

# 东非共轭型大陆边缘油气成藏差异性分析

许志刚, 韩文明, 孙玉梅

(中海油研究总院, 北京 100027)

**摘要:**被动大陆边缘张裂形成过程中,在陆缘两侧很容易形成共轭型大陆边缘。大西洋两侧的西非和南美便是典型的例子,由于具有共轭的成因演化,因而具有相似的油气成藏条件。受此启示,推测东非大陆边缘也是在东西冈瓦纳大陆裂解背景下形成的,也应该发育类似大西洋共轭型大陆边缘。通过研究东非构造演化,东非海岸北段—孤岛区具备共轭型大陆边缘的特性,两侧均经历了早期裂谷和晚期被动陆缘的沉积和构造演化,油气地质条件十分相似,勘探成效也证实它们是东非大陆边缘油气最富集的区域。但共轭两侧油气类型差异较大,东非海岸北段以天然气为主,孤岛区则以稠油沥青为主,初步研究认为后期构造的改造和破坏作用直接导致了东非共轭型大陆边缘油气成藏的差异。

**关键词:**东非大陆边缘;构造演化;共轭;成藏差异

**中图分类号:**TE122.3

**文献标志码:**A

**文章编号:**1672-1926(2014)05-0732-07

**引用格式:**Xu Zhigang, Han Wenming, Sun Yumei. Differences in petroleum geological conditions of conjugate continental margin in East Africa[J]. Natural Gas Geoscience, 2014, 25(5): 732-738.

[许志刚, 韩文明, 孙玉梅. 东非共轭型大陆边缘油气成藏差异性分析[J]. 天然气地球科学, 2014, 25(5): 732-738.]

## 0 引言

在地质学领域,共轭往往蕴含着相似的演化成因联系。被动大陆边缘在张裂过程中,往往更容易形成共轭型被动大陆边缘,大西洋两侧的西非与南美就是非常典型的例子。而与之对比的东非被动大陆边缘,也是在东西冈瓦纳大陆裂解背景下形成的,只是板块之间在裂解时间上并不一致,先后早晚和应力转换的差异使东非大陆边缘共轭的特性并不是特别明显。一侧以东非海岸为主体,相对完整;而与之共轭的是由逐步漂移出去的南极洲、马达加斯加、塞舌尔和印度等板块组成,十分零散,有的也相距甚远,如南极洲与印度。

但通过研究,还是可以探寻到东非大陆边缘的一些共轭特性。回顾东非大陆边缘形成历史,马达加斯加岛早期漂移的起点位于现今东非海岸北段的坦桑尼亚到拉姆—索马里盆地附近,在漂移过程中,

东非海岸北段与马达加斯加和塞舌尔组成的孤岛区形成了东非相对完整的共轭型大陆边缘(图 1, 表 1)。通过近一个世纪的油气勘探,该共轭型大陆边缘集中了东非大陆边缘 90% 以上的油气资源。尤其在 2011—2012 年,相继在拉姆盆地、坦桑尼亚盆地和鲁玛盆地的深水获得天然气大发现,累计地质储量达到  $5 \times 10^{12} \text{ m}^3$ 。而与之共轭的另一侧,早在 1936 年,马达加斯加穆伦达瓦盆地便发现了 Tsimiro 稠油田和 Bemolanga 沥青和油砂,地质储量就达到了  $5.3 \times 10^8 \text{ t}$ 。在塞舌尔盆地也发现了大量沥青球。两侧丰富的油气资源吸引了全世界油气勘探的目光。然而,一侧为天然气,另一侧以稠油沥青为主,这种油气分布一方面可能与烃源岩有关,另一方面可能与后期构造的改造和剥蚀作用导致的成藏条件差异有关。本文以探讨共轭型大陆边缘的形成过程为切入点,深入共轭两侧盆地的烃源层系、储层及圈闭类型等油气地质条件,解剖导致油气成藏差异

收稿日期:2013-06-03;修回日期:2013-08-05.

基金项目:国家科技重大专项“非洲、中东重点勘探区油气地质评价及关键评价技术研究”(编号:2011ZX05030-003)资助.

作者简介:许志刚(1977-),男,湖北汉川人,工程师,博士,主要从事海外油气勘探综合地质研究. E-mail: x\_zhigang@126.com.

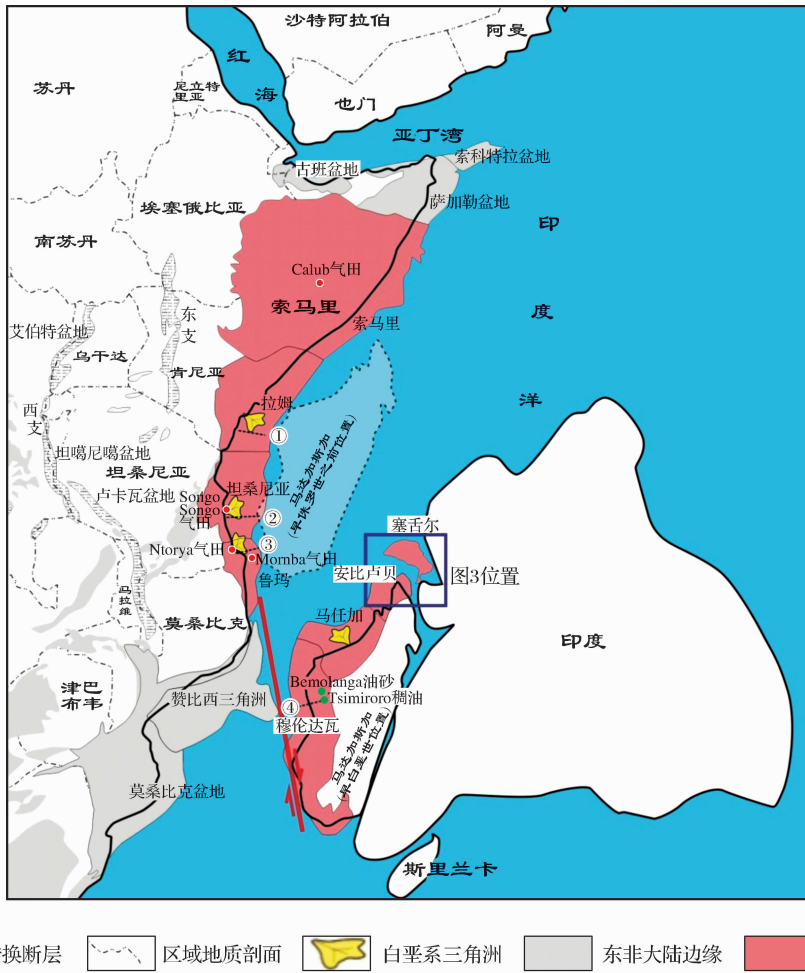


图 1 早白垩世东非共轭型大陆边缘分布特征

Fig. 1 Distribution of conjugate continental margin of East Africa in Lower Cretaceous

表 1 东非共轭型大陆边缘盆地含油气情况

Table 1 Petroleum conditions of conjugate continental margin in east Africa

地区	盆地	含油气情况	主要储层类型	典型油气田	典型油气田地质储量
东非海岸北段	索马里(Somali)	天然气田	二叠系砂岩	Calub 气田	$(283.2 \sim 849.6) \times 10^8 \text{ m}^3$
	拉姆(Lamu)	天然气田	白垩系—新近系三角洲—深水浊积扇	Mbawa 气田	$73.6 \times 10^8 \text{ m}^3$
	坦桑尼亚(Tanzania)	天然气田	白垩系三角洲	Songo Songo 气田	$283.2 \times 10^8 \text{ m}^3$
	鲁玛(Ruwuma)	天然气田	古近系—新近系三角洲—深水浊积扇	Mamba 气田	$4\,248 \times 10^8 \text{ m}^3$
孤	穆伦达瓦(Morondava)	稠油	二叠系—侏罗系砂岩	Tsimiroro 稠油田	$3 \times 10^8 \text{ t}$
		沥青		Bemolanga 沥青和油砂	$2.3 \times 10^8 \text{ t}$
岛	马任加(Majunga)	显示	侏罗系—白垩系砂岩	\	0
	安比卢贝(Ambilobe)	显示	侏罗系—白垩系砂岩	\	0
	塞舌尔(Seychelles)	显示沥青球	三叠系—白垩系砂岩	\	0

注:  $1 \text{ Tcf} = 283.2 \times 10^8 \text{ m}^3$ , 地质储量数据来自 2012 年各外方公司

性的主要控制因素,以更有利于对该区域油气勘探的地质认识。

### 1 共轭大陆边缘形成

现今的东非大陆边缘构造格局和盆地分布是在

整个非洲板块与周边板块不断分离这一大的构造背景下逐步演化而成的。由“东非海岸北段—孤岛区”所组成的共轭型大陆边缘,其形成也经历了晚石炭世—早侏罗世 Karoo 裂谷、中侏罗世—现今的马达加斯加岛漂移至被动大陆边缘阶段等演化过程。

Karoo 裂谷是东非地区基底之上最古老的裂谷,最早始于晚石炭世,早侏罗世非洲南部 Karoo 地幔柱的活动,东西冈瓦纳大陆开始解体的同时也代表这期构造演化的结束<sup>[1-2]</sup>。在平面上,Karoo 裂谷横穿整个东非大陆,基本平行于现今的东非海岸,呈 NE—SW 走向[图 2(a)]<sup>[3]</sup>。在东非海岸北段和孤岛区 Karoo 裂谷比较集中,主要分布于共轭型大陆边缘的两侧[图 2(b)]。现今的 Karoo 裂谷多被后期被动陆缘沉积所覆盖(如东非海岸各盆地),或遭受后期构造抬升剥蚀较严重(如孤岛区),成为共轭型大陆边缘盆地早期的先存裂谷。

中侏罗世晚期(161Ma),马达加斯加岛开始在现今索马里—坦桑尼亚盆地位置,沿 Davie 脊向东南或近南方向漂移,北侧的古特提斯洋(本文称为北印度洋)开始打开,并逐渐从北往南海侵,并于晚侏罗世(150Ma),南北印度洋开始贯通,马达加斯加岛也于 130Ma 时漂移至现今位置而停止<sup>[4-9]</sup>。随后东非大陆边缘开始了持续时间较长的被动大陆边缘阶段。其实,随着北印度洋打开,直至马达加斯加岛的完全漂移非洲大陆,被动大陆边缘就已经开始形成。只是在漂移早期,在张裂作用下,共轭大陆边缘两侧形成了一些平行或斜交于海岸的侏罗纪—白垩纪裂谷,它们和早期的 Karoo 裂谷一样,成为另外一期

先存裂谷,影响和控制晚期被动陆缘阶段的沉积和构造格局。

从整个构造演化过程表明,东非共轭型大陆边缘主要形成于漂移期和被动陆缘期,也是现今各盆地主要形成时期。

## 2 烃源岩

目前,共轭型大陆边缘油气丰富,但两者油气类型不一样,烃源岩类型可能是其中一个主要原因。通过研究并结合钻井证实,纵向上自二叠系至第四系,主要发育 Karoo 裂谷期湖相页岩、湖沼相煤系烃源岩和裂谷晚期潟湖相烃源岩,以及过渡—漂移期中—上侏罗统海相烃源岩。由于纵向上层系较多,平面变化快,导致东非大部分地区,尤其现今天然气田主力烃源岩系一直存在很多争议。

在 Karoo 裂谷时期,东非海岸北段与孤岛区是 Karoo 裂谷的主要分布区(图 2)。但由于裂谷演化时期长,裂谷内发育多套烃源岩,主要以二叠系—三叠系湖相页岩和湖沼相煤系烃源岩为主。这类烃源岩品质较好,以 I—II 型干酪根为主,成熟度普遍较高。但由于排烃早,后期构造活动频繁,保存较差,多数油藏遭受后期生物降解和水洗作用,残留成为稠油、沥青和油砂,局部见少量轻质油显示<sup>[10-11]</sup>。

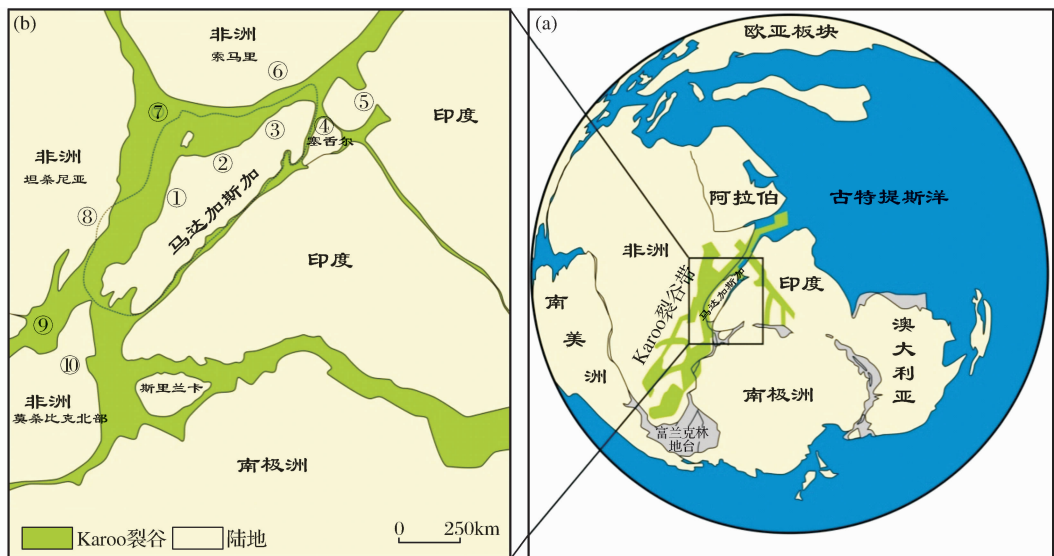


图 2 东非海岸北段早侏罗世 Karoo 裂谷分布特征

Fig. 2 Distribution of Karoo rift in Early Jurassic in the north section of passive continental margin basins

- ①穆伦达瓦盆地;②马任加盆地;③安比卢贝盆地;④塞舌尔盆地;⑤孟买盆地;  
⑥索马里盆地;⑦拉姆盆地;⑧坦桑尼亚盆地;⑨舍鲁斯盆地;⑩鲁马盆地

这类烃源岩在孤岛区已经得到证实。马达加斯加穆伦达瓦盆地的 Tsimiroro 稠油田和 Bemolanga

沥青和油砂,其烃源证实来自下三叠统 Sakamena 湖相泥页岩,以 I 型干酪根为主,地质储量达到 5.3

$\times 10^8 \text{t}$ 。而塞舌尔盆地内钻井岩屑和沥青球样品也揭示中上三叠统湖相烃源岩,热演化程度普遍较高<sup>[10,12]</sup>。而在东非海岸,由于埋藏普遍较深,钻井证实较少。索马里盆地陆上 Calub 气田其烃源岩主要来自二叠系—上三叠统湖相烃源岩,以 II 型干酪根为主,少量为 III 型,热演化程度高,  $R_o$  值介于 1.0%~1.3% 之间。鲁玛盆地陆上的 Lukuledi 地堑内的湖相页岩有机碳含量可达 7.5%,氢指数为 386mg/g,属于 II<sub>1</sub> 型有机质,生油为主,生烃潜力高,属于优质烃源岩<sup>[10]</sup>。

而对于 Karoo 裂谷晚期—漂移期烃源岩,由于受海侵的影响,烃源层系主要以海相泥页岩或灰岩, III 型倾气型干酪根为主。这套烃源岩在孤岛区普遍被剥蚀,东非海岸北段保存相对完整,因此成为该区主力烃源岩。在索马里盆地埃塞俄比亚东部曾出露中—上侏罗统 Uarandab 层 70m 暗色页岩,下部含石膏,上部夹泥灰岩,表现了潟湖相的沉积特征。同样,也在索马里盆地 Calub 气田的 Calub-2 井揭示中侏罗统烃源岩,有机碳含量为 0.33%~2.46%,平均为 0.71%,热解最高峰温度为 444℃,热解氢指数为 15~465mg/g,生烃潜力最大为 11mg/g,有机质以 II 型干酪根为主;Gherbl-1 井揭示上侏罗统厚 277m,有机碳含量最大值为 7.62%,平均为 1.57%,热解氢指数平均为 627mg/g,生烃潜力最大值为 86.6mg/g,平均为 23.2mg/g,未成熟。

坦桑尼亚海岸及鲁玛盆地钻井揭示的中上侏罗统有机质丰度一般较低,有机质类型以 III 型为主,推测向深海方向有机质丰度可能增加<sup>[11]</sup>。坦桑尼亚盆地内的 Songo-7 井揭示上侏罗统烃源岩,有机碳含量为 0.45%~1.76%,氢指数为 33~125mg/g,生烃潜力为 0.1~2.2mg/g,  $R_o$  值为 0.8%~0.95%,为差—中等有机质。

总体而言,孤岛区陆上由于构造剥蚀作用较强,以残留的 Karoo 裂谷时期湖相烃源岩为主,烃源层系单一且残缺不全,为 I—II 型干酪根,热演化程度高,成熟—过成熟;而东非海岸北段,尤其海上,烃源层系较多且相对完整,以 Karoo 裂谷晚期—漂移期海相烃源岩为主,热演化程度低—中等, III 型倾气型干酪根为主,局部发育 II—III 型干酪根潟湖相, Karoo 湖相烃源岩只被陆上少量钻井证实。

### 3 储集体

Karoo 陆内裂谷时期河流—三角洲储层比较发育,分布也十分广泛,但由于后期遭受多期构造活动

的改造,东非大部分地区残缺不全。在塞舌尔盆地有钻井揭示二叠纪—早侏罗世 Karoo 地层厚度达到 1 800m,砂泥岩互层,物性普遍较差。其中还夹有少许煤、火成岩和碳酸盐岩,遭受后期沉积改造作用明显<sup>[12]</sup>。

在晚侏罗世—白垩纪,海平面持续上升,在东非沿岸沉积了大套碳酸盐岩,局部物源充足地区形成了一些中—小型三角洲—深水浊积扇,但规模普遍较小(图 1)。如坦桑尼亚 Songo Songo 气田、鲁玛盆地的 Ntorya 气田的主力储层可能都来自于这些储层,含气砂岩段孔隙度一般超过 20%;在孤岛区,在晚白垩世,马任加和塞舌尔盆地也形成了一些类似的三角洲—深水浊积扇(图 3),如塞舌尔 Reith Bank-1 井揭示多套白垩系砂岩,从测井解释结果其孔隙度普遍小于 10%,较致密。

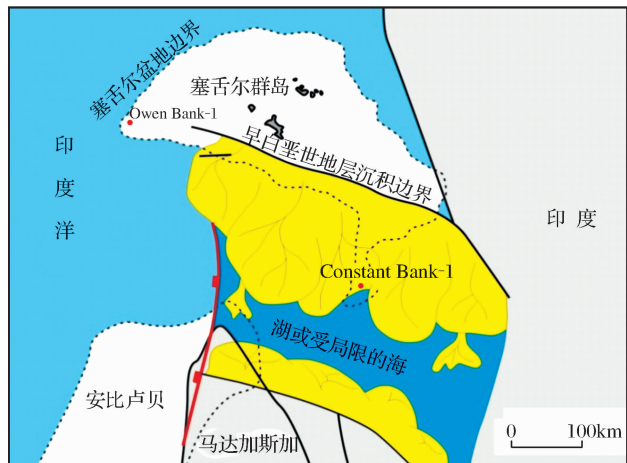


图 3 早白垩世马达加斯加—塞舌尔之间三角洲分布预测

Fig. 3 Predicted distribution of deltas between Madagascar and Seychelles in Early Cretaceous

而从渐新世开始,海平面持续下降,东非海岸北段一侧由于构造环境稳定和物源供给充足,发育了中—大型三角洲—深水浊积扇体系,如鲁玛和拉姆三角洲等,由于后期保存条件较好,储层物性较好,孔隙度 20%,渗透率最高可达到  $1\ 307.8 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ,成为油气最富集的场所(图 4)。而在孤岛区,陆上地层剥蚀严重,很难保存。同时由于陆地面积狭小,缺少大型水系的形成环境,三角洲—深水浊积扇并不发育,浅海地区发育碳酸盐岩储层。总体而言,东非海岸北段储层条件明显优于孤岛区。

### 4 后期构造演化

通过对东非海岸北段和孤岛区烃源岩和储层的

分析,构造对烃源岩的保存和储层的发育起着决定性的作用。在一定程度上,后期构造的改造和破坏作用是造成共轭型大陆边缘两侧油气成藏差异的主要因素(表 2)。

从过东非海岸北段与孤岛区的地质剖面,现今的盆地结构差别较大(图 4)。东非海岸北段,尤其海上地层序列保存完整,构造与圈闭类型丰富,如逆冲推覆、挤压反转以及断层控制的断块、断鼻和断背斜等圈闭广泛分布(图 4 剖面①、②、③),这与晚白垩世晚期(约 82Ma)和早古新世(64Ma),印度板块分别与马达加斯加和塞舌尔等孤岛相继分离,形成

NE—SW 方向的剪切作用,这与早期马达加斯加岛向 SE 方向漂移形成明显的应力转换<sup>[13]</sup>,对东非海岸北段各盆地的改造作用是密不可分的。这种适度的构造改造作用,在一定程度上激活了深层的油气往浅层输导。

而白垩纪以来,尤其渐新世后期东非海岸北段中一大型三角洲—深水浊积扇储层的有利发育,无疑在空间上形成了非常良好的油—储关系。现今的油气勘探成效也体现了这一点,东非海岸 90% 以上的油气都集中在白垩纪—渐新世以来的三角洲—深水浊积扇复合体系。

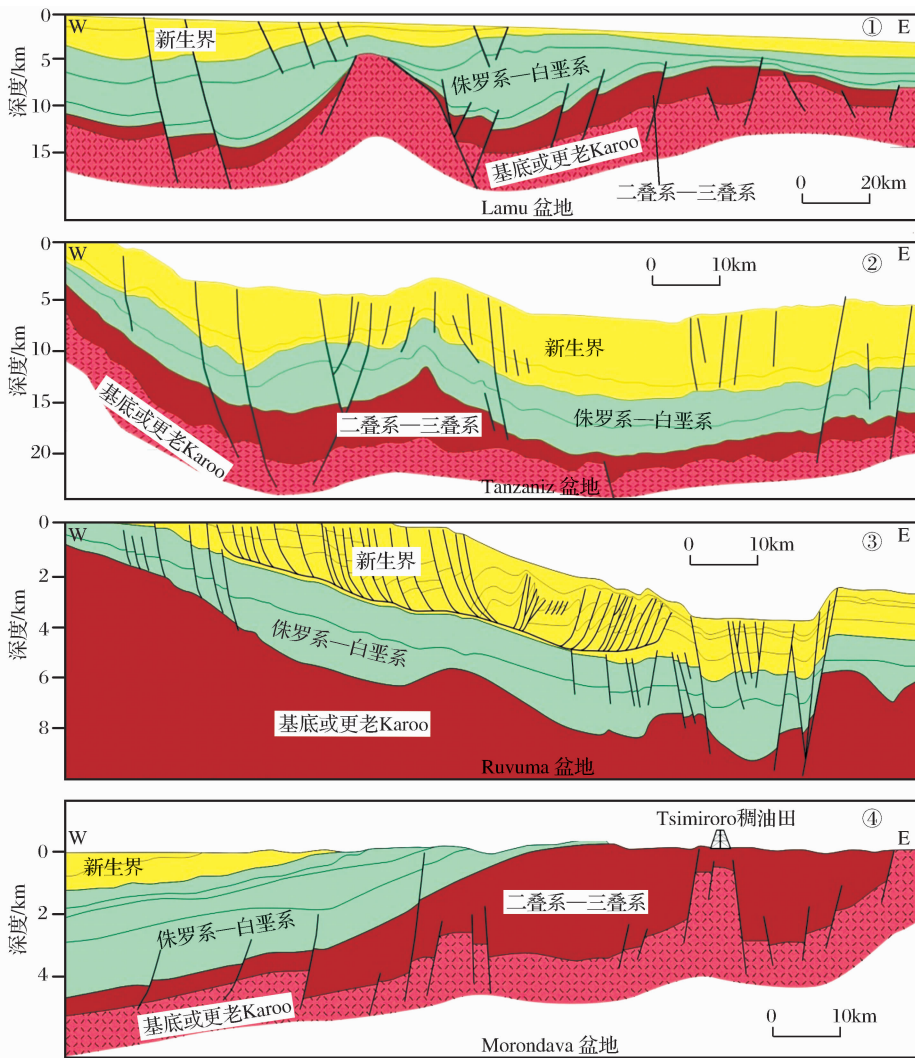


图 4 东非共轭型大陆边缘主要盆地地质剖面(图中①、②、③、④为剖面序号,剖面位置见图 1)

Fig. 4 Geological section of main basin in conjugate continental margin of East Africa  
(Geological section is located in Fig. 1)

相比东非海岸北段,马达加斯加和塞舌尔等孤岛区经历了多次板块分离的构造作用,现今陆上大部分地区主要以二叠系—侏罗系地层为主,白垩系

和新生界地层大部分被剥蚀,局部呈薄皮覆盖(图 4 剖面④)。强烈的抬升破坏作用致使孤岛区内盆地结构也比较单一,多呈现单斜构造。纵然 Karoo 烃

源条件较好,生烃量也十分充足,但强烈的构造抬升对早期油藏的保存十分不利。

1936年在穆伦达瓦盆地中北部发现的 Tsimiroro 稠油田储层为三叠系砂岩,埋深只有 300m(图 4 剖面④);与之相邻的 Bemolanga 油田是世界上最

大的焦油沥青油田之一,埋深不到 30m。由于埋深较浅,生物降解和水洗作用十分强烈。在塞舌尔群岛的海滩上,发现了大量来自上三叠统的沥青球,经过地球化学分析它们均经历了不同程度的生物降解和水洗作用(图 5)<sup>[10]</sup>。

表 2 东非共轭型大陆边缘盆地成藏条件差异比较

Table 2 Difference in petroleum geological conditions in conjugate continental margin of East Africa

地区	地层	油气类型	主要成藏差异比较			构造作用类型
			烃源岩	储层	圈闭类型	
东非海岸北段	白垩系—第三系被动陆缘沉积为主,三角洲—深水浊积扇沉积体系较为普遍,三叠系—侏罗系地层局部残留	气	漂移期海相烃源岩为主	白垩系—第三系三角洲—深水浊积扇	构造圈闭(背斜和断层等)	重力(盐或泥底辟)与反转改造
海上	三叠系—白垩系地层为主,第三系地层多被剥蚀	气和油	局部以 Karoo 裂谷期湖相烃源岩为主	白垩系—三角洲	地层圈闭(岩性和不整合)	抬升剥蚀
孤岛区	白垩系—第三系被动陆缘沉积为主,三叠系—侏罗系地层局部残留	钻井显示	待证实	局部见白垩系—三角洲	地层圈闭(岩性和不整合),局部见盐构造	稳定陆缘盐构造
陆上	三叠系—侏罗系地层为主,白垩系—第三系普遍呈薄皮覆盖	稠油、沥青	Karoo 裂谷期湖相烃源岩	二叠系—白垩系河流—三角洲砂岩	构造圈闭	抬升剥蚀

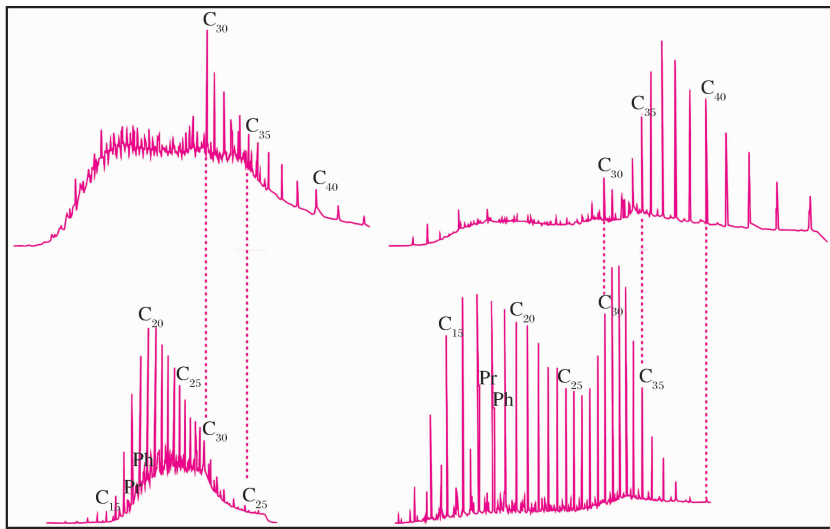


图 5 塞舌尔盆地沥青样品色谱特征

Fig. 5 Gas chromatographs of tars in Seychelles Basin

## 5 结论

通常,共轭型大陆边缘在形成与演化过程中往往具有相似的油气地质条件而备受关注。在东非大陆边缘,以东非海岸北段与孤岛区所组成的共轭型大陆边缘在盆地形成主要时期(三叠纪—新近纪)均具备相似的成因演化和油气地质条件,但由于后期各边缘遭受不同程度的构造改造或破坏作用,使共轭边缘两侧成藏条件差异较大:东非海岸北段遭受适度的改造作用,成藏条件较好,油气比较富集,烃

源岩主要以倾气型的 II—III 型干酪根为主;孤岛区遭受破坏型的构造作用,陆上地区中—新生界地层剥蚀严重,烃源岩为 I—II 型干酪根,热演化程度较高,后期遭受生物降解和水洗作用强烈,早期油藏普遍遭受破坏,以稠油沥青为主。

### 参考文献(References):

- [1] Thomas S. Geology of East Africa[M]. Stuttgart:Schweizerbart Science Publishers,1997.
- [2] Cole D L, Wipplinger P E. Sedimentology and Molybdenum Potential of the Beaufort Group in the Main Karoo Basin,

- South Africa[M]. Pretoria: Council for Geoscience, 2001.
- [3] World Petroleum Resources Project. Assessment of Undiscovered Oil and Gas Resources of Four East Africa Geologic Provinces[R/OL]. US Geological Survey, 2012. <http://pubs.usgs.gov/fs/2012/3039/>
- [4] Veevers J J, Powell C M, Johnson B D. Seafloor constructions on the reconstruction of Gondwanaland[J]. Earth and Planetary Science Letters, 1980, 51: 435-444.
- [5] Marks K M, Tikku A A. Cretaceous reconstructions of East Antarctica, Africa and Madagascar[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2001, 186: 479-495.
- [6] Collins A S. Madagascar and the amalgamation of Central Gondwana[J]. Gondwana Research, 2006, 9: 3-6.
- [7] Bosellini A. East Africa continental margins [J]. Geology, 1986, 14: 76-78.
- [8] Scrutton R A. Davie fracture zone and the movement of Madagascar[J]. Earth and Planetary Science Letters, 1978, 39: 84-88.
- [9] Markus G, Clark D N, Mette W. Reappraisal of the timing of the breakup of Gondwana based on sedimentological and seismic evidence from the Morondava Basin, Madagascar [J]. Journal of African Earth Sciences, 2004, 38(4): 363-381.
- [10] Robertson Research International Limited. Circum India Ocean Frontier Source Rocks Study[R]. Robertson Research International Limited, 2000.
- [11] Nairn A E M, Lerche I, Illiffe J E. Geology, basin analysis, and hydrocarbon potential of Mozambique and the Mozambique channel[J]. Earth Science Reviews, 1991, 30(1/2): 81-124.
- [12] Plummer P S. Geochemical analyses may indicate oil kitchen near Seychelles bank[J]. Oil & Gas Journal, 1992, (5): 52-55.
- [13] Bird D. Shear margins: Continent-ocean transform and fracture zone boundaries[J]. The Leading Edge, 2001, (1): 150-159.

## Differences in Petroleum Geological Conditions of Conjugate Continental Margin in East Africa

XU Zhi-gang, HAN Wen-ming, SUN Yu-mei  
(CNOOC Research Institute, Beijing 100027, China)

**Abstract:** When passive continental margin extends to both sides, it is easy to form conjugate continental margin. On both sides of the Atlantic Ocean in the West Africa and South America is a typical example. Due to the conjugate evolution, continental margin usually has similar petroleum geological conditions. Based on this, East Africa continental margin, under the background of breakup of East and West Gondwana, should also be similar to the Atlantic conjugate type of continental margin. However, because of no consistent breakup time between the plates, the conjugate characteristics are not obvious and were not discussed in the past. By studying tectonic evolution in East Africa, the northern section of coastal East Africa and islands areas have features of conjugate type of continental margin. Both sides underwent the tectonic evolution of early rifting and late passive continental margin and have similar petroleum geological conditions. Exploration results have confirmed that they are the most enrichment of oil and gas regions in East Africa continental margin. However, conjugated hydrocarbon type has differences on both sides. The northern section of coastal East Africa is dominated by natural gas, while islands areas are mainly heavy oil or tar. Preliminary research suggests that the late period tectonic transformation and damage led directly to the differences among the conjugated hydrocarbon accumulation.

**Key words:** Passive continental margin of East Africa; Tectonic evolution; Conjugate source rock; Differences in petroleum conditions