

文章编号: 1001-6112(2007)06-0572-05

# 苏丹穆格莱德盆地苏夫焉凹陷含油气系统特征

张亚敏<sup>1,2</sup>

(1. 西部矿产资源与地质工程教育部重点实验室, 西安 710054;

2. 长安大学 地球科学与国土资源学院, 西安 710054)

**摘要:** 苏丹穆格莱德(Muglad)盆地位于中非巨型走滑断裂带的东端部, 是一个大型中生代含油气裂谷盆地。苏夫焉(Sufyan)凹陷位于该盆地北区块的最北侧, 下白垩统阿布加布拉(Abu Gabra)组是烃源岩、Abu Gabra 组的三角洲砂体和本蒂组(Bentiu)组的河道砂岩是主要储集层; 上白垩统达尔富尔(Darfur)群为区域盖层; 油气圈闭类型主要为断背斜、断鼻和断块等。苏夫焉凹陷含油气系统纵向上划分为二个亚系统, 第一套沉积旋回 Abu Gabra 组自生自储自盖亚系统及第一套和第二套沉积旋回组成的下生上储盖亚系统, 即 Abu Gabra 组生油岩、Bentiu 组河道厚砂岩储层和 Darfur 群泥岩盖层组合, 它们都是本区有利的勘探组合。该凹陷中部构造带是油气有利聚集区带, 有些良好的勘探前景。

**关键词:** 半地堑; 有效烃源岩; 含油气系统; 苏夫焉凹陷; 穆格莱德盆地; 苏丹

中图分类号: TE122.1

文献标识码: A

## PETROLEUM SYSTEM IN THE SUFYAN DEPRESSION OF MUGLAD BASIN IN SUDAN

Zhang Yamin<sup>1,2</sup>

(1. Key Laboratory of Western China's Mineral Resources

and Geological Engineering, Ministry of Education, Xi'an, Shaanxi 710054, China;

2. School of Earth Sciences and Resources Management, Chang'an University, Xi'an, Shaanxi 710054, China)

**Abstract:** The Muglad Basin in Sudan is located the eastern boundary of Central Africa Strike-slip Fault Zone, is a large Mesozoic petroliferous rift basin. The Sufyan Depression is located most north end in this basin. Lower Cretaceous Abu Gabra Formation is an effective hydrocarbon source rock. Favorable reservoir in this area is the Abu Gabra Formation channel sandbody in delta or fan delta. Upper Cretaceous Darfur Group is the region cap rock. The hydrocarbon trap types have fault anticline, fault nose and fault block etc. The Sufyan Depression has two petroleum subsystems vertically, among which Abu Gabra Fm subsystem has favorable assemblage with self generating, collecting and sealing. While the other petroleum subsystem is composed of Abu Gabra Fm source rock, Bentiu Fm channel sandstone reservoir and Darfur Group shale seal. Both they are favorable for exploration. The Central structure belt of the Sufyan Depression is most favorable for exploration.

**Key words:** half-horst; effective hydrocarbon source rock; petroleum system; the Sufyan Depression; the Muglad Basin; Sudan

### 1 地质概况

穆格莱德(Muglad)盆地位于苏丹共和国中南部, 面积约  $15 \times 10^4 \text{ km}^2$ , 区域构造位于中非巨型走滑断裂带的东端部<sup>[1,2]</sup>, 是一个大型中生代含油气裂谷盆地<sup>[3~5]</sup>。苏夫焉(Sufyan)凹陷位于该盆地

的最北部(图 1), 为中非走滑断裂带内较大的“菱形”拉分凹陷, 面积近  $5000 \text{ km}^2$ , 呈东西方向展布, 南断北超, 南界以“之”字型断层与托马特凸起相接, 断距超万米, 凹陷向北抬升, 超覆于巴巴努萨隆起之上<sup>[6]</sup>。该凹陷次级构造单元自南向北可进一步分为 4 个次级构造单元: 南部次凹、中部构造带、

收稿日期: 2006-11-07; 修订日期: 2007-11-19。

作者简介: 张亚敏(1958—), 男(汉族), 河南中牟人, 博士, 从事石油地质研究和教学工作。

基金项目: 中国石油天然气集团公司科技攻关项目(EDR/CN-01-102)。

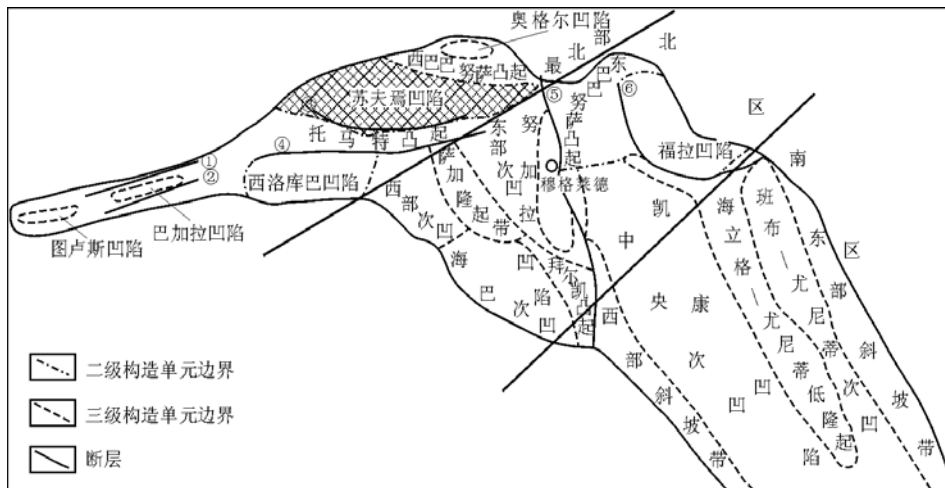


图1 苏丹穆格莱德盆地构造纲要

①巴北断层;②巴南断层;③托北断层;④托南断层;⑤努东断层;⑥福西断层

Fig. 1 Tectonic map of the Muglad Basin in Sudan

北部斜坡带、北部次凹。近期勘探获得重大突破,部署在中部构造带上的 Sufyan C-1 井获日产超过百吨的高产油流,控制数千万吨的地质储量。

凹陷内沉积岩最大厚度近 10 km,自下而上依次发育着下白垩统阿布加布拉<sup>[7]</sup>(Abu Gabra)组、本蒂乌(Bentiu)组,上白垩统达尔富尔<sup>[8]</sup>(Darfur)群、阿马勒组(Amal)组,古近系森纳组(Senna)组、腾迪组(Tendi)组和新近系阿多克—扎拉夫(Adok—Zeraf)组,其中 Abu Gabra 组发育了优质生油岩,厚度可达 6 000 m,在该组上段见到良好的油气显示。凹陷中心有利生油岩埋深大于 3 500 m, Abu Gabra 组自生自储自盖为主力含油层系。

## 2 石油地质要素分析

### 2.1 烃源岩

苏夫焉凹陷暗色泥岩发育的地层有 Abu Gabra 组、Darfur 群、Tendi 组,其中 Darfur 群和 Tendi 组厚度小,有机质含量低,埋藏浅,大多不成熟。Abu Gabra 组中上部为一套半深湖—深湖相暗色泥岩,厚度大,分布面积为 2 000 km<sup>2</sup>,生烃能力强。通过有机地球化学分析, Abu Gabra 组生油岩母质类型为 II<sub>1</sub>(腐植腐泥质)和 I 型(蜡质腐泥质);生油岩有机质丰度高,平均有机碳含量为 1.69%,最大达 2.8%;生油潜量(S<sub>1</sub>+S<sub>2</sub>)上段为 5.24 mg/g,中段为 20.96 mg/g;氯仿沥青“A”上段为 0.082%,下段为 0.141%;总烃上段为 667.5×10<sup>-6</sup>,下段为 1 032.5×10<sup>-6</sup>。综合评价结果: Abu Gabra 组整体为好生油岩,中段生油岩为好到极好,上段生油岩中等到好。

### 2.2 储集层

#### 2.2.1 储层类型

主要有 Abu Gabra 组的三角洲砂体、水下扇砂体、滩坝砂体和 Bentiu 组的河道砂岩。

Abu Gabra 组的三角洲砂体在每个层序的水进期和水退期均发育,又以后者为主,包括三角洲前缘水道砂和三角洲平原河道砂。

三角洲前缘水道砂:平面上多呈扇形散开,规模较大,砂体向浅湖推进,呈指状;砂体分布范围广,砂体间连通性差,单层厚度小,多在 10 m 以内;以中—细砂岩为主,分选较好,砂岩成分以石英为主,高岭石胶结,局部绿泥石胶结,孔隙度在 15% 以上。

三角洲平原河道砂:平面上多呈条带分布,砂体连通性好,单层厚度大;粗—中砂岩,分选中等,以高岭石胶结,孔隙度在 10% 以上;后期成岩作用主要是机械压实、胶结作用,埋深 3 500 m 以上的储层物性较好。

水下扇砂体发育于层序的水进期,以扇中辫状水道和扇端的叠合砂岩最为有利,呈透镜状。

滩坝砂体发育于缓坡处滨—浅湖地区,呈条带状或席状平行岸线分布,以中、细砂为主,分选好。

#### 2.2.2 有利储集区

纵向上以夹于两次湖浸之间的水退三角洲砂体最有利,即 Abu Gabra 组的上部水退体系域沉积。

凹陷北部、中部、西部分布的三角洲前缘区及南部水下扇或浊积砂发育区是有利区,该区储层之上发育良好的泥质沉积,起到有效封盖作用。凹陷西部滨湖地区及凹陷北、中部、东部浅湖滩坝砂体

发育地区为较有利区;凹陷内深湖、半深湖区储层不发育,是较差储集区。

通过对钻井岩心的分析,区内砂岩成分以石英、长石为主,岩屑、重矿物含量低,基质以粘土矿物为主。颗粒以点接触为主,孔隙度在 10% 以上。后期成岩作用主要有机械压实、胶结作用、石英次生加大,砂岩受其影响孔隙度随埋深增加而减小,埋深 3 500 m 以上的储集层较为有利,以下的储集层因石英、长石溶蚀作用,发育次生孔隙,但孔隙度一般较小<sup>[9]</sup>。

### 2.3 盖层

苏夫焉凹陷在其演化过程中由于较低的地温,其沉降量不大,坳陷期泥质沉积不发育。早白垩世第一次深陷期形成的 Abu Gabra 组湖相泥岩,单层厚度大于 100 m;随着水进而分布广,并由于多次湖泛在纵向上发育多套泥岩盖层(密集段泥岩),是一套最有利的区域性盖层。晚白垩世第二次断陷强度减弱,Darfur 群以滨浅湖沉积为主,泥岩发育,为区域上第二套盖层,平面上在凹陷的南部、中部一带发育相对较好。古近纪的最后一次断陷,仅形成 Tendi 组泛滥平原泥质沉积,是局部盖层。

整体上,Abu Gabra 组为好盖层,Darfur 群较好,Tendi 组次之。

### 2.4 圈闭

油气圈闭主要类型有断背斜、断鼻、断块等。在 Abu Gabra 组沉积期,凹陷北部、西北部还发育有地层圈闭,南部发育岩性圈闭。

#### 2.4.1 构造圈闭

苏夫焉凹陷在其演化过程中,受剪切—拉伸应力作用,褶皱微弱,缺乏大型正向构造,构造圈闭的幅度低,且破碎,主要构造圈闭类型有背斜、断鼻、断块,它们在第一、第二断陷期已发育成形<sup>[10,11]</sup>。

#### 2.4.2 地层圈闭

包括地层超覆圈闭和地层不整合圈闭。在 Abu Gabra 组沉积期,凹陷西北部、北部为广阔斜坡地形,南部多个沉降中心之间存在水下古隆起。水进期间,地层向斜坡和古隆起逐层超覆,并被最大湖泛期形成的密集段泥岩覆盖,形成地层超覆圈闭。

另外,Bentiu 组顶不整合发育,并且上覆 Darfur 群湖相泥岩,当地层倾斜且侧向遮挡时,可形成不整合圈闭。

#### 2.4.3 岩性圈闭

Abu Gabra 组沉积时,每次水进期,在凹陷南部边界大断层下降盘近深湖区发育一系列透镜状水下扇砂体,被暗色湖相泥岩包围,形成砂岩透镜

体或浊积砂体圈闭。

## 3 含油气系统研究

### 3.1 成藏条件分析

苏夫焉凹陷内尚未发现有火山岩分布及异常热源区,凹陷的现今地温梯度为 2.15 °C/hm。这种狭窄的拉分凹陷在伸展过程中由于侧向热传导,导致热流损失严重,古热场较低(热流值为 1.0 HFU 左右),地温升高较慢,有机质热演化主要依赖于上覆地层的增厚<sup>[12,13]</sup>。在主沉降区,断陷早期充填的 Abu Gabra 组湖相暗色泥岩处于中等到晚成熟阶段。Sufyan-1 井 Abu Gabra 组上段  $R_o$  为 0.47%~0.52%,中段为 0.52%~0.54%,最高热解峰温( $T_{max}$ )值大于 440 °C,成烃转化率最大为 300 mg/g。以  $R_o$  值 0.5% 为生油门限,苏夫焉凹陷的生油门限深度为 3 000 m。根据盆地模拟结果,Abu Gabra 组中段的主力烃源岩在 Bentiu 组沉积末期(97 Ma)进入生油门限(图 2),生油岩处于低成熟阶段;在 Amal 组沉积末(白垩纪末,56 Ma)进入生烃高峰期,生成的烃类排入与烃源岩相邻的砂岩层后,在压实水流和浮力等作用下,在砂体输导层中,由凹陷沉降中心向四周运移,油气运移范围大致为 3 000 km<sup>2</sup>(图 3),遇到开启断层时,向上进入 Bentiu 组砂岩,并沿 Bentiu 顶不整合面继续运移至各种圈闭中聚集成藏(图 4)。由于 Darfur 群泥岩封闭条件好,形成高产富集油气藏。

由构造演化研究可知,该区局部构造在 Darfur 群沉积期已定形,圈闭形成于油气大规模运移之前,具备聚集油气的时空条件。当烃类进入圈闭后,开始聚集成藏,并保存至今。研究表明,含油气系统关键时刻在 56 Ma(白垩纪末),含油气系统持续时间为 132~56 Ma,含油气系统保存时间为 56 Ma 至今(图 5)。

### 3.2 含油气系统特征

苏夫焉凹陷存在一个与 Abu Gabra 组烃源岩相关的含油气系统,其平面范围面积近 3 000 km<sup>2</sup>,界定了有效勘探范围,南部次凹和中部构造带在其范围之内。该含油气系统在平面上东、西有 2 个次级沉降、沉积中心,高水位期连成一体,低水位期又相互独立。因此该含油气系统又可分为东、西 2 个部分,并有各自的生烃中心,其中东部已钻井,在 Abu Gabra 组已获高产油气流,证明了该部含油气系统的存在;西部具有和东部相同的石油地质条件,并且埋深更大,因此,含油气系统的西部潜力巨大,不可低估。

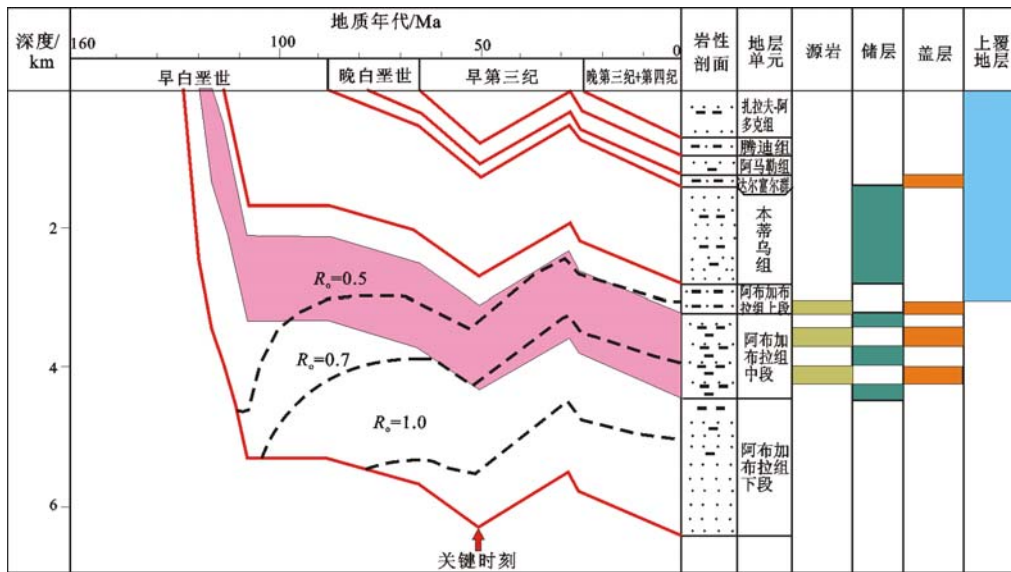


图 2 苏丹穆格莱德盆地苏夫焉凹陷埋藏史

Fig. 2 History match map of the Sufyan Depression of the Muglad Sudan Basin

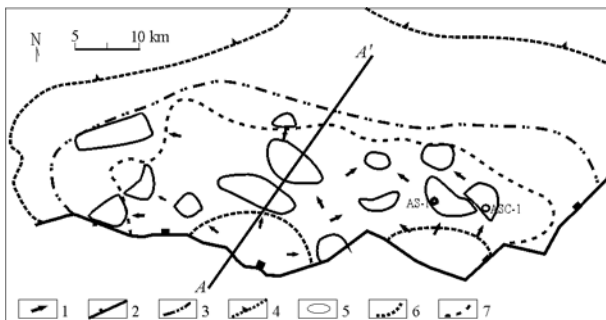


图 3 苏丹穆格莱德盆地苏夫焉凹陷含油气系统平面图

- 1. 油气运移方向; 2. 断层; 3. 含油气系统边界;
- 4. 尖灭线; 5. 圈闭; 6. 生气窗; 7. 成熟生油岩

Fig. 3 Hydrocarbon bearing system plane map of the Sufyan Depression of the Muglad Basin in Sudan

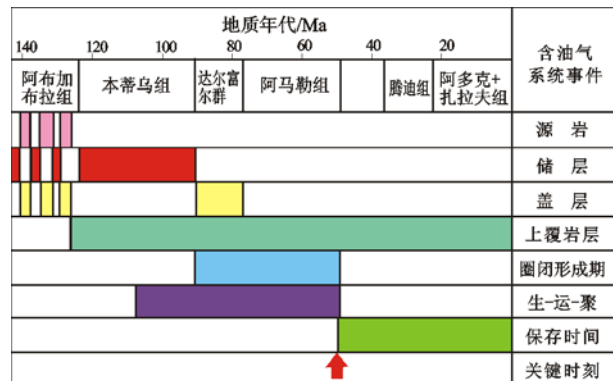


图 5 苏丹穆格莱德盆地苏夫焉凹陷含油气系统事件

Fig. 5 Hydrocarbon bearing system map of the Sufyan Depression of the Muglad Basin in Sudan

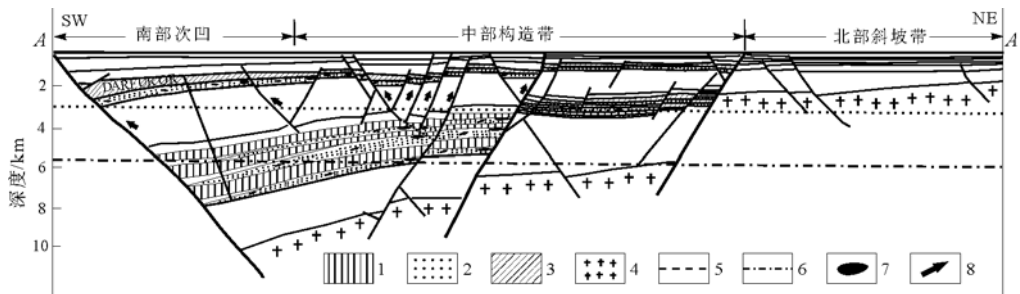


图 4 苏丹穆格莱德盆地苏夫焉凹陷含油气系统剖面

剖面位置见图 3。

- 1. 有效烃源岩+盖层; 2. 储集层; 3. 盖层; 4. 基底; 5. 生油窗顶; 6. 生气窗顶; 7. 预测油藏; 8. 运移方向

Fig. 4 Hydrocarbon bearing system section map of the Sufyan Depression of the Muglad Basin in Sudan

纵向上,有效烃源岩只有 Abu Gabra 组一套 (Darfur 群烃源岩成熟度较低、质量差、分布范围很有限),供油单元仅一个(或一个含油气系统)。

根据本区生储盖组合特征,与该套烃源岩相关还可划分出 2 个亚系统:1) Abu Gabra 组自生自储自盖亚系统; 2) Abu Gabra 组生、Bentiu 组储、Darfur

群盖下生上储亚系统,该区多层兼探往往能提高勘探成功率<sup>[14]</sup>。

### 3.3 油气聚集区特征

该含油气系统包括多个油气聚集区带,将有利储集相带分布图叠合在含油气系统平面分布图上,综合岩性和构造等相关因素,可得出有利油气聚集分布区。

凹陷中部构造带,南部次凹东南地区为有利油气聚集区。本系统最有利的成藏模式是中部构造带断鼻—断背斜成藏组合。该构造带形成早,早白垩世已基本形成,沿凹陷中部呈条带状分布,长期处于油气运移的有利方向上并且是有效生油岩分布区,也是三角洲发育的部位,储盖组合、圈闭条件好,因此是本系统内最具潜力的成藏组合,十分利于捕获油气。

凹陷中部构造带西部、东部地区,南部次凹东西 2 个沉降中心之间的地区,也是油气运移的指向区,并且发育有局部构造圈闭,也是较有利油气聚集区。

南部次凹内深湖发育区及有效生油岩分布范围之外地区,前者寻找浊积砂体困难大,后者远离油源,为较差油气聚集区。

## 4 结论

1) 苏夫焉凹陷为一夹持于 2 条右行走滑断裂中的拉分凹陷,长期受剪切拉张应力作用,发育一系列雁行式排列的张扭性断层,其中北西西向和北东向 2 组断裂控制了凹陷的发育,使其呈“菱形”,具有独特的含油气系统。

2) Abu Gabra 组为一套半深湖—深湖相暗色泥岩,有机质丰度高,类型以 I—II<sub>1</sub> 型为主,在白垩纪末期开始大规模生、排烃,凹陷内油气圈闭在白垩纪早、中期已形成,两者时间空间匹配条件良好。

3) 苏夫焉凹陷存在一个与 Abu Gabra 组烃源岩相关的含油气系统,纵向上存在 Abu Gabra 组自生自储自盖和 Abu Gabra 组生、Bentiu 组储和

Darfur 群盖 2 个亚系统;平面上分为东、西 2 个部分,并各有生烃中心。含油气系统关键时刻为 56 Ma,有利油气聚集区位于中部构造带中部,精细落实各级断层和微幅度构造及砂体分布,是发现高产富集油气藏的关键。

致谢:本文在编写过程中得到中原油田地质研究院何碧竹、张新建高级工程师的大力帮助,在此深表感谢!

### 参考文献:

- 1 Chull T J. Rift basins of interior Sudan: petroleum exploration and discovery[J]. AAPG Bulletin, 1988, 72:1128~1142
- 2 Allen P A, Allen J R. Basin analysis: principles and applications[M]. Oxford: Blackwell Scientific Publications, 1990
- 3 Genik G J. Petroleum geology of Cretaceous—Tertiary rift basin in Niger, Chad and Central African Republic[J]. AAPG Bulletin, 1993, 78(8): 1405~1434
- 4 张亚敏,陈发景. 穆格莱德盆地形成特点与勘探潜力[J]. 石油与天然气地质,2002,23(3):236~240
- 5 张亚敏,漆家福. 穆格莱德盆地构造地质特征与油气富集[J]. 石油与天然气地质,2007,28(5):669~674
- 6 Schandelmeyer H, Pudlo D. The Central African Fault Zone (CAFZ) in Sudan: a possible continental transform fault[J]. Berl Geowiss Abh A,1990,120(1):31~44
- 7 李德江,朱筱敏,杨俊生. 苏丹 Muglad 盆地 Fula 坳陷白垩系 Abu Gabra 组地震相研究[J]. 石油与天然气地质 2007,28(1): 55~62
- 8 姜 辉,于兴河,李庆明等. Muglad 盆地 Nugara 坳陷东凹 Darfur 群地震层序格架和地震相[J]. 油气地质与采收率,2006,13(5):24~27
- 9 马永生,傅 强,郭彤楼等. 川东北地区普光气田长兴—飞仙关气藏成藏模式与成藏过程[J]. 石油实验地质,2005,27(5):455~460
- 10 童晓光,窦立荣,田作基等. 苏丹穆格莱德盆地的地质模式和成藏模式[J]. 石油学报,2004,25(1):21~26
- 11 张亚敏. 中非 Muglad 盆地北区构造特征[J]. 石油勘探与开发,2007,34(4):502~507
- 12 黄先雄,王升兰. 苏丹裂谷盆地高酸值原油成因分析[J]. 油气地质与采收率,2006,13(5):43~46
- 13 黄泽光,高长林. 南华北中生代火山岩与前渊盆地[J]. 石油实验地质,2006,28(1):1~7
- 14 张亚敏,陈发景. 穆格莱德盆地构造调节带与勘探前景[J]. 中国石油勘探,2006,11(3):79~83