

DOI:10.13745/j.esf.sf.2023.6.19

# 中非 Muglad 盆地晚白垩世海侵及其对油气勘探的意义

肖 洪<sup>1,2</sup>, 李美俊<sup>1,2</sup>, 程顶胜<sup>3</sup>, 刘计国<sup>3</sup>, 李 晋<sup>4</sup>, 邢向荣<sup>5</sup>

1. 中国石油大学(北京) 油气资源与工程全国重点实验室, 北京 102249

2. 中国石油大学(北京) 地球科学学院, 北京 102249

3. 中国石油勘探开发研究院, 北京 100083

4. 中国石化石油勘探开发研究院, 北京 100083

5. 中国石油新疆油田公司 风城油田作业区油田地质研究所, 新疆 克拉玛依 834000

XIAO Hong<sup>1,2</sup>, LI Meijun<sup>1,2</sup>, CHENG Dingsheng<sup>3</sup>, LIU Jiguo<sup>3</sup>, LI Jin<sup>4</sup>, XING Xiangrong<sup>5</sup>

1. National Key Laboratory of Petroleum Resources and Engineering, China University of Petroleum(Beijing), Beijing 102249, China

2. College of Geosciences, China University of Petroleum(Beijing), Beijing 102249, China

3. PetroChina Research Institute of Petroleum Exploration and Development, Beijing 100083, China

4. SINOPEC Research Institute of Petroleum Exploration & Production, Beijing 100083, China

5. Research Institute of Oilfield Geology, Fengcheng Oilfield, PetroChina Xinjiang Oilfield Company, Karamay 834000, China

XIAO Hong, LI Meijun, CHENG Dingsheng, et al. Late Cretaceous transgression in the Muglad Basin of Central Africa and its implication for oil and gas exploration. *Earth Science Frontiers*, 2024, 31(3): 352-359

**Abstract:** The global transgression during the Late Cretaceous was previously believed to have primarily affected the northern African continent, with the Muglad Basin in the central African region thought to have been unaffected by this event. Within the basin, only one set of organic-rich source rock was known to have formed, namely the lacustrine mudstone of the Lower Cretaceous Abu Gabra Formation. This study collected mudstone samples from both the Upper Cretaceous Darfur Group and the Lower Cretaceous Abu Gabra Formation. Analysis revealed that the mudstones from the Upper Cretaceous Darfur Group exhibit a distinct distribution of dinosteranes and tricyclic terpanes compared to the lacustrine source rocks of the Lower Cretaceous Abu Gabra Formation, showing an abundance of dinosteranes and C<sub>23</sub> tricyclic terpanes, which are likely products of transgression. This study suggests that the mudstones from the Upper Cretaceous Darfur Group were influenced by seawater from the Neo-Tethys Ocean, indicating that the global transgression in the Late Cretaceous extended into the Muglad Basin in Central Africa. Furthermore, the presence of organic-rich marine mudstones in the Darfur Group suggests that the basin not only accumulated the lacustrine source rock of the Abu Gabra Formation but also potentially deposited a set of marine source rock. The discovery of marine oil in the K-1 well further confirms the hydrocarbon generation potential of marine source rock in the Darfur Group, pointing to new prospects for petroleum exploration in the Muglad Basin in the future.

**Keywords:** transgression; Late Cretaceous; molecular fossils; dinosteranes; tricyclic terpanes; marine oil

**摘 要:** 晚白垩世全球大规模海侵被认为仅淹没了非洲大陆北部地区,而位于非洲中部的 Muglad 盆地则未遭受海侵的影响,且盆地内仅发育一套富有机质的烃源岩,即下白垩统 Abu Gabra 组湖相泥岩。本次研究采集了上白垩统 Darfur 群泥岩样品,在上白垩统 Darfur 群泥岩中检测到完全不同于下白垩统 Abu Gabra 组湖相泥岩的甲藻甾烷和三环萜烷组成,主要表现为高丰度的甲藻甾烷异构体和 C<sub>23</sub> 三环萜烷丰度优势,认为其是海侵作用的产物。依据分析结果,本文首次提出上白垩统 Darfur 群沉积期可能受到新特提斯洋海水的影响,进一步揭示了晚白垩世全球海侵在非洲大陆的海水淹没范围已抵达

收稿日期:2022-11-27;修回日期:2023-06-29

基金项目:国家自然科学基金项目(42202134);中国石油大学(北京)科研基金项目(2462023YJRC010)

作者简介:肖 洪(1990—),男,博士,讲师,从事有机地球化学研究。E-mail: xiaohong@cup.edu.cn

中非大陆 Muglad 盆地。此外,上白垩统 Darfur 群海相富含有机质泥岩的存在,揭示研究区不仅发育下白垩统 Abu Gabra 组湖相烃源岩,还发育一套潜在的海相烃源岩。而 K-1 井海相原油的发现进一步证实了上白垩统 Darfur 群海相烃源岩的生烃潜力,海相原油可能是研究区未来油气勘探的新领域。

**关键词:**海侵;晚白垩世;分子标志化合物;甲藻甾烷;三环萜烷;海相原油

**中图分类号:**P618.13 **文献标志码:**A **文章编号:**1005-2321(2024)03-0352-08

## 0 引言

非洲 Muglad 盆地位于中西非走滑剪切断裂带的南侧,是一个发育在前寒武系变质基底之上的中—新生代断陷湖盆<sup>[1-2]</sup>。长期以来,人们一直认为晚白垩世全球海侵事件仅淹没了非洲大陆北部,最南至 Muglad 盆地北部的 Al Kufra 和 Khartoum 盆地<sup>[3]</sup>,而 Muglad 盆地未受到北部特提斯洋海水的影响,仅发育陆相沉积地层<sup>[4-5]</sup>。勘探结果表明 Muglad 盆地已发现的原油属于同一族群,源于研究区唯一的有效烃源岩,即下白垩统 Abu Gabra 组湖相泥质烃源岩<sup>[6-8]</sup>。因此,现在的勘探方向聚焦于 Abu Gabra 组(生)—Bentiu 组(储)—Darfur 群(盖)成藏组合<sup>[6]</sup>。然而,最新的研究发现,在个别原油和沉积物样品中检测到完全不同于 Abu Gabra 组湖相烃源岩的生物标志化合物组合<sup>[9-10]</sup>,推测可能源自上白垩统 Darfur 群富有机质沉积物<sup>[10]</sup>。目前,关于上白垩统 Darfur 群富有机质沉积物中特征性分子标志化合物组成及其成因的研究迄今鲜有报道。鉴于此,本次研究对比了上白垩统 Darfur 群与下白垩统 Abu Gabra 组代表性样品的甲藻甾烷和三环萜烷的分布差异,分析了其潜在的地质—地球化学意义,提出了 Muglad 盆地晚白垩世沉积期可能遭受海水影响,揭示了全球晚白垩世海侵在非洲大陆的淹没范围扩展至中非大陆 Muglad 盆地。此外,上白垩统 Darfur 群海相烃源岩及其原油(K-1 井原油)的发现,揭示了研究区不仅发育 Abu Gabra 组湖相烃源岩,且海相原油可能是研究区未来潜在的勘探领域。

## 1 地质背景

Muglad 盆地位于中非裂谷系的中部,盆地面积为  $11.2 \times 10^4 \text{ km}^2$ ,最大沉积厚度可达 15 km,以白垩系为主,新生界较薄。盆地整体呈北西—南东走向,东南窄而西北宽,呈一个楔形,并终止于中非剪切带<sup>[1,11]</sup>。据区域构造应力场转变特征和盆地充填史,

Muglad 盆地分别在早白垩世、晚白垩世和古近纪经历了三次裂谷旋回<sup>[6,12-14]</sup>。在早白垩世裂谷期沉积了 Abu Gabra 组和 Bentiu 组,其中 Abu Gabra 组主要发育河流、三角洲和湖泊沉积相,其下部岩性以砂岩和含砾砂岩为主,上部岩性主要为湖相富含有机质暗色泥岩和砂泥互层<sup>[15-16]</sup>,且已被证实为盆地主力生油岩<sup>[5-7]</sup>;而 Bentiu 组为一大套的河流相块状砂岩夹薄层泥岩<sup>[16]</sup>,已被证实为盆地主力产层<sup>[17-18]</sup>。晚白垩世裂谷期发育了 Darfur 群,可划分为 Baraka 组、Ghazal 组、Zarqa 组和 Aradeiba 组,发育三角洲—湖泊沉积体系<sup>[15-17]</sup>,其中 Aradeiba 组泥岩是盆地水面最大范围时期的沉积,形成了全盆地的一套区域泥岩盖层<sup>[18-20]</sup>。古近纪裂谷期发育了 Amal、Nayil 和 Tendi 组。

## 2 样品与实验条件

研究共采集了 Muglad 盆地 2 件上白垩统 Darfur 群 Baraka 组和 Aradeiba 组(图 1<sup>[7,10,12]</sup>)样品,分别源自 A-G-1 井和 H-C-1 井;9 件下白垩统 Abu Gabra 组样品,源自 H-1 井和 S-S-1 井。实验分析测定在中国石油大学(北京)油气资源与探测国家重点实验室完成。

将岩石样品粉碎至 80 目,称取 50~100 g 粉末样品,使用二氯甲烷进行索氏抽提 48 h,获得沥青“A”。利用 20~30 mL 石油醚溶解 20~50 mg 沥青“A”,静置 12 h 沉淀沥青质,收集沥青质和滤液。滤液经旋转蒸发后,采用硅铝层析柱对浓缩后的滤液进行组分分离,依次用石油醚、二氯甲烷+石油醚(2:1,体积比)、二氯甲烷+甲醇(93:7,体积比),先后收集到饱和烃、芳烃及非烃馏分。

采用气相色谱—质谱连用仪器型号为 Agilent 6980 GC-5975i MS。色谱柱为 HP-5MS 弹性石英毛细柱(30 m×0.125 mm×0.125  $\mu\text{m}$ ),进样温度为 300  $^{\circ}\text{C}$ ,载气为 99.999% He,流速为 1 mL/min。升温程序如下:初始温度 50  $^{\circ}\text{C}$ ,恒温 1 min 后,以 20  $^{\circ}\text{C}/\text{min}$  的速率升温至 120  $^{\circ}\text{C}$ ,再以 3  $^{\circ}\text{C}/\text{min}$  的速率升温至 310  $^{\circ}\text{C}$ ,并维持恒温 25 min。采用 EI 电离方式,电离能量为 70 eV。

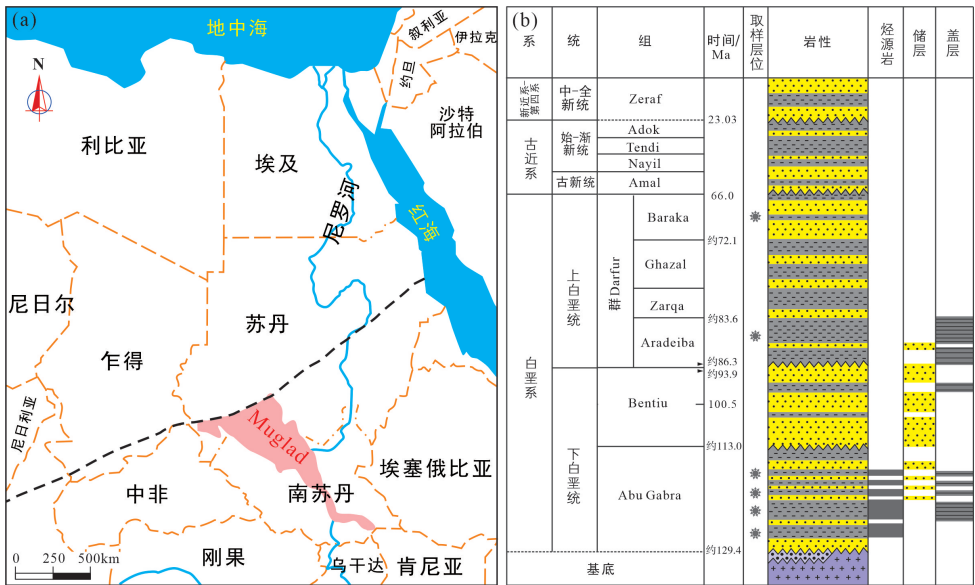


图 1 Muglad 盆地地理位置及地层柱状图  
(据文献[7,10,12])

Fig.1 Geological location and stratigraphic column of the Muglad Basin. Adapted from [7,10,12].

3 代表性化合物的分布

3.1 甲藻甾烷的检测与鉴定

C<sub>30</sub> 4-甲基甾烷包括 C<sub>30</sub> 4-甲基-24-乙基胆甾烷和 C<sub>30</sub> 4,23,24-三甲基基胆甾烷,其中 C<sub>30</sub> 4,23,24-三甲基基胆甾烷又称之为甲藻甾烷。基于饱和烃 *m/z* 231 质量色谱图检测分析,并对比前人的分析结果<sup>[21-22]</sup>,在 Muglad 盆地上白垩统 Darfur 群沉积物中检测到四个 4 $\alpha$  构型的甲藻甾烷(D1-D4) (图 2b);但在下白垩统 Abu Gabra 组富有机质湖相沉积物中并未见检测到该类化合物(图 2a)。

为了进一步明确甲藻甾烷的结构特征,对比分析了其分子离子峰、基峰离子以及其他特征离子碎片等。如图 3 所示可知,四个甲藻甾烷化合物的特征性离子碎片具有非常相似的特征,表现为分子离子峰均为 M<sup>+</sup> 414,基峰离子均为 *m/z* 231,还具有较强的特征离子碎片 *m/z* 399、*m/z* 98、*m/z* 123、

*m/z* 163、*m/z* 290 等。对比前人研究的出峰位置(图 2b)和质谱图特征(图 3)<sup>[22-25]</sup>,明确了化合物 D1-D4 分别为 20R-4 $\alpha$ ,23S,24S-三甲基胆甾烷、20R-4 $\alpha$ ,23S,24R-三甲基胆甾烷、20R-4 $\alpha$ ,23R,24R-三甲基胆甾烷和 20R-4 $\alpha$ ,23R,24S-三甲基胆甾烷。

3.2 三环萜烷的分布特征

三环萜烷系列化合物普遍存在于烃源岩抽提物和原油中,常见的同系物分布范围为 C<sub>19</sub>-C<sub>29</sub>,最高碳数可检测到 C<sub>5</sub><sup>[26-27]</sup>。在 Muglad 盆地抽提物饱和烃 *m/z* 191 质量色谱图中可检测到 C<sub>19</sub>-C<sub>29</sub> 三环萜烷,缺失 C<sub>22</sub> 和 C<sub>27</sub> 三环萜烷,且上、下白垩统沉积物中三环萜烷的分布模式完全不同。其中,下白垩统 Abu Gabra 组富有机质湖相沉积物中表现为 C<sub>21</sub> 三环萜烷的丰度优势,而长链 C<sub>28</sub> 和 C<sub>29</sub> 三环萜烷的相对丰度较低(图 4a)。上白垩统 Darfur 群沉积物中则表现为 C<sub>23</sub> 三环萜烷的丰度优势,且具有相对较高丰度的长链 C<sub>28</sub> 和 C<sub>29</sub> 三环萜烷(图 4b)。

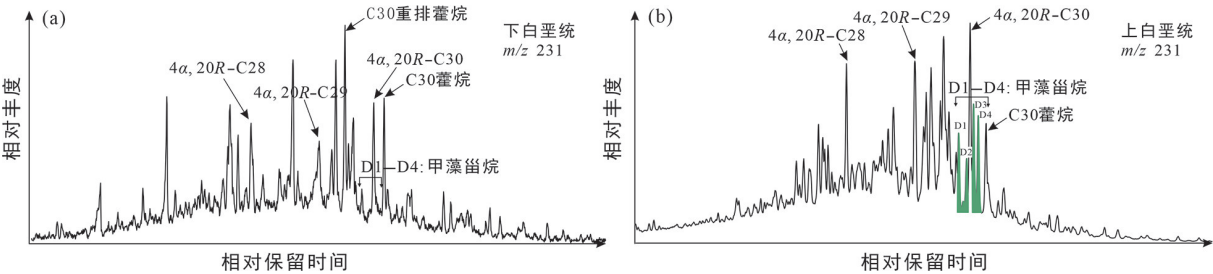
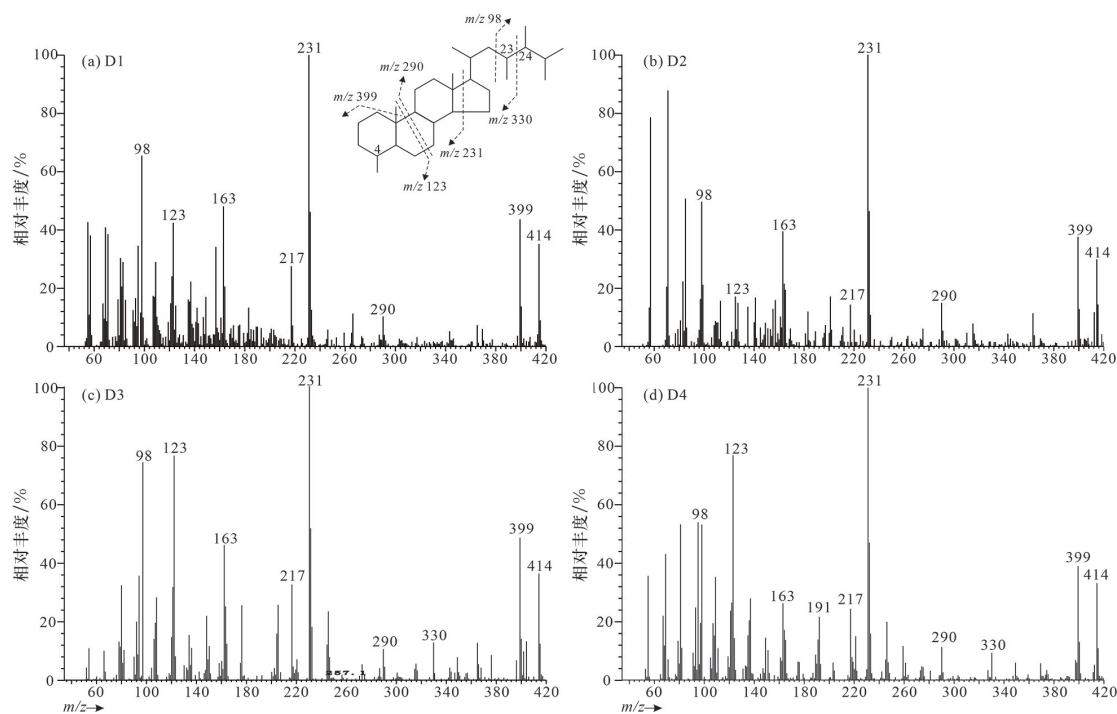


图 2 下(a)、上(b)白垩统代表性样品中甲藻甾烷的分布特征

Fig.2 Distribution of dinosteranes in the Lower(a) and Upper(b) Cretaceous sediments



化合物 D1-D4 的分布见图 2b, 其中 D1 为 20R-4 $\alpha$ , 23S, 24S -三甲基胆甾烷, D2 为 20R-4 $\alpha$ , 23S, 24R -三甲基胆甾烷, D3 为 20R-4 $\alpha$ , 23R, 24R -三甲基胆甾烷, D4 为 20R-4 $\alpha$ , 23R, 24S -三甲基胆甾烷。

图 3 上白垩统沉积物中甲藻甾烷的质谱图

Fig.3 Mass spectra of four 4 $\alpha$ ,23,24-trimethylcholestanes (dinosteranes) isomers

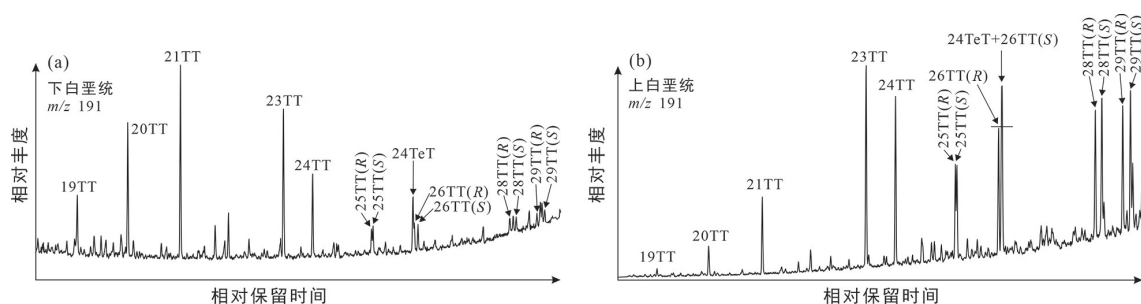


图 4 下(a)、上(b)白垩统代表性样品中三环萜烷的分布特征

Fig.4 Distribution of tricyclic terpanes in the Lower(a) and Upper(b) Cretaceous sediments

## 4 讨论

### 4.1 甲藻甾烷的地质意义

通常,甲藻甾烷在晚三叠世以来的海洋沉积物中大量存在,与沟鞭藻化石孢囊的出现相吻合,因此甲藻甾烷既可以约束沉积物的时代(即晚三叠世以来),又可以指示海相沉积环境<sup>[23,28]</sup>。虽然甲藻甾烷及其异构体 4-甲基-24-乙基胆甾烷可以在海洋沉积物中共存<sup>[23-24,29]</sup>,但高丰度的 4-甲基-24-乙基胆甾烷仅存在于中-新生代淡水湖盆沉积物中,而甲藻甾烷在该沉积环境下往往缺失或丰度极低<sup>[28]</sup>。因而,甲藻甾烷往往作为典型海相沉积环境

的生物标志化合物<sup>[2]</sup>。侯读杰等<sup>[21]</sup>在我国苏北盆地第三系和松辽盆地上白垩统陆相沉积岩及其原油中检测到丰富的甲藻甾烷,指出其为海侵作用的产物<sup>[22,25]</sup>。本次研究的 Muglad 盆地上白垩统沉积物中检测到甲藻甾烷系列化合物,从分子化石的角度揭示了盆地在晚白垩世受了海水的影响。同时,前人在 Kng W-1 井上白垩统沉积物中发现了大量的沟鞭藻化石<sup>[30]</sup>,进一步证实了 Muglad 盆地在晚白垩世为浅海沉积环境,具有丰富的甲藻输入。

### 4.2 三环萜烷的地质意义

虽然三环萜烷系列化合物的生物前驱物,目前尚还没有统一认识<sup>[26,31-34]</sup>,但是短链的 C<sub>19</sub>-C<sub>23</sub> 三环萜烷的分布模式被认为与有机质沉积环境和生源组

成密切相关<sup>[35]</sup>。通常,海相和咸水湖相环境的沉积有机质中以  $C_{23}$  三环萜烷占优势<sup>[32,35-37]</sup>,淡水-微咸水湖相环境的沉积有机质则往往以  $C_{21}$  三环萜烷为主<sup>[35,38]</sup>。而低碳数  $C_{19}$  和  $C_{20}$  三环萜烷被认为可能源自二萜类先质,指示浅水沉积环境中高等植物的生源贡献<sup>[35,39-40]</sup>,尤其在煤系样品或煤成油中富含低碳数三环萜烷<sup>[35,38,41]</sup>。最近,肖洪等<sup>[35]</sup>采集了200余件国内外不同沉积盆地、不同年代、不同沉积环境的烃源岩和原油样品,分析其  $C_{19}$ - $C_{23}$  三环萜烷的分布特征,构建了一个可判识海相/咸湖相、典型湖相、河流/三角洲/淡水湖相以及沼泽相的三角图图版(图 5<sup>[35]</sup>)。本次所分析的 Muglad 盆地下白垩

统 Abu Gabra 组样品具有相对高丰度的  $C_{21}$  三环萜烷,属于 Zone 2 淡水湖相沉积环境(图 5<sup>[35]</sup>)。而上白垩统 Darfur 群样品具有明显的  $C_{23}$  三环萜烷的丰度优势,表明形成于 Zone 1 海相或咸水湖相(图 5)。结合上白垩统 Darfur 群样品中丰富的甲藻甾烷,可判断其沉积于海相环境。

4.3 三环萜烷相关参数

此外,Tao 等<sup>[36]</sup>构建了三环萜烷和四环萜烷相关参数,有效地划分了塔里木、吐哈、鄂尔多斯和柴达木盆地的海相、咸水湖相和淡水湖相等不同沉积环境烃源岩生成的原油。由图 6<sup>[36]</sup>可知,本次所分析的 Muglad 盆地下白垩统 Abu Gabra 组样品与上白垩统 Darfur 群样品差异明显。其中,下白垩统 Abu Gabra 组样品具有较高的  $C_{24}TeT/(C_{24}TeT+C_{26}TT)$  比值,较低的  $C_{23}TT/(C_{23}TT+C_{30}H)$ 、 $C_{29}TT/C_{30}H$  和  $C_{28}TT/C_{30}H$  比值,与 Tao 等<sup>[36]</sup>所分析的富陆源有机质输入的淡水湖相样品分布一致。而上白垩统 Darfur 群样品表现出较高的  $C_{23}TT/(C_{23}TT+C_{30}H)$ 、 $C_{29}TT/C_{30}H$  和  $C_{28}TT/C_{30}H$  比值,较低的  $C_{24}TeT/(C_{24}TeT+C_{26}TT)$  比值,与 Tao 等<sup>[36]</sup>所分析的咸湖/海相沉积环境的样品分布特征一致。

近年,Xiao 等<sup>[42]</sup>也采用多个与三环萜烷相关的参数,划分了非洲尼日尔 Termit 盆地下白垩统三角洲过渡相与海相沉积环境的烃源岩及其原油。由图 7可知,下白垩统 Abu Gabra 组样品具有较高的  $C_{19+20}TT/C_{23}TT$  和  $C_{24}TeT/C_{26}TT$  比值,较低的  $C_{23}TT/C_{21}TT$  比值,与 Xiao 等<sup>[42]</sup>所分析的富陆源有机质输入的过渡相烃源岩的分布一致。而上

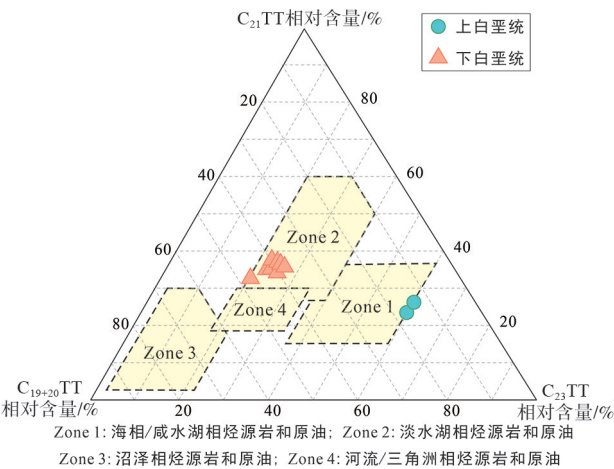


图 5 上、下白垩统代表性样品中  $C_{19+20}$ 、 $C_{21}$  和  $C_{23}$  三环萜烷相对含量三角图 (据文献<sup>[35]</sup>)

Fig.5 A ternary diagram of relative abundance of  $C_{19+20}TT$ ,  $C_{21}TT$ , and  $C_{23}TT$  of the Upper and Lower Cretaceous sediments. Adapted from <sup>[35]</sup>.

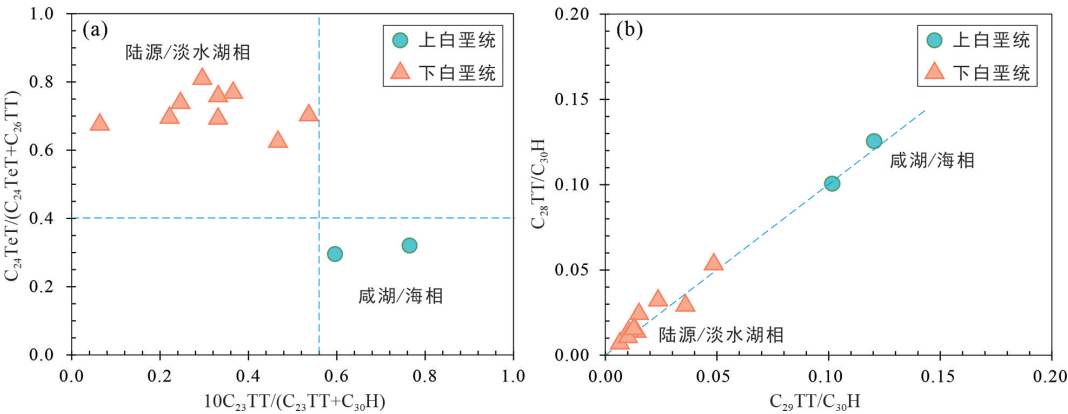


图 6 上、下白垩统代表性样品在  $10C_{23}TT/(C_{23}TT+C_{30}H)$  与  $C_{24}TeT/(C_{24}TeT+C_{26}TT)$  (a) 和  $C_{29}TT/C_{30}H$  与  $C_{28}TT/C_{30}H$  (b) 相关图中的分布特征 (据文献<sup>[36]</sup>)

Fig.6 Cross plots of  $10C_{23}TT/(C_{23}TT+C_{30}H)$  vs.  $C_{24}TeT/(C_{24}TeT+C_{26}TT)$  (a) and  $C_{29}TT/C_{30}H$  vs.  $C_{28}TT/C_{30}H$  (b) in the Upper and Lower Cretaceous sediments. Adapted from <sup>[36]</sup>.

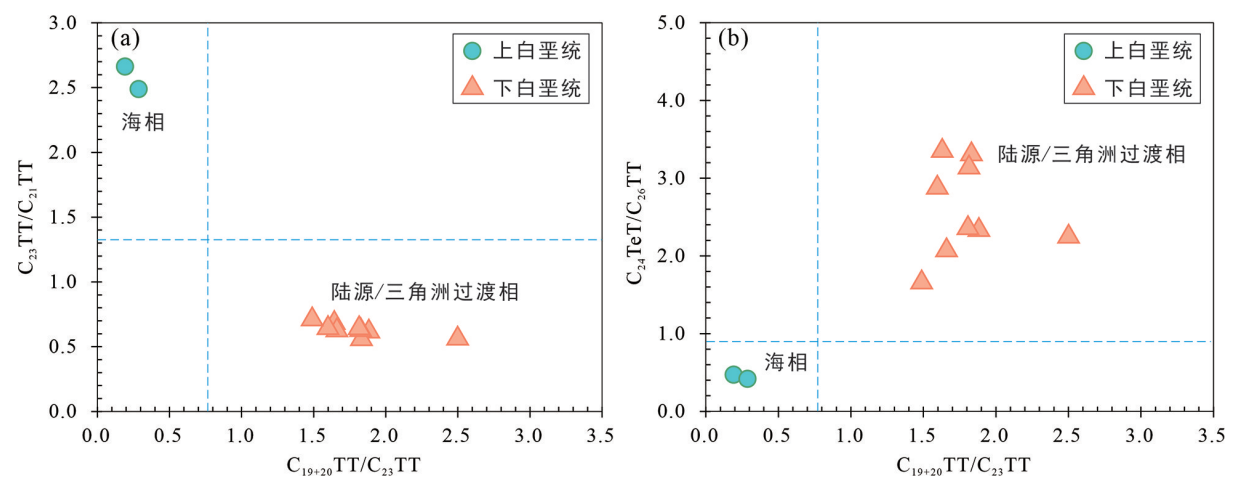


图 7 上、下白垩统代表性样品在  $C_{19+20} TT/C_{23} TT$  与  $C_{23} TT/C_{21} TT$ (a) 和  $C_{19+20} TT/C_{23} TT$  与  $C_{24} TeT/C_{26} TT$ (b)相关图中的分布特征 (据文献[42])

Fig.7 Cross plots of  $C_{19+20} TT/C_{23} TT$  vs.  $C_{23} TT/C_{21} TT$  (a) and  $C_{19+20} TT/C_{23} TT$  vs.  $C_{24} TeT/C_{26} TT$  (b) in the Upper and Lower Cretaceous sediments. Adapted from [42].

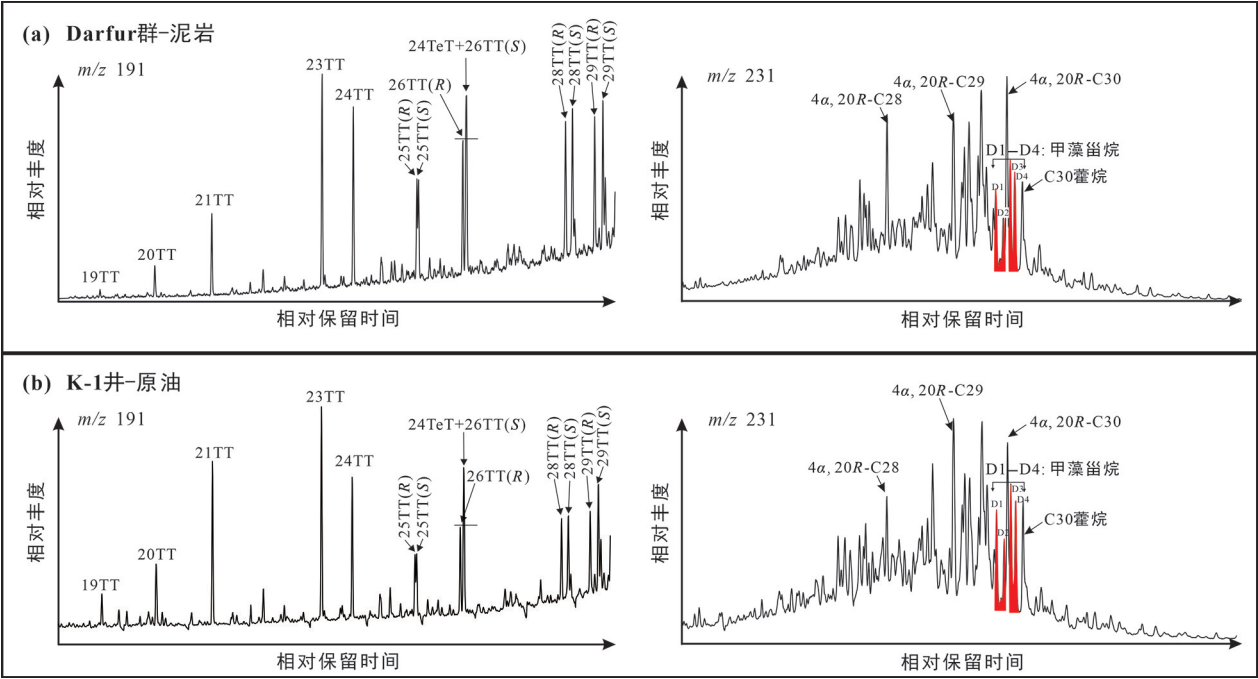


图 8 上白垩统 Darfur 群泥岩与 K-1 井原油中三环萜烷和甲藻甾烷对比

Fig.8 Comparative analysis of tricyclic terpanes and dinosteranes distribution in the Darfur Group sediments and K-1 well crude oil

白垩统 Darfur 群样品表现出较高的  $C_{23} TT/C_{21} TT$  比值、较低的  $C_{19+20} TT/C_{23} TT$  和  $C_{24} TeT/C_{26} TT$  比值,与 Xiao 等<sup>[42]</sup>所分析的海相烃源岩/原油的分布特征一致。据此表明,Muglad 盆地上白垩统沉积期可能受到海水的影响。

4.4 对油气勘探的意义

大量调研发现,早期所有研究均认为研究区仅发育一套下白垩统 Abu Gabra 组湖相富含有机质烃源岩,且所有开采的原油均源自该套烃源岩,属于同

一族群原油<sup>[6-8]</sup>。因此,在实际勘探中更加关注 Abu Gabra 组(生)–Bentiu 组(储)–Darfur 群(盖)成藏组合<sup>[6,20]</sup>。然而,本次所分析的上白垩统 Darfur 群海相富含有机质泥岩的存在,首次揭示了研究区不仅发育下白垩统 Abu Gabra 组湖相烃源岩,还发育一套潜在的海相烃源岩。此外,本次研究还发现了 Muglad 盆地中有一件生物标志化合物组成完全不同于其他原油和 Abu Gabra 组湖相烃源岩的原油,即 K-1 井原油。如图 8 所示,通过对比上白垩统 Dar-

fur 群海相泥岩与 K-1 井原油中三环萜烷与甲藻甾烷可知,二者分布特征完全一致,可判定 K-1 井原油源自上白垩统 Darfur 群海相烃源岩供烃,属于另一原油族群,即海相原油族群。

本次所分析的 Muglad 盆地上白垩统 Darfur 群 Baraka 组(A-G-1 井)和 Aradeiba 组(H-C-1 井)泥岩样品总有机碳(TOC)含量分别为 1.04%和 1.10%,均大于 1.0%。从 TOC 含量来看,Darfur 群富有机质泥岩属于好烃源岩范畴(据石油天然气行业标准 SY/T 5735—2019)。而 Darfur 群泥岩的最高热解峰温( $T_{max}$ )较低,处于 429~435 °C,属于未熟—低熟阶段。这种差异的原因主要是 A-G-1 井和 H-C-1 井均位于斜坡带<sup>[10]</sup>,地层埋藏深度相对较浅,在盆地中心埋深更大的区带,Darfur 群烃源岩必然已进入成熟阶段。由此可推断,Muglad 盆地海相原油可能是研究区未来油气勘探的新领域。

## 5 结论

(1)上白垩统 Darfur 群沉积物中检测到丰富的甲藻甾烷和  $C_{23}$  三环萜烷的丰度优势,指出了该沉积地层可能受到新特提斯洋海水的影响。

(2)根据 Muglad 盆地的地理位置可知,晚白垩世全球海侵在非洲大陆的影响范围达到了中非大陆 Muglad 盆地。

(3)上白垩统 Darfur 群海相烃源岩和 K-1 井海相原油的发现,揭示了 Muglad 盆地存在一类新的油气资源,可能是研究区未来油气勘探的新领域。

## 参考文献

- [1] FAIRHEAD J D. Mesozoic plate tectonic reconstructions of the central South Atlantic Ocean: the role of the West and Central African rift system [J]. *Tectonophysics*, 1988, 155 (1/2/3/4): 181-191.
- [2] SCHULL T J. Rift basins of Interior Sudan: petroleum exploration and discovery[J]. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 1988, 72(10): 1128-1142.
- [3] AN K X, CHEN H L, LIN X B, et al. Major transgression during Late Cretaceous constrained by basin sediments in northern Africa: implication for global rise in sea level[J]. *Frontiers of Earth Science*, 2017, 11(4): 740-750.
- [4] GENIK G J. Petroleum geology of rift basins in Niger, Chad, and Central African Republic[J]. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 1993, 77(8): 1405-1434.
- [5] 程顶胜, 窦立荣, 张光亚, 等. 中西非裂谷盆地白垩系两类优质烃源岩发育模式[J]. *地质学报*, 2020, 94(11): 3449-3460.
- [6] 童晓光, 窦立荣, 田作基, 等. 苏丹穆格莱特盆地的地质模式和成藏模式[J]. *石油学报*, 2004, 25(1): 19-24.
- [7] DOU L R, CHENG D S, ZHI L, et al. Petroleum geology of the Fula Sub-basin, Muglad Basin, Sudan[J]. *Journal of Petroleum Geology*, 2013, 36(1): 43-59.
- [8] MAKEEN Y M, WAN H A, HAKIMI M H, et al. Geochemical characteristics of crude oils, their asphaltene and related organic matter source inputs from Fula oilfields in the Muglad Basin, Sudan[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2015, 67: 816-828.
- [9] MAKEEN Y M, ABDULLAH W H, HAKIMI M H, et al. Source rock characteristics of the Lower Cretaceous Abu Gabra Formation in the Muglad Basin, Sudan, and its relevance to oil generation studies[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2015, 59: 505-516.
- [10] XIAO H, LI M J, LIU J G, et al. Oil-oil and oil-source rock correlations in the Muglad Basin, Sudan and South Sudan: new insights from molecular markers analyses[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2019, 103: 351-365.
- [11] YASSIN M A, HARIRI M M, ABDULLATIF O M, et al. Evolution history of transtensional pull-apart, oblique rift basin and its implication on hydrocarbon exploration: a case study from Sufyan Sub-basin, Muglad Basin, Sudan[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2017, 79: 282-299.
- [12] MCHARGUE T R, HEIDRICK T L, LIVINGSTON J E. Tectonostratigraphic development of the Interior Sudan rifts, Central Africa[J]. *Tectonophysics*, 1992, 213(1/2): 187-202.
- [13] 窦立荣, 潘校华, 田作基, 等. 苏丹裂谷盆地油气藏的形成与分布: 兼与中国东部裂谷盆地对比分析[J]. *石油勘探与开发*, 2006, 33(3): 255-261.
- [14] 汪望泉, 窦立荣, 张志伟, 等. 苏丹福拉凹陷转换带特征及其与油气的关系[J]. *石油勘探与开发*, 2007, 34(1): 124-126.
- [15] 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.
- [16] 范乐元, 吴嘉鹏, 刁宛, 等. 断陷湖盆浅水三角洲沉积特征: 以 Muglad 盆地 Unity 凹陷 Aradeiba 组为例[J]. *地学前缘*, 2021, 28(1): 155-166.
- [17] 冉怀江, 范乐元, 孔庆东, 等. 苏丹 Muglad 盆地中南部西斜坡沉积层序及有利地层圈闭预测[J]. *地学前缘*, 2021, 28(1): 131-140.
- [18] 刘淑文, 李志, 潘校华, 等. 苏丹富油气凹陷岩性油气藏区带评价探讨: 以 Muglad 盆地 Fula 凹陷为例[J]. *中国石油勘探*, 2017, 22(2): 90-98.
- [19] 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): 309-316.
- [20] 窦立荣, 张志伟, 程顶胜. 苏丹 Muglad 盆地地区盖层对油藏

- 特征的控制作用[J]. 石油学报, 2006, 27(3): 22-26.
- [21] 侯读杰, 王铁冠. 陆相湖盆沉积物和原油中的甲藻甾烷[J]. 科学通报, 1995, 40(4): 333-335.
- [22] 侯读杰, 王铁冠, 张一伟, 等. 中国东部第三系陆相沉积中的甲藻甾烷: 海侵指相的标志物? [J]. 地质论评, 1997, 43(5): 524-528.
- [23] SUMMONS R E, VOLKMAN J K, BOREHAM C J. Dinosterane and other steroidal hydrocarbons of dinoflagellate origin in sediments and petroleum[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1987, 51(11): 3075-3082.
- [24] GOODWIN N S, MANN A L, PATIENCE R L. Structure and significance of C30 4-methyl steranes in lacustrine shales and oils[J]. *Organic Geochemistry*, 1988, 12(5): 495-506.
- [25] HOU D J, LI M W, HUANG Q H. Marine transgression events in the gigantic freshwater lake Songliao: paleontological and geochemical evidence[J]. *Organic Geochemistry*, 1987, 31(7/8): 763-768.
- [26] DE GRANDE S M B, AQUINO NETO F R, MELLO M R. Extended tricyclic terpanes in sediments and petroleum[J]. *Organic Geochemistry*, 1993, 20(7): 1039-1047.
- [27] MOLDOWAN J M, SEIFERT W K, GALLEGOS E J. Identification of an extended series of tricyclic terpanes in petroleum[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1983, 47(8): 1531-1534.
- [28] SUMMONS R E, THOMAS J, MAXWELL J R, et al. Secular and environmental constraints on the occurrence of dinosterane in sediments[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1992, 56(6): 2437-2444.
- [29] MOLDOWAN J M, SEIFERT W K, GALLEGOS E J. Relationship between petroleum composition and depositional environment of petroleum source rock[J]. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 1985, 69(8): 1255-1268.
- [30] GEBBAYIN I M O F A, ZHONG N N, LUO Q Y, et al. New insights on Muglad's Cretaceous source rocks: a paleogeographic review & organic geochemical characterization, Muglad basin, Sudan[C]// IOP conference series: Earth and environmental science. Global Scientific Research Association, Wuhan 2019: 012030.
- [31] OURISSON G, ALBRECHT P, ROHMER M. Predictive microbial biochemistry: from molecular fossils to procaryotic membranes[J]. *Trends Biochemical Sciences*, 1982, 7(7): 236-239.
- [32] AQUINO NETO F R, TRENDLE J M, RESTLÉ A, et al. Occurrence and formation of tricyclic terpanes in sediments and petroleum[C]// BJØRØY M, ALBRECHT P, CORNFORD C, et al. *Advances in organic geochemistry 1981*. Chichester: Wiley, 1983: 659-667.
- [33] SIMONEIT B R T, LEIF R N, AQUINO NETO F R, et al. On the presence of tricyclic terpene hydrocarbons in permian tasmanite algae[J]. *Naturwissenschaften*, 1990, 77(8): 380-383.
- [34] SIMONEIT B R T, SCHOELL M, DIAS R F, et al. Unusual carbon isotope compositions of biomarker hydrocarbons in a Permian tasmanite[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1993, 57(17): 4205-4211.
- [35] 肖洪, 李美俊, 杨哲, 等. 不同环境烃源岩和原油中 C<sub>19</sub>-C<sub>23</sub> 三环萜烷的分布特征及地球化学意义[J]. *地球化学*, 2019, 48(2): 161-170.
- [36] TAO S Z, WANG C Y, DU J G, et al. Geochemical application of tricyclic and tetracyclic terpanes biomarkers in crude oils of NW China[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2015, 67: 460-467.
- [37] 陈哲龙, 柳广弟, 卫延召, 等. 准噶尔盆地玛湖凹陷二叠系烃源岩三环萜烷分布样式及影响因素[J]. *石油与天然气地质*, 2017, 38(2): 311-322.
- [38] 朱扬明. 塔里木盆地陆相原油的地球化学特征[J]. *沉积学报*, 1997, 15(2): 26-30.
- [39] EKWEZOR C, STRAUSS O. Tricyclic terpanes in the Athabasca oil sands: Their geochemistry[C]// BJØRØY M, ALBRECHT P, CORNFORD C, et al. *Advances in organic geochemistry 1981*. Chichester: Wiley, 1983: 746-766.
- [40] ZUMBERGE J E. Prediction of source rock characteristics based on terpene biomarkers in crude oils: a multivariate statistical approach[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1987, 51(6): 1625-1637.
- [41] 朱扬明, 梅博文, 金迪威. 塔里木盆地中生界煤层的地球化学特征[J]. *新疆石油地质*, 1998, 19(1): 3-5.
- [42] XIAO H, WANG T G, LI M J, et al. Geochemical characteristics of Cretaceous Yogou Formation source rocks and oil-source correlation within a sequence stratigraphic framework in the Termit Basin, Niger[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2019, 172: 362-372.