金项目:国家科技重大专项 29 课题五“海外重点探区目标评价与未来领域选区选带研究”(2016ZX05029005);中国石油天然气集团公司科技项目“苏丹 Muglad 盆地精细勘探领域评价与目标优选”(2015D-0909)

作者简介:李 威(1988—),男,博士研究生,从事油气藏形成与分布研究。E-mail:liwei123456@petrochina.com.cn

* 通讯作者简介:窦立荣(1965—),男,教授级高级工程师,主要从事跨国油气勘探和石油地质综合研究。E-mail:doulirong@cnpcint.com

Key words: Muglad Basin; Fula Sub-basin; FN oilfield; biodegradation; hydrocarbon generation stage; reservoir formation

摘要: Fula 坳陷位于 Muglad 盆地东北部, 面积约 5 000 km², FN 油田是该坳陷最大的亿吨级油田。油气储层主要为白垩系 Abu Gabra、Bentiu 和 Aradeiba 组。应用油藏地球化学的方法对 FN 油田的成藏期次进行了探讨。FN 油田 Abu Gabra、Bentiu 和 Aradeiba 组原油特征相似, 来源于同一套烃源岩, 原油既表现出正构烷烃、藿烷、甾烷系列分布完整等正常油特征, 又表现出色谱基线抬升、高峰期 UCM、25-降藿烷出现等生物降解油特征, 这些特征表明 FN 油田经历了至少两期成藏过程, 早期充注的原油遭受生物降解后又接受后期成熟度较高的原油充注。根据构造演化、埋藏史和生排烃史可以研究生成烃期次及油气成藏特征。Abu Gabra 组烃源岩发生了两次生烃作用, 第一次生烃作用发生在晚白垩世, R_o 达到 0.6% 以上, 进入生排烃作用阶段, 晚白垩世末构造抬升作用使这次生烃产物遭受较为严重的生物降解; 第二次生烃作用发生在古近纪, Abu Gabra 组烃源岩进入生油高峰阶段, 是本区最重要的一次生油作用和成藏过程, 与该次成藏事件相关的构造圈闭是 Fula 坳陷油气勘探的重点。

关键词: Muglad 盆地; Fula 坳陷; FN 油田; 生物降解; 生烃期次; 成藏特征

中图分类号: P618.130.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-2321(2018)02-0121-09

Muglad 盆地位于非洲板块中部的苏丹共和国南部, 是苏丹中生代陆相裂谷盆地群中最大的沉积盆地, 是在稳定的前寒武系基底上发育起来的、在中非剪切带的右旋剪切应力场背景下拉张形成的断陷盆地。位于盆地东北部的 Fula 坳陷是其中的一个勘探程度相对较高的断陷, 面积约 5 000 km²^[1], 目前已在该坳陷的白垩系 Aradeiba 和 Bentiu 组发现了亿吨级的 FN 油田, 该油田在纵向上、平面上 API^o 分布跨度大, 普遍发育轻质油、中质油、重质油、稠油及沥青垫^[1-2], 显示了油藏内部的非均质性强, 油气充注成藏的复杂性。为了弄清 Fula 坳陷的成藏特征及期次, 本文以 FN 油田为例, 选取 10 份白垩系原油样品, 56 份热解数据, 深入分析地球化学特征的基础上, 结合构造演化史、埋藏史及其他资料, 试图厘清其成藏期次特征, 为后期深化勘探开发提供科学依据。

1 石油地质特征

Fula 坳陷共经历了三次大的裂谷期, 第一期为早白垩世 Abu Gabra 组沉积期, 第二期为晚白垩世 Darfur 群沉积期, 第三期为渐新世—中新世 Nayil 组—Tendi 组沉积期, 其中前两期断陷作用较为强烈, 一定程度上控制凹陷的发育, 第三期则主要对前两期构造进行一定的改造作用^[2-3]。地震、钻井资料显示 Fula 坳陷沉积地层主要为白垩系—第三系河流、湖相沉积, 其中下白垩统以深湖相沉积为主, Abu Gabra 组湖相暗色泥岩为坳陷内唯一成熟烃源岩, 坳陷内所发现的油气都来源于该套烃源岩^[1]。FN 油田

位于 Fula 坳陷中央隆起带, 整体上表现为受基底隆起所影响的断背斜构造(图 1)。前人研究认为该油田油气来源于主力烃源岩层段 Abu Gabra 组巨厚湖相暗色富含有机质的泥岩^[4], 储层主要为 Abu Gabra 湖相砂岩、Bentiu 组河流相块状砂岩及 Aradeiba 组三角洲砂岩, 盖层主要为 Abu Gabra 组湖相暗色泥岩和 Aradeiba 组泛滥平原相、浅湖相泥岩^[5], 在纵向上构成了自生自储、下生上储等多套成藏组合。

2 样品及实验条件

本文选取 Fula 坳陷 Abu Gabra、Bentiu 和 Aradeiba 组原油样品一共 10 件(表 1), 实验在中国石油大学(北京)油气资源与探测国家重点实验室完成。首先对原油进行族组分分离和定量, 对所得饱和烃、芳香烃组分在安捷伦 6890 色谱仪及安捷伦 5975i 质谱仪上进行气相色谱和气相色谱-质谱分析。GC-MS 测试条件: HP-5MS 色谱柱(60 m × 0.25 mm × 0.25 μm), 载气为纯度 99.999% 的 He。

3 原油地球化学特征

3.1 原油物性和族组成特征

Fula 坳陷在纵向上各组的原油物性变化大, Bentiu 组、Aradeiba 组原油总体表现为黑色, 高密度、高黏度、高酸值性质的稠油, Abu Gabra 组原油则更多表现为低密度、低黏度、低酸值的稀油, 垂向上随着深度的增加 API^o 增大, 具体参数见表 1。FN 油田 Abu Gabra 饱和烃含量大于 50%, 非烃+沥青

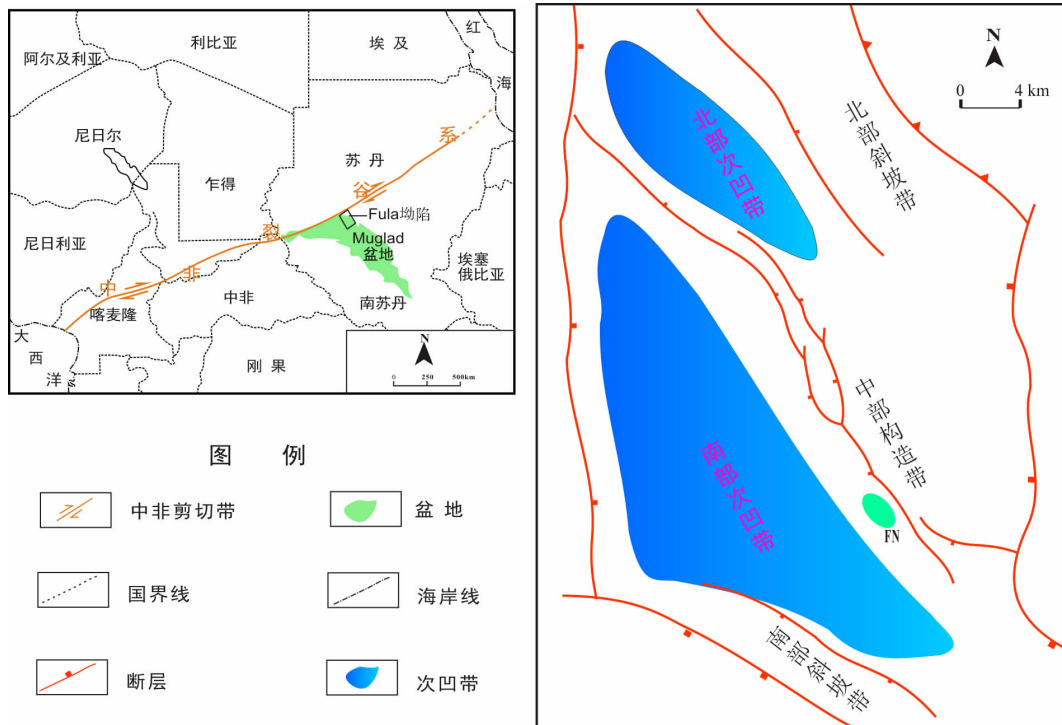


图1 Muglad 分布位置及 Fula 坳陷分布图
(据文献[1]修改)

Fig.1 Location map of the Fula Sub-basin in the Muglad Basin

表 1 Fula 坳陷原油样品物性及族组成参数表

Table1 Physical properties and group components of oil of Fula Sub-Basin

井位	层位	深度/m	API/(°)	组分含量/%				饱芳比
				饱和烃	芳烃	非烃	沥青质	
FN-156	Aradeiba	1 204~1 216	21.41	47.41	34.48	15.52	2.59	1.38
M 1-4	Aradeiba	834~871	17.46	45.43	36.76	14.16	3.65	1.24
FN-4	Bentiu	1 245~1 269	17.45	41.74	36.98	17.98	3.31	1.13
FNE-16	Bentiu	523~548	17.76	46.19	38.76	13.61	1.44	1.19
M 1-7	Bentiu	1 537~1 564	16.64	47.55	34.5	12.35	5.59	1.38
FN 4-4	Abu Gabra	1 854~1 869	23.72	53.08	30.14	10.96	5.82	1.76
M 7-5	Abu Gabra	1 537~1 564	30.44	63.68	24.07	7.00	5.25	2.65
		2 121.4~2 125.4		67.00	22.00	9.00	2.00	3.05
FN-4	Abu Gabra	2 161.2~2 167.3	31.90	64.03	14.45	16.00	5.52	4.43
		2 174.8~2 179.8		63.18	25.00	8.00	3.82	2.53

质含量相对较低,饱芳比介于 1.76~4.43;Bentiu 组和 Aradeiba 组饱和烃含量相似,基本都分布在 45%左右,芳烃含量主要集中在 34.48%~38.76%,饱芳比介于 1.13~1.38。从饱和烃含量及饱芳比来看,纵向上 Abu Gabra 组比 Bentiu 组、Aradeiba 组更富集饱和烃,即浅层饱和烃含量低于深层,可能与浅层遭受生物降解及氧化作用有关。

3.2 生物标志化合物特征

Fula 坳陷白垩系 Abu Gabra 组、Bentiu 组、

Aradeiba 组原油饱和烃色谱基线明显抬升,出现明显的“鼓包”(UCM),代表有机质(原油)经过了强烈生物降解作用所形成的产物^[6-7]。原油样品中,Abu Gabra 组正构烷烃系列完整,且均可以识别出类异戊二烯烷烃系列化合物,Pr/Ph 均大于 1,Bentiu 组原油样品中正构烷烃系列较完整,但类异戊二烯烷烃系列化合物基本上检测不出,Aradeiba 组原油中正构烷烃系列完整,也能检测出类异戊二烯烷烃系列化合物,其中 Pr/Ph 分布在 0.45~1.00(图 2)。

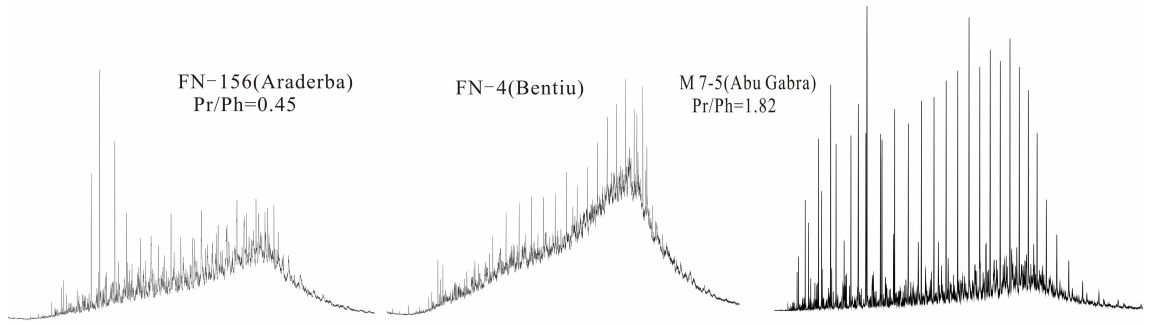
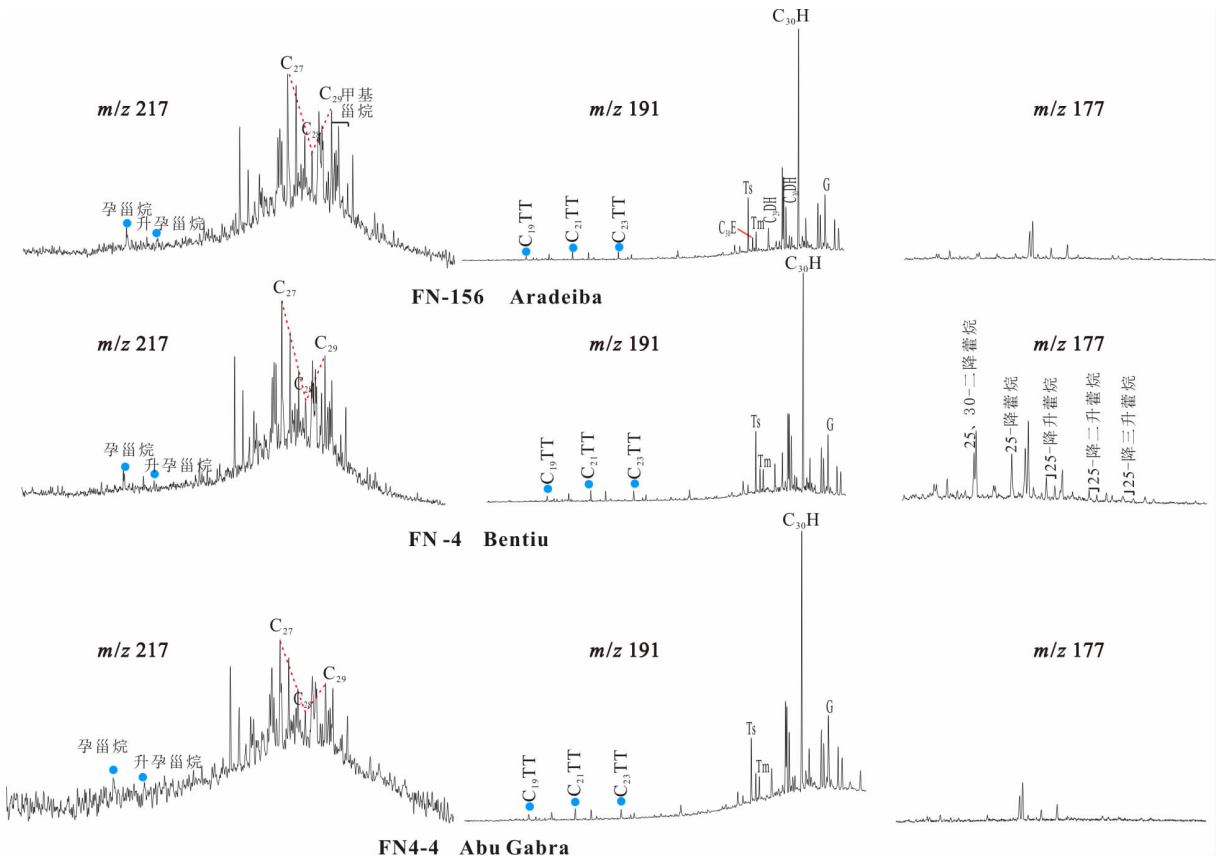


图2 Fula 坳陷原油链烷烃系列分布(m/z 57)

Fig.2 Distributions of chain alkanes in crude oil from Fula Sub-basin(m/z 57)



$C_{30}E$ —早洗脱重排藿烷; $C_{29}DH$ — C_{29} 重排藿烷; $C_{30}DH$ — C_{30} 重排藿烷; $C_{30}H$ — C_{30} 藿烷; G—伽马蜡烷; TT—三环萜烷。

图3 Fula 坳陷原油甾烷和萜烷分布对比图

Fig.3 Comparison diagram of sterane and terpane of crude oil from Fula Sub-basin

Fula 坳陷 FN 油田 Abu Gabra 组、Bentiu 组、Aradeiba 组原油甾烷分布(m/z 217)特征相似(图 3), 普遍发育 4-甲基甾烷, 指示了淡水湖相甲藻类对母源的贡献^[8-10], C_{27} 、 C_{28} 、 C_{29} 规则甾烷显示为不对称“V”型, 其中 C_{27} 甾烷含量高, 占 C_{27} 、 C_{28} 和 C_{29} 规则甾烷总和的 40% 以上, 在 C_{27} - C_{28} - C_{29} 规则甾烷三角图中(图 4a) FN 油田白垩系三个组的原油分布集中, 显示其母源均位于 II 1 型区, 表明以水生生物为主的混源特征, 印证了 Fula 坳陷原油主要来源于

白垩系 Abu Gabra 组的观点^[4]。

原油萜烷分布(m/z 191)特征也基本相似(图 3), 原油中三环萜烷以指示淡水湖泊沟鞭藻类的低碳数化合物(C_{19} — C_{21})占优势, C_{21} TT(三环萜烷)为主峰, 同时 C_{21} TT、 C_{23} TT、 C_{24} TT 依次降低呈阶梯形分布, ($C_{19} + C_{20} + C_{21}$) TT / ($C_{23} + C_{24}$) TT 分布为 1.30~1.92, 与煤成油形成鲜明对照, 表明其生源含有一定的陆源水生生物^[10-11], 在 Abu Gabra 组、Bentiu 组、Aradeiba 组原油中藿烷、降新藿烷、重排

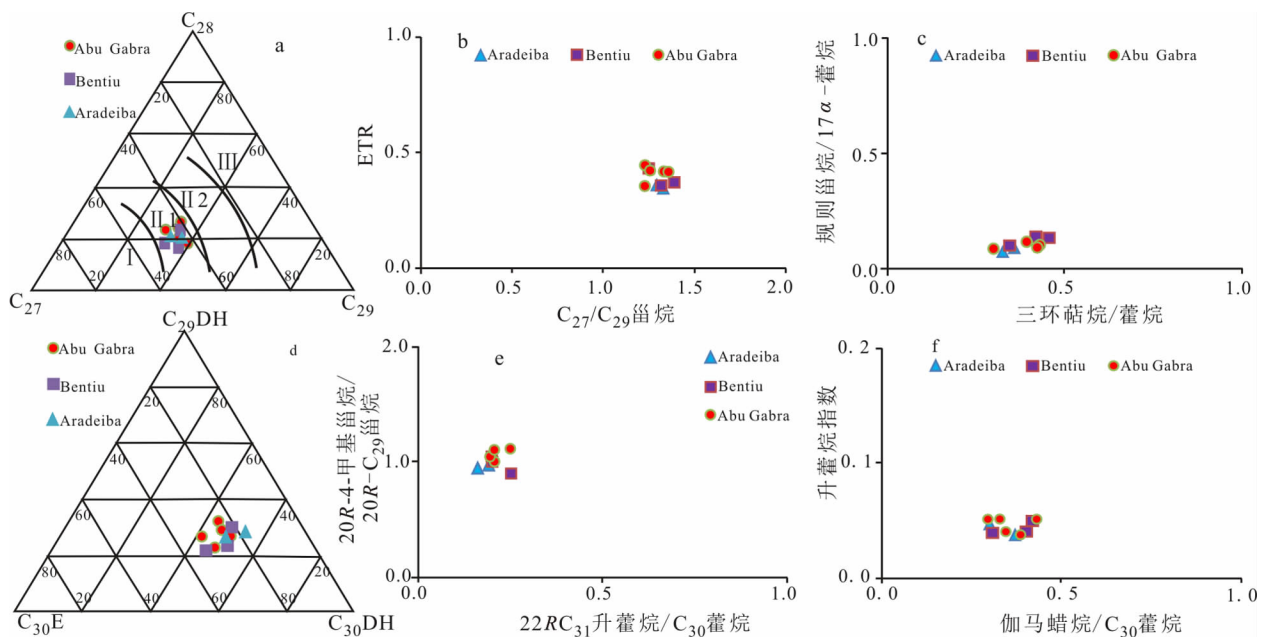


图4 Fula坳陷原油地球化学成因判别图

Fig. 4 Crude oil geochemical genesis discriminant diagrams of Fula Sub-basin

藿烷类化合物分布完整,其中主峰为 C_{30} H(藿烷), T_s 含量高于 T_m ,重排藿烷系列 C_{30} E(早洗脱重排藿烷)^[12]、 C_{29} DH、 C_{30} DH等化合物丰富,同时在Bentiu组原油样品及部分Aradeiba组原油中检测到完整25-降藿烷系列(m/z 177)。基于原油普遍降解,利用抗降解强的长链三环萜烷指数ETR^[13]对各组原油进行对比(图4b),各组原油中ETR参数值分布相近,同时原油中低比值的三环萜烷/17 α (H)-藿烷和低含量的规则甾烷/17 α (H)-藿烷(图4c)指示了原油来源于相似的陆源或微生物改造过的有机质^[14]。

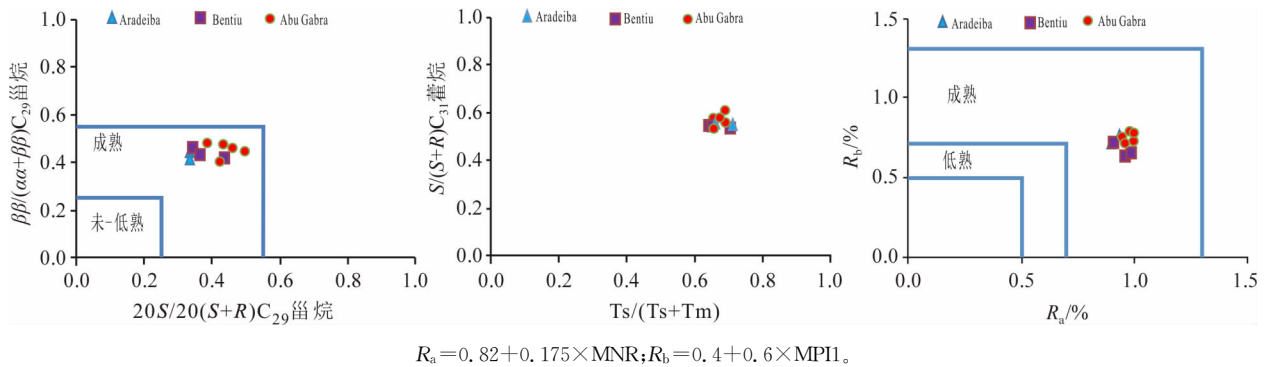
前人研究认为重排藿烷系列对有机质沉积环境和成熟度反应灵敏,高含量的重排甾烷一方面反映了沉积过程中黏土的作用,另一方面反映了成熟度的增加^[15],利用该系列化合物的三角图综合判识各组原油所代表的母源沉积环境等差异性。由图4d可知, C_{30} E、 C_{29} DH、 C_{30} DH含量比值基本为1:1:2的分布特征,同时对 C_{30} DH/ C_{30} H和重排甾烷/规则甾烷参数计算,比值分布为0.18~0.45和0.24~0.32,参数值均较高,重排藿烷、重排甾烷较发育表明白垩系不同组的原油均来自富含黏土、沉积环境呈弱氧化性的泥岩^[16-17]。原油中较高含量的4-甲基甾烷、伽马蜡烷/ C_{30} 藿烷比值为0.30~0.43(图4f),指示母源沉积时期的水体为弱氧化-弱还原、淡水-微咸水的沉积环境,前人利用22RC₃₁升藿烷/ C_{30}

藿烷参数判断湖盆水体环境,认为参数小于0.25代表湖相环境,大于0.25代表海相环境^[18],Fula坳陷22RC₃₁升藿烷/ C_{30} 藿烷比值分布为0.16~0.24,为湖相环境(图4e)。

综上所述,Fula坳陷FN油田白垩系Abu Gabra组、Bentiu组、Aradeiba组原油属于同一族群,均来自于Abu Gabra组暗色泥岩,该套泥岩为陆相淡水-微咸水、弱氧化-弱还原环境中的富黏土白垩系泥岩。

3.3 原油成熟度

Fula坳陷FN油田白垩系Abu Gabra组、Bentiu组、Aradeiba组原油甾烷系列完整,对于白垩系各组原油样品的成熟度,利用甾烷 C_{29} 异构体 $20S/20(S+R)C_{29}-\beta\beta/(\beta\beta+\alpha\alpha)C_{29}$ 参数划分成熟阶段(图5),Abu Gabra组原油参数比值为0.38~0.50、0.39~0.47,Bentiu组原油参数比值为0.34~0.44、0.42~0.46,Aradeiba组原油参数比值分布在0.33、0.44左右,均属于成熟原油。原油生物标志物指标中,对于来自相同有机相的原油, $T_s/(T_s+T_m)$ 是最为可靠的成熟度指标。前文分析表明各组原油母源、环境都具有相似的特征, $T_s/(T_s+T_m)$ 、 $22S/22(S+R)C_{31}$ 藿烷判识成熟度可能更灵敏,图5显示Fula坳陷FN油田白垩系Abu Gabra组、Bentiu组、Aradeiba组原油成熟度一致,均为成熟原油。利用原油样品芳烃色质分析资料,选取萘系列、菲系列



$$R_a = 0.82 + 0.175 \times \text{MNR}; R_b = 0.4 + 0.6 \times \text{MPII}.$$

图5 Fula 坳陷原油成熟度分布图

Fig. 5 Crude oil maturity distribution characteristics of Fula Sub-basin

参数进行成熟度计算。其中萘系列成熟度参数计算依据 MNR 换算成^[19] 镜质体反射率 R_c ($R_c = 0.82 + 0.175 \times \text{MNR}$); 菲系列中甲基菲指数换算成镜质体反射率 R_c ($R_c = 0.4 + 0.6 \times \text{MPII}$)^[20-21]。白垩系 Abu Gabra 组、Bentiu 组、Aradeiba 组原油利用萘、菲系列换算的成熟度集中在 0.80% 左右, 属于成熟阶段形成的原油(图 5)。

3.4 原油降解程度及充注期次

FN 油田白垩系 Abu Gabra 组、Bentiu 组、Aradeiba 组原油样品均有正构烷烃分布, 但基线都不同程度地抬升而形成“鼓包”(UCM 未分辨化合物)(图 2)。按照 Peters 等^[22] 的认识, 正构烷烃对生物降解作用最为敏感, 即使是轻度的生物降解作用都可造成正构烷烃系列的散失, 在 FN 油田白垩系所取样品中, 不管是稠油、中质油其正构烷烃均有分布, UCM 明显, 说明原油发生了明显的混合作用, 早期充注的原油在遭受生物降解作用后, 又发生了另一次原油的充注, 从而在谱图中表现出生物降解原油与正常原油共存的现象。此次分析的样品中 Bentiu 组原油全都检测到完整的 25-降藿烷, Aradeiba 组原油部分检测到 25-降藿烷(图 3), 其中 Bentiu 组原油 25-降藿烷含量较高, 25-降藿烷/ C_{30} 藿烷大于 0.2, 而 Aradeiba 组原油 25-降藿烷/ C_{30} 藿烷基本均小于 0.1。根据 Peters 等^[22] 对原油降解级别的划分, 25-降藿烷代表原油曾遭受过强烈的生物降解作用达到了中等—严重降解程度。具有 25-降藿烷显示的原油样品, 藿烷、甾烷分布完整, 正构烷烃均有显示, 表明原油至少经历了两期充注过程^[23]。

两期充注原油在储层内不同的混合程度造成原油物性和分子组成复杂多变, 其变化受控于混合比。谱图中 UCM 面积反映了早期生物降解原油所占比例的大小, 按照谱图中出现的 UCM 幅度, 大致可以

判断 Bentiu 组生物降解原油所占比例最大, Aradeiba 组其次, Abu Gabra 组生物降解原油比例最小, 而 Bentiu 组原油 API 度最小、Aradeiba 组原油 API 度略高于 Bentiu 组原油、Abu Gabra 组原油 API 度最高, 物性变化规律与降解现象呈现一定的对应关系。前人研究认为三芳甾在生物降解作用过程中非常稳定, 两期充注形成的原油中三芳甾的含量实际上是两期原油按不同比例叠加的结果, 并根据混合油中三芳甾的相对含量, 对油藏内两期充注油的贡献进行了半定量计算^[24]。其中 Bentiu 组 25-降藿烷含量丰富, UCM 幅度最高, 三芳甾在芳烃中的含量为 5% 左右, 按照三芳甾含量与充注比的对应关系, 表明第一期与第二期原油的充注比大约为 25 : 75, Aradeiba 组部分原油发育较低含量的 25-降藿烷, 三芳甾在芳烃中的含量为 3% 左右, 第一期与第二期原油的充注比大约为 15 : 85, Abu Gabra 组未检测到 25-降藿烷, 三芳甾在芳烃中的含量不到 1%, 表明第二期原油为主要贡献, 符合 UCM 幅度所反应的混合大小顺序。

4 烃源岩生排烃史

烃源岩随着热演化程度的增加, R_0 在 0.5% 左右进入生烃门限开始生烃, 但烃源岩开始生烃并不代表着含油气流体立即开始运移^[25-26], 只有当烃源岩生烃量满足自身吸附之后才会开始排出烃类流体, 油气运移才会开始。生烃潜力指数法可以有效地确定烃源岩的排烃门限, 生烃潜力指数 ($(S_1 + S_2)/\text{TOC}$) 与 R_0 剖面图中, 潜力指数由最大值开始突然减小时所对应的 R_0 值即为排烃门限临界点^[27]。图 6a 是在 FN 油田 5 口井 46 个热解数据的基础上建立的生烃潜力变化剖面, 同时将 FN-4 井

单独列出其生烃潜力变化剖面(图 6b), 从图 6 可看出, FN-4 井与 FN 油田的生烃潜力指数演化剖面相似, 随热演化程度的升高表现出先增大后减小的趋势, 当 R_o 小于 0.6% 时生成的烃量较少而主要残留在烃源岩中, R_o 大于 0.6% 时生烃潜力突然变小, 意味着 R_o 达到 0.6% 时烃类流体开始排出, 因此 $R_o = 0.6%$ 作为这一变化的临界点对应着排烃下限。

针对 Fula 坳陷的埋藏-热史介绍较少, 在调研国内外 Muglad 盆地的埋藏-热史基础上^[28-29], 选择 R_o 资料齐全的 FN-4 井利用 PetroMod 软件建立埋藏-热演化史图(图 7)。结合排烃门限($R_o = 0.6%$)可知, Fula 坳陷主力烃源岩 Abu Gabra 组进入晚白垩世以来共经历两次生排烃作用: 第一次生排烃发生在晚白垩世末抬升剥蚀之前, 在烃源岩埋深达到

1 900 m 左右时, 热演化程度 R_o 为 0.5%, 烃源岩开始生烃, 晚白垩世后期烃源岩埋深进入 2 200 m 左右, 热演化程度 R_o 为 0.6%, 烃源岩开始排烃, 此时进入油气充注运移阶段, 但是这次排烃作用持续时间不长, Abu Gabra 组烃源岩最大埋深为 2 400 m, 热演化程度 R_o 为 0.64%, 随即在晚白垩世末期的构造抬升作用下, 地层剥蚀烃源岩停止生烃; 第二次生排烃作用发生在古近纪, Abu Gabra 组地层埋藏加大, 烃源岩埋深超过 2 400 m, 热演化程度 R_o 达到 0.7% 以上, 按照二次生烃理论^[30], 当烃源岩后期热演化程度超过其前期最大热演化程度时, 烃源岩可以再次生烃, 此次烃源岩生排烃作用持续时间长, 埋藏深度大, 热演化程度适中, 处于大量生油阶段, 是 Fula 坳陷最重要的一次生排烃过程。

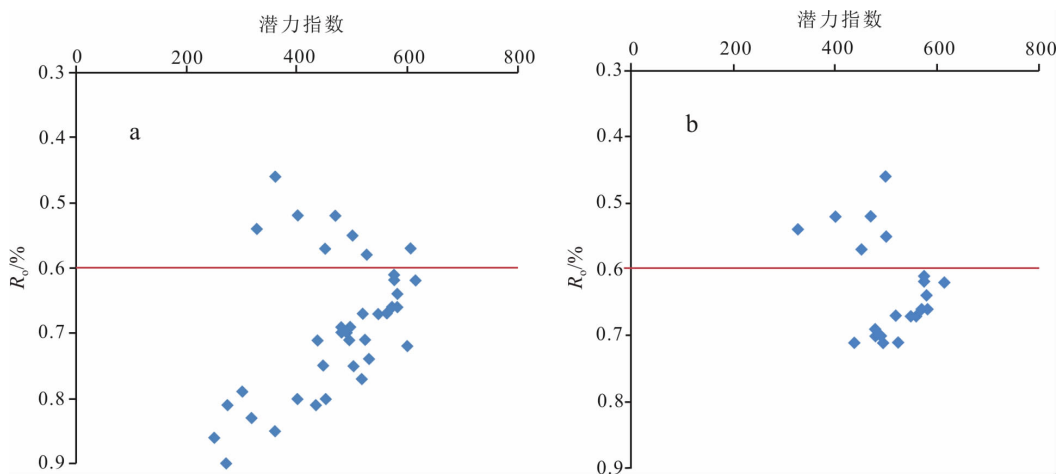


图 6 FN 油田烃源岩生烃潜力指数随 R_o 变化关系图

Fig. 6 Relationship between hydrocarbon potential index and R_o for source rocks of FN oil field

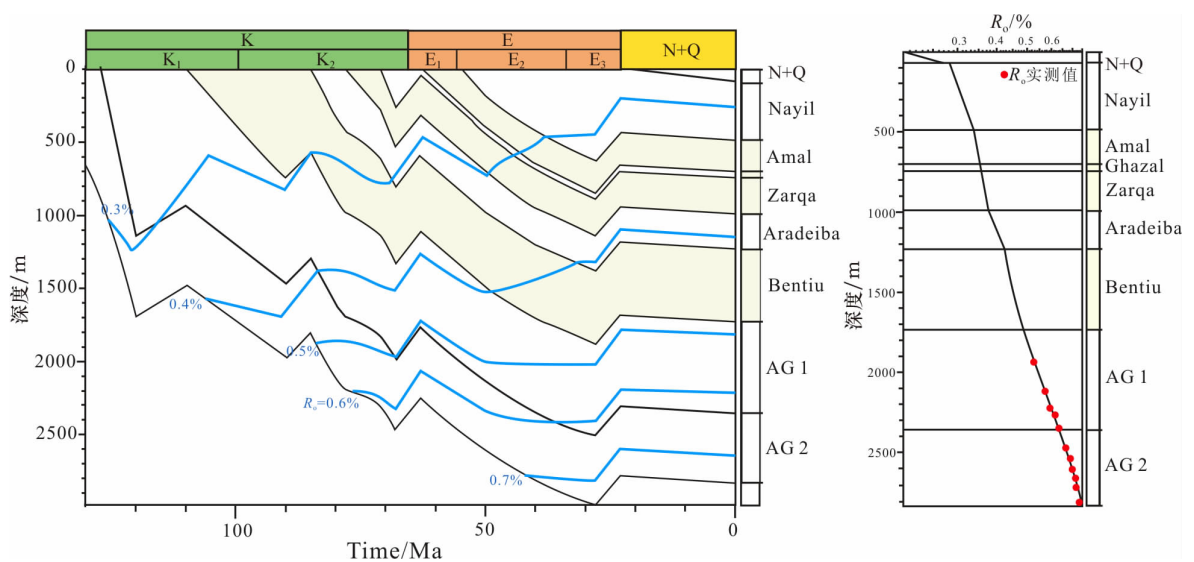


图 7 Fula 坳陷 FN-4 井埋藏-热演化史

Fig. 7 Burial and thermal evolution history of well FN-4 of Fula Sub-basin

5 FN 油藏成藏过程

Muglad 盆地为中非裂谷系右旋走滑作用下于 130 Ma 左右形成的裂谷盆地, 经过早、晚白垩世两期强烈断陷, 于新近纪进入热沉降阶段^[31]。位于 Muglad 盆地中的 Fula 坳陷临近剪切带, 受中非剪切带影响明显, 主要发育早白垩世、晚白垩世两期强烈断陷及第三纪弱裂陷期^[2-3] (图 7、图 8)。

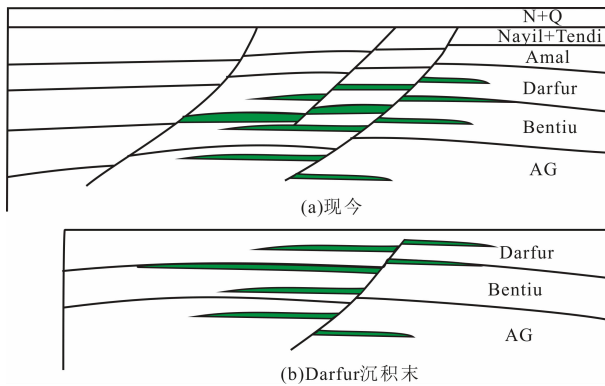


图 8 FN 油藏演化模式图

Fig. 8 Reservoir structure evolution of FN oil field

早白垩世为第一期断陷阶段, FN 油藏 Abu Gabra 组沉积明显受区域构造和中非剪切带活动的影响, 基底断块活动剧烈, 沉积物明显受到坳陷边界同生断层的控制, 沉降沉积速率高, 湖相富含有机质泥岩发育, 形成主力生油层。Abu Gabra 组沉积末构造抬升作用明显, 新的断裂发育, 且 Abu Gabra 顶面剥蚀明显, 但该时期烃源岩还未进入生烃门限, 没有发生油气运移作用。

早白垩世晚期为 Bentiu 热沉降阶段, 在同沉积作用下, Abu Gabra 组背斜圈闭幅度初具规模, 同时烃源岩埋深加大, 但是并未达到生烃门限, Bentiu 沉积末期构造再次抬升, Bentiu 顶部剥蚀, 该期抬升作用未对 Abu Gabra 组圈闭造成明显影响。

晚白垩世 Darfur 群沉积期为第二次断陷阶段, 这次断陷期盆地沉降明显大于热沉降阶段, 沉积厚度加大, Abu Gabra 组烃源岩进入生排烃门限, 含油气流体开始运移充注作用, 该期构造作用是 Fula 坳陷经历的一次重要构造过程, 构造圈闭形成和油气成藏各因素有效配置最重要的一次构造事件。Darfur 群广泛发育的泥岩形成良好的区域盖层, 构造圈闭幅度进一步加大, 在油气充注的作用下形成有效的油藏。

晚白垩世末 Darfur 群沉积末期发育的构造抬升运动使 Abu Gabra 组烃源岩生排烃作用停止, 发育新的断裂贯穿油藏, 前期充注的原油遭到一定破坏作用, 前文色质图中基线漂移、“鼓包”UCM 形成、25-降藿烷的出现都是油藏被破坏的证据, 该期构造作用是 Fula 坳陷经历的一次重要的油藏调整构造。

古近纪以来 Fula 坳陷再次接受沉积, 埋藏加大, 烃源岩开始二次生烃作用, 此次生烃作用时间长, 进入大量生油阶段, 也是最重要的一次生排烃作用过程。油气再次运移充注, 与油藏中残留的降解油发生混合作用。该油藏中的 FN-4 井 Bentiu 组第一期与第二期原油的充注比大约为 25 : 75, Abu Gabra 组 FN4-4 井原油三芳甾烷在芳烃中的含量为 1% 左右, 第一期与第二期原油的充注比小于为 10 : 90, 第二期充注的成熟原油占绝对优势, 形成现今原油分布格局。与该次成藏事件相关的构造圈闭是 Fula 坳陷油气勘探的重点。

6 结论

(1) Fula 坳陷是一个富油气坳陷, 纵向上主要发育白垩系 Abu Gabra 组、Bentiu 组、Aradeiba 组油藏, 油气性质差异明显。

(2) 白垩系原油普遍遭受生物降解作用, 原油“鼓包”UCM 明显, Bentiu 组原油 25-降藿烷普遍存在, 为严重降解程度, Aradeiba 组原油“鼓包”UCM 明显同时部分样品出现 25-降藿烷, 为中等—严重降解程度。白垩系 Abu Gabra 组、Bentiu 组、Aradeiba 组原油普遍存在“鼓包”UCM 与完整正构烷烃共存、正构烷烃与 25-降藿烷共存现象, 原油两期充注作用明显。

(3) 根据生排烃史及构造演化史, 晚白垩世烃源岩开始生排烃, 油气在运移充注作用下进入圈闭形成油藏, 晚白垩世末构造抬升作用下, 烃源岩停止生烃, 同时前期油藏遭受一定程度破坏, 古近纪以来烃源岩开始第二次生烃, 生排烃作用持续时间较长, 热演化程度较高, 为大量生油阶段, 该期生成的原油与前期残存的降解油发生混合作用, 且以第二期油气占主导, 从而形成现今油藏格局。

(4) 埋藏浅的 Aradeiba 组原油比埋藏深的 Bentiu 组原油遭受的生物降解程度低, 说明控制生物降解的不仅是埋深和温度, 地下水的循环作用对生物降解同样有明显的控制作用。

参考文献

- [1] DOU L R, CHENG D S, LI Z, et al. Petroleum geology of the Fula Sub-basin, Sudan[J]. *Journal of Petroleum Geology*, 2013, 36(1): 43-60.
- [2] 窦立荣, 程顶胜, 李志. 苏丹 Muglad 盆地 FN 油田沥青垫的确认及成因分析[J]. *地球化学*, 2004, 33(3): 310-316.
- [3] 吴冬, 朱筱敏, 李志, 等. 苏丹 Muglad 盆地 Fula 凹陷白垩纪断陷期沉积模式[J]. *石油勘探与开发*, 2015, 42(3): 319-327.
- [4] 窦立荣, 程顶胜, 张志伟. 利用油藏地质地球化学特征综合划分含油气系统[J]. *地质科学*, 2002, 37(4): 495-501.
- [5] 窦立荣, 张志伟, 程顶胜. 苏丹 Muglad 盆地区域盖层对油藏特征的控制作用[J]. *石油学报*, 2006, 27(3): 22-26.
- [6] MILNER C W D, ROGERS M A, EVANS C R. Petroleum transformations in reservoirs[J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 1977, 7: 101-153.
- [7] 王铁冠, 王春江, 何发岐, 等. 塔河油田奥陶系油藏两期成藏原油充注比率测算方法[J]. *石油实验地质*, 2004, 26(1): 74-79.
- [8] ROBINSON N, EGLINTON G, BRASSELL S C, et al. Dinoflagellate origin for sedimentary 4 α -methylsteroids and 5 α (H) stanols[J]. *Nature*, 1984, 308(29): 439-442.
- [9] PHILIP R P, FAN P, LEWIS C A, et al. Geochemical characteristics of oils from Chaidamu, Shanganning and Jianghan Basins, China[J]. *Journal of Southeast Asian Earth Science*, 1991, 5(1/2/3/4): 351-358.
- [10] 文志刚, 唐友军, 余秋华. 苏丹 Muglad 盆地六区块原油的地球化学特征[J]. *石油天然气学报(江汉石油学院学报)*, 2007, 29(4): 66-70.
- [11] 宋焕新, 文志刚, 包建平. 祁连山木里地区煤岩有机地球化学特征及生烃潜力[J]. *天然气地球科学*, 2015, 26(9): 1803-1813.
- [12] 李红磊, 张敏, 姜连, 等. 利用芳烃参数研究煤系烃源岩中重排藿烷成因[J]. *沉积学报*, 2016, 34(1): 191-199.
- [13] 田金强, 邹华耀, 徐长贵, 等. ETR 在严重生物降解油源对比中的应用: 以辽东湾地区 JX1-1 油田为例[J]. *石油天然气学报*, 2011, 33(7): 19-23.
- [14] 莫尔多万. 生物标记化合物指南[M]. 北京: 石油工业出版社, 1995.
- [15] 张敏. 地质体中高丰度重排藿烷类化合物的成因研究现状与展望[J]. *石油天然气学报(江汉石油学院学报)*, 2013, 35(9): 1-4.
- [16] 朱扬明, 梅博文, 傅家谟, 等. 塔里木原油饱和烃生物标志物分布特征[J]. *江汉石油学院学报*, 1997, 19(3): 24-29.
- [17] 朱扬明, 张春明, 张敏, 等. 沉积环境的氧化还原性对重排藿烷形成的作用[J]. *沉积学报*, 1997, 15(4): 104-108.
- [18] MAKEEN Y M, ABDULLAH W H, HAKIMI M H. Biological markers and organic petrology study of organic matter in the Lower Cretaceous Abu Gabra sediments (Muglad Basin, Sudan): origin, type and palaeoenvironmental conditions[J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 2015, 8(1): 489-506.
- [19] RADKE M, WELTE D H, WILLSCH H. Geochemical study on a well in the Western Canada Basin: relation of the aromatic distribution pattern to maturity of organic matter[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1982, 46: 1-10.
- [20] 包建平, 王铁冠, 周玉琦, 等. 甲基菲比值与有机质热演化的关系[J]. *石油天然气学报(江汉石油学院学报)*, 1992, 14(4): 3-18.
- [21] 宋焕新, 文志刚, 陈晓娜. 非洲 B 盆地轻质油地球化学特征与成因类型研究[J]. *石油天然气学报*, 2012, 34(8): 23-26.
- [22] PETERS K E, MOLDOWAN J M. The biomarkers guide: interpreting molecular fossils in petroleum and ancient sediments[M]. Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice Hall, 1993.
- [23] 高波, 刘文汇, 范明, 等. 塔河油田成藏期次的地球化学示踪研究[J]. *石油实验地质*, 2006, 28(3): 276-280.
- [24] 杨杰, 黄海平, 张水昌, 等. 塔里木盆地北部隆起原油混合作用半定量评价[J]. *地球化学*, 2003, 32(2): 105-111.
- [25] 王香增, 张丽霞, 高潮. 鄂尔多斯盆地寺湾地区延长组页岩气储层非均质性特征[J]. *地学前缘*, 2016, 23(1): 134-145.
- [26] 赵靖舟, 王芮, 耳闯. 鄂尔多斯盆地延长组长 7 段暗色泥页岩吸附特征及其影响因素[J]. *地学前缘*, 2016, 23(1): 146-153.
- [27] 郭凯, 曾溅辉, 刘涛涛, 等. 鄂尔多斯盆地陇东地区延长组含油气流体活动期次与石油充注史[J]. *现代地质*, 2013, 27(2): 382-388.
- [28] MAKEEN Y M, ABDULLAH W H, PEARSON M J, et al. Thermal maturity history and petroleum generation modeling for the Lower Cretaceous Abu Gabra Formation in the Fula Sub-basin, Muglad Basin, Sudan[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2016, 75: 310-324.
- [29] MAKEEN Y M, ABDULLAH W H, PEARSON M J et al. History of hydrocarbon generation, migration and accumulation in the Fula sub-basin, Muglad Basin, Sudan: implications of a 2D basin modeling study[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2016, 77: 931-941.
- [30] SWEENEY J J, BARNHAM A K. Evaluation of a simple model of vitrinite reflectance based on chemical kinetics[J]. *AAPG Bulletin*, 1990, 74: 1559-1570.
- [31] 肖坤叶, 赵健, 余朝华, 等. 中非裂谷系 Bongor 盆地强反转裂谷构造特征及其对油气成藏的影响[J]. *地学前缘*, 2014, 21(3): 172-180.