

文章编号:1009-2722(2018)06-0037-07

东非裂谷 Rukwa 盆地石油地质特征与勘探潜力

胡 滨¹, 许志刚², 韩文明¹, 贾 岫¹, 赵 伟²

(1 中海油研究总院有限责任公司, 北京 100028; 2 中国海洋石油国际有限公司, 北京 100027)

摘 要:随着东非裂谷西支 Albertine 盆地勘探获得突破,使该区成为研究和勘探的热点地区。Rukwa 盆地作为东非裂谷系中沉积厚度最大的盆地,勘探程度很低。盆地为半地堑结构,位于 Tanganyika-Rukwa-Malawi 剪切带上,具有走滑拉分的性质。发育二叠系—三叠系 Karoo 地层、白垩系—古近系 Red Sandstone 和上新统—更新统 Lake Beds 三大套地层,沉积地层总厚度最大可达 11 km,且横向变化很大。盆地内发育 Karoo 煤层或黑色页岩和 Lake Beds 湖相泥岩 2 套潜在的烃源岩。盆地东南部地层埋深大,具备较好储盖组合条件,断层发育,圈闭和油气运移条件较好,推测为有利勘探区。烃源是盆地勘探最主要的地质风险。

关键词:东非裂谷;Rukwa 盆地;石油地质特征;成藏条件;勘探潜力;烃源岩;海外

中图分类号:TE1

文献标识码:A

DOI:10.16028/j.1009-2722.2018.06005

东非裂谷(East African Rift System, 简写: EARS)位于非洲东部陆上,南北全长约 3 500 km,宽约 50~300 km,在平面上分为东西两支^[1]。裂谷西支自北向南经过乌干达、刚果(金)、卢旺达、布隆迪、坦桑尼亚和马拉维等国家,可分成北、中、南 3 段,共 8 个盆地(图 1)。北段包括 Albertine(阿尔伯特)盆地;中段包括 Kivu(基伏)、Tanganyika(坦噶尼喀)、Rukwa(鲁夸)、Upemba(乌朋巴)和 Mweru(姆韦鲁)盆地;南段包括 Malawi(马拉维)和 Chilwa(奇尔瓦)盆地。东非裂谷的演化很复杂,由多期裂谷叠置^[2,3]。

东非裂谷西支的 Albertine 盆地自 2009 年后不断获得重大油气发现,使该区成为研究和勘探

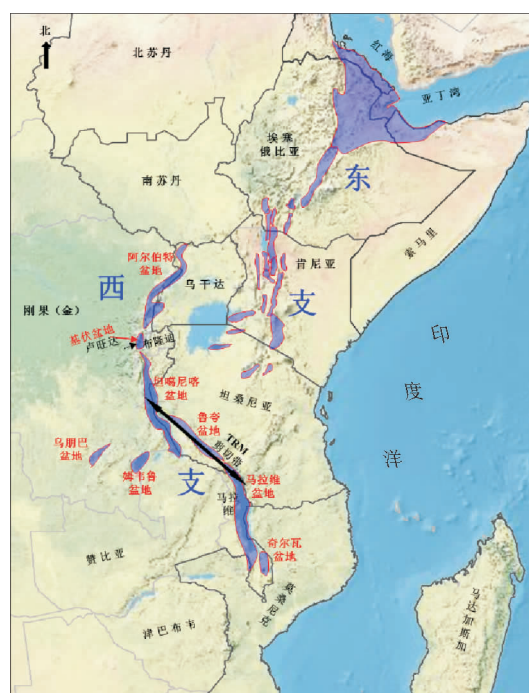


图 1 东非裂谷西支盆地位置

Fig. 1 Location map of Basins, Western Branch of EARS

收稿日期:2018-03-30

基金项目:“十三五”国家科技重大专项“非洲重点区油气勘探潜力综合评价”(2017ZX05032-002)

作者简介:胡 滨(1978—),男,硕士,资深工程师,主要从事海外区块勘探综合研究与新项目评价方面的工作. E-mail:hubin4@cnooc.com.cn

的热点地区。然而多年来,在裂谷西支的其他盆地再无油气勘探突破,其原因值得深入研究。

Rukwa 盆地处于西支中段南部,已发现较多煤矿,但目前油气勘探的程度很低,国际上相关研究较少,而国内基本处于研究空白区。本文基于地震和地质资料,与已获得油气勘探突破的 Albertine 盆地进行类比,对 Rukwa 盆地的石油地质特征进行解剖,阐述其油气勘探潜力,这对该地区未来油气勘探评价具有重要意义。

1 区域地质背景

东非裂谷西支位于坦桑尼亚克拉通和刚果克拉通之间,同时也位于东西冈瓦纳之间结合的构造带上。这些克拉通台地和古构造带为后期裂谷的演化提供了复杂的古构造背景,并控制后期裂谷的整体走向^[4]。现今,在西支中南段盆地基底之上叠加了3期不同方向的裂谷^[5],从下自上依次为呈 NE—SW 走向的古生代 Karoo(卡鲁)裂谷、呈 NW—SE 走向的中生代板内裂谷和呈 NW—SE 走向的新生代东非裂谷。这3期裂谷在 Rukwa 盆地南部和 Malawi 盆地北部的叠加较明显^[6](图2),但继承性较差。

(1)Karoo裂谷期:泛指晚石炭世—早侏罗

世。Karoo 期时间跨度大、构造演化复杂^[7],期间既经历了冈瓦纳大陆裂解所产生的拉张应力和板块之间差异拉张旋转所形成的剪切应力,同时也受到富兰克林地台向南非洲板块俯冲,形成的凯普褶皱构造带所受到的挤压作用^[8],故 Karoo 地层差异也很大。

(2)板内裂谷期:侏罗纪中晚期—白垩纪(图3),随着南大西洋张开产生的大洋中脊的差异拉张,使转换断层活动,并向非洲大陆内部延伸而发生早期断陷作用,形成一系列呈 NW—SE 走向的裂谷盆地^[9],在 Rukwa 和 Malawi 盆地及周边分布。非洲中部著名的 Muglad(穆格莱德)和 Melut(迈鲁特)等富油气盆地也是这一时期形成的盆地。

(3)东非裂谷期:渐新世(约 31 Ma)开始,受到 Afar(阿尔法)地幔柱活动,促使东非裂谷系整体进入新生代裂谷演化阶段,阿拉伯板块从非洲板块分离,形成红海—亚丁湾—东非裂谷系三叉裂谷(图1)^[10,11]。东非裂谷系是其中的夭折支^[12],并逐步演化成现今的陆内裂谷盆地群。与东支相比,西支整个演化过程中火山活动相对较少,构造相对平静,呈散点式演化,各盆地演化速度差异大。

2 盆地概况

Rukwa 盆地处于坦桑尼亚国家的南部,在 Tanganyika 湖和 Malawi 湖之间,盆地面积约 1.6 万 km²,长约 360 km,宽 40~60 km,整体呈 NW—SE 走向(图2)。盆地有一半面积被 Rukwa 湖所覆盖,湖水较浅,曾因气候原因干枯过,目前水深不超过 16 m^[13-16]。

Rukwa 盆地的勘探集中在 1983—1988 年期间,主要由 Petro Canada 和 Amoco 公司完成^[1]。1983—1986 年,Amoco 公司采集了重力资料和 2 450 km 二维地震资料,测网密度约 5 km×5 km,并开展了 Karoo 烃源岩的研究。在 1987 年,Amoco 公司钻了 I-1 井和 G-1 井 2 口井(图2),均为干井。G-1 井于 1987 年 8 月完钻,井深 1 525 m,只钻遇中—新生界 Red Sandstone 和新生界 Lake Beds 等地层^[1,17]。I-1 井于 1987 年 9 月完钻,井深 2 318 m,钻至基底,揭示了古生界

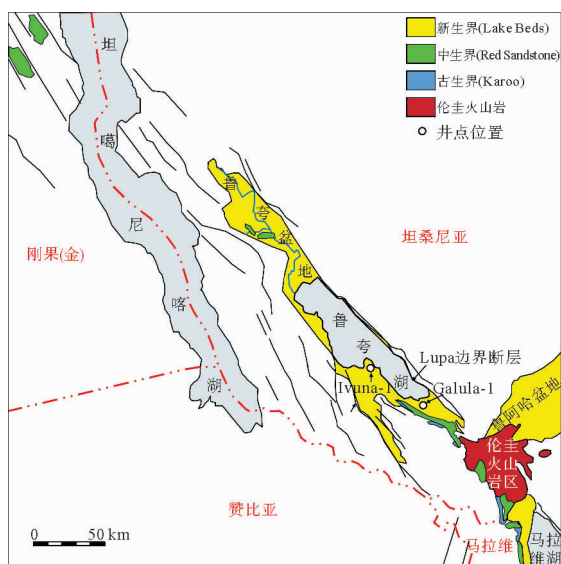


图2 Rukwa 盆地位置(据文献[6]修改)

Fig. 2 Location map of Rukwa Basin
(modified from reference [6])

Karoo、中—新生界 Red Sandstone 和新生界 Lake Beds 三大套地层^[1,17]。1988 年,在 Songwe-Kiwira 地区发现了 Karoo 煤矿。自 1988 年至今,该盆地没有开展油气勘探活动。

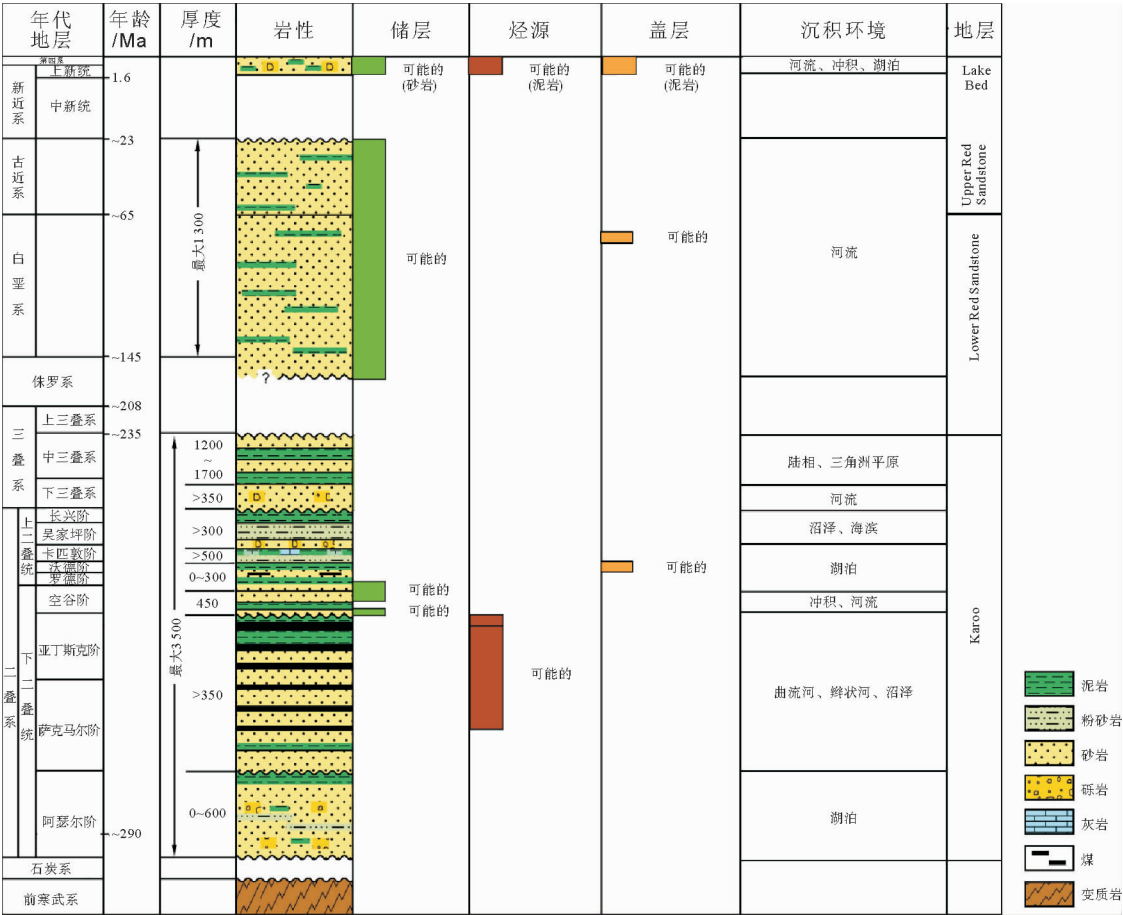


图 3 Rukwa 盆地综合柱状图(据文献[1]修改)

Fig. 3 Integrated column of Rukwa Basin (modified from reference [1])

3 盆地结构

Rukwa 盆地在 Lupa(卢帕)边界断层的控制下呈半地堑结构。盆地位于区域延伸约 1 000 km 的 NW—SE 走向的 TRM(Tanganyika-Rukwa-Malawi)剪切带上(图 1)^[15,18],具有走滑拉分的性质。与 Tanganyika 盆地^[19]有所不同的是,控制盆地的 Lupa 边界大断层(图 2)倾向并未发生转换,致使盆地的沉积中心并未发生大的迁移,一直处于 Lupa 大断层的下降盘(图 4)。

整体而言,盆地东南部的构造单元比盆地西北部复杂(图 4)。现今,在盆地东南部发育着 Rungwe(伦圭)火山、Mbozi(姆波组)山、Ufipa(乌

菲帕)地台、Masangano(马萨甘诺)隆起和 Ruaha(鲁阿哈)盆地(图 4),地貌单元异常复杂^[6,17]。从地震剖面上也可以看出(图 4),盆地东南部断层较发育,多数深切基底,呈 SW 倾向;而西北部地势平坦,构造相对不发育。

4 地层发育

已钻 2 口钻井证实盆地内自下而上发育三大套地层:即 Karoo 陆内裂谷期的 Karoo 群地层,板内裂谷期的 Red Sandstone 地层和东非裂谷期的 Lake Beds 地层(图 3)。盆地沉积层具有“陡、窄、厚”的特点^[17],地层最大沉积厚度可达到 11 km,是整个东非裂谷系沉积最厚的位置,但其分布范围很小,位于盆地的东南部。

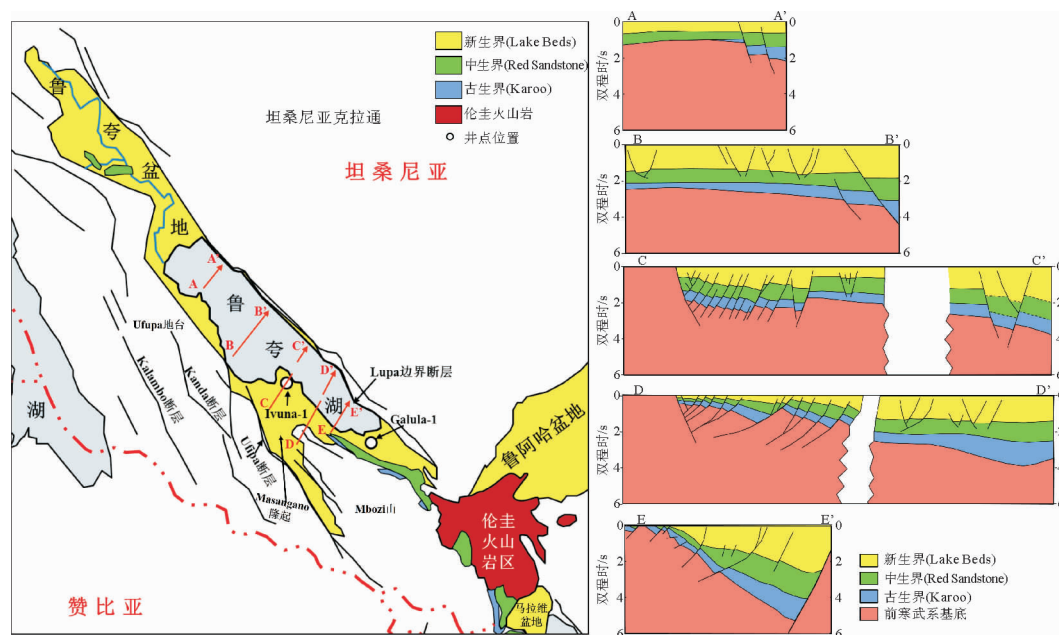


图4 Rukwa盆地结构图(据文献[6,17]综合编绘)

Fig. 4 Structural map of Rukwa Basin (modified from references [6,17])

4.1 Karoo 群地层

Karoo 群地层可进一步分为 3 套地层。底部为纹理粉砂岩,中部为含煤的沼泽相沉积,是 Karoo 群的主要产煤层,顶部为巨厚的红褐色或灰褐色块状长石粗粒砂岩,夹少量紫色粉砂岩。Karoo 群地层主要分布在盆地的东南部,最大厚度可达 3 000 m。Ivuna-1 井钻穿至基底,揭示的 Karoo 群地层约 700 m^[17]。地层厚度自北向西逐渐减薄,西北部 Karoo 地层最厚仅 800 m^[17]。

4.2 Red Sandstone 地层

Red Sandstone 地层按内部的岩性特征分为 Upper Red Sandstone 和 Lower Red Sandstone (图 3)。Lower Red Sandstone 形成于白垩纪,对应于板内裂谷演化期,河流相砂岩十分发育,主要以辫状河沉积为主。Upper Red Sandstone 形成于渐新世,是新生界东非裂谷演化的产物^[6]。沉积的环境主要以半干旱—沼泽沉积为主。地层自下而上的红色砂岩厚度越来越薄,分布越来越局限,而变质岩成分呈现明显增加趋势,说明该时期的沉积地层明显受到后期火山作用的沉积和改造。Red Sandstone 地层在 Rukwa 盆地内沉积厚度可达 2 100 m。

4.3 Lake Beds 地层

Lake Beds 地层形成于上新世—更新世,具有如下几个特点:①以未固结的砂岩、粉砂岩和泥岩为主,局部夹有火山灰沉积,冲积扇和河流沉积环境^[17];②主要物源来自新近纪 Rungwe 火山遭受剥蚀的变质岩基底和火山碎屑;③沉积厚度自西向东逐渐增厚,在 Lupa 边界大断层附近达到最厚,可至 3 000~4 000 m(图 4);④与下伏 Red Sandstone 地层之间为一个侵蚀界面,呈角度不整合接触。

5 石油地质特征

5.1 烃源条件

结合露头 and 钻井资料分析,盆地发育 2 套可能的烃源岩地层,即 Karoo 煤层或黑色页岩和上新统一更新统湖相 Lake Beds 地层(图 3)。

Karoo 煤层具有倾气性,而黑色页岩具有倾油性,并具有一定的勘探潜力^[21,22]。Rukwa 盆地内及周边分布着一些 Karoo 群煤矿^[20],如盆地西北部的 Namwele-Mkomolo、Muze 煤矿和东南部的 Galula 煤矿,资源量分别达到 750 万 t、1 000 万 t 和 1.4 亿 t。Namwele-Mkomolo 煤矿的煤层累计厚度

为 5~6 m, 单层分布范围为 0.1~1.8 m。煤层中往往夹有灰黑色泥岩(并有植物残留)、炭质页岩, 含煤页岩。煤样成分分析表明, 干酪根以Ⅲ型为主, 镜质组含量为 24%~79%, 惰质组为 20%~69%, 壳质组为 1%~12%, TOC 值为 25.9%~40.2%, R_o 值为 0.46%~0.59%, T_{max} 值较低, 约 200 °C。煤层灰度较高(22%~50%), 硫含量最高可达 7.8%, 一般为 1.58%~5.81%, 属于高挥发性烟煤^[20]。Muze 煤矿煤层的累积厚度可达到 6 m, 单层最厚可到 3.75 m。相比 Namwele-Mkomolo 地区, 具有较高的惰质组含量(32%~89%), 干酪根以Ⅲ型为主, R_o 值 0.48%~0.52%, T_{max} 也约为 200 °C。煤层中含较多的碎屑成分(14.6%~57%), 硫含量也较高(0.7%~2.83%)^[20]。Galula 煤矿的煤层分布厚度差异也较大(2.58~4.75 m)。干酪根以Ⅲ型为主, 惰质组含量达到 50%~83%, 壳质组为 2%~17%。 R_o 值为 0.57%~0.66%, T_{max} 值也较低。煤层灰质含量普遍较高, 底部和顶部含量分别为 34%和 23%, 属于亚烟煤品质^[20]。

综上所述 Rukwa 盆地的 Karoo 层的煤品质较差。目前这些煤仅用于居民生活或一些小型发电厂发电, 从侧面反映出其生烃能力可能不足。Karoo 层由于形成和排烃时间早, 与后期形成的构造时间匹配性差, 因此, 早期 Karoo 层生烃很难在晚期构造中聚集成藏。并且 Rukwa 盆地形成至今, 经历了非常复杂的构造运动和持续不断地改造, 尤其盆地东南部的 Rungwe 火山至今仍然十分活跃, 这些持续、频繁的构造活动不利于 Karoo 烃源的保存。

上新统一更新统湖相 Lake Beds 地层相关研究较少。由于地层沉积晚, 厚度较薄(普遍<2 000 m), 目前可能多处于未成熟阶段。

5.2 储盖条件

盆地内砂岩泥岩交互发育, 在 Karoo 层内部、Red Sandstone 层内部和 lake Beds 层内部均可能发育多套储盖组合(图 3)。Karoo 层存在冲积扇、河流三角洲环境下发育的砂岩储层, 孔隙度>12%, 渗透率最大可达 $1\,320 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 平均为 $143 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ^[1]。Red Sandstone 层可能发育分选好—中等、细—中等颗粒砂岩储层, 孔隙度 13%~26%, 渗透率为 $(130 \sim 390) \times 10^{-3}$

μm^2 , 主要以粒间孔为主。在 Lake Beds 层内部也可能发育砂岩储层。上二叠统和 Lake Beds 湖相泥岩, 可作为区域性盖层, 白垩系泥岩可形成局部盖层。

5.3 圈闭条件

通过地震剖面 and 平面断层分布图(图 4)可以看出, 盆地内断层很发育, 形成多级掀斜断块。类比 Albertine 盆地^[23], Rukwa 盆地内应以构造相关的断块圈闭类型为主。限于勘探程度, 圈闭具体规模难以估计。

5.4 成藏模式与有利勘探区预测

Rukwa 盆地的东南部地层厚度最大, 可达 11 km。文献[1]预测盆地的东南部存在一定范围成熟的烃源岩和有利储盖组合条件, 是有利勘探区, 可能存在 2 种成藏模式。①自生自储成藏模式: 新生界湖相烃源岩在深洼区生成的油气直接垂向运移至新生界砂体中成藏(图 5), 勘探的关键是寻找泥岩背景下的有利砂体; ②断阶带下生上储成藏模式: 从深洼区生成的油气沿断层垂向或侧向构造高部位运移, 反向断层遮挡成藏(图 5)。盆地断裂系统较发育, 推测断块圈闭较发育, 此类成藏模式可能较普遍。

6 主要风险与不确定性

综合考虑目前盆地的勘探程度和石油地质条件, 主要存在以下风险与不确定性。

(1) 烃源是盆地勘探的主要地质风险。盆地东南部有利勘探区内钻探的 2 口钻井均失利, 失利的主要原因是烃源。Karoo 层具有一定生烃潜力, 但其形成和生排烃早, 存在与晚期构造不匹配的问题。已钻 2 口井的位置较晚上新世—更新世 Lake Beds 地层埋藏浅, 烃源岩尚未成熟。盆地深洼区是否存在成熟有效的烃源, 目前学者们尚有争论, 缺少直接证据。

(2) 地质认识和结论存在较大不确定性。目前盆地的勘探程度很低, 各方面资料极为匮乏, 对盆地的沉积地层的认识, 学者们尚有争论。依现有资料进行的地层解释方案和落实程度存在较大的不确定性。

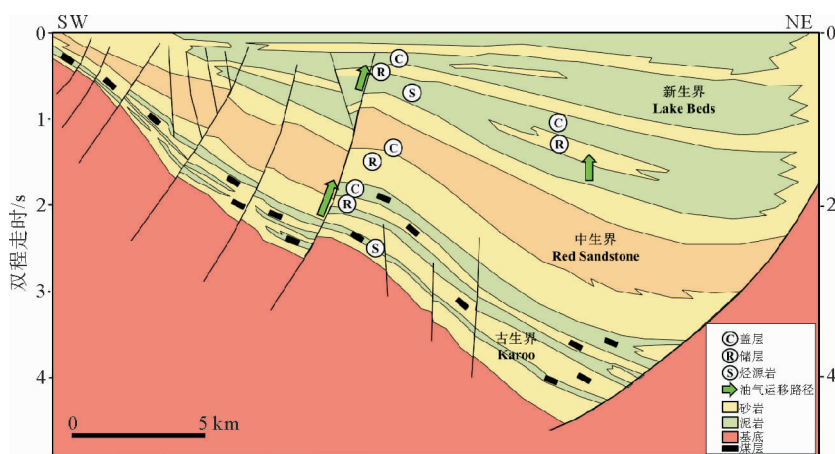


图5 Rukwa盆地成藏模式图

Fig. 5 Hydrocarbon accumulation model of Rukwa Basin

7 结论

(1) 盆地半地堑结构, 位于 TRW 剪切带, 具有走滑拉分性质。发育二叠系—三叠系 Karoo、白垩系—古近系 Red Sandstone 和上新统一更新统 Lake Beds 三大套地层, 沉积地层总厚度最大可达 11 km, 且横向变化很大。

(2) 烃源是盆地勘探最主要的地质风险。盆地内存在 2 套潜在烃源岩, Karoo 烃源岩存在着生排烃早、与晚期构造圈闭形成不匹配的风险。上新统一更新统 Lake Beds 地层总体埋深较浅, 尚未证实为成熟有效的烃源岩。

(3) 推测盆地东南部是有利勘探区。地层埋深大, 具备较好的储盖组合条件, 断层发育、圈闭和油气运移条件较好。

(4) 受盆地勘探程度和研究程度限制, 当前的认识和结论尚存在较大不确定性。

参考文献:

- [1] IHS Energy Portal Version 2.0. EDIN [EB/OL]. <https://my.ihs.com/Energy/Products>
- [2] Kreuser T. Rift to drift evolution in Permian-Jurassic basins of East Africa [J]. Geological Society London Special Publications, 1995, 80(1): 297-315.
- [3] Morley C K, Nelson R A, Pat ton T L, et al. Transfer zones in the East Africa rift system and their relevance to hydrocarbon exploration in rifts [J]. AAPG, 1990, 74(8): 1234-1253.
- [4] Aanyu K, Koehn D. Influence of pre-existing fabrics on

fault kinematics and rift geometry of interacting segments: Analogue models based on the Albertine Rift (Uganda), Western Branch-East African Rift System [J]. Journal of African Earth Sciences, 2011, 59(2/3): 168-184. <http://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2010.10.003>

- [5] Johnson M R. Stratigraphy of the Karoo super-group in southern Africa: an overview [J]. Journal of African Earth Sciences, 1996, 23(1): 3-15.
- [6] Roberts E M. Sedimentology and depositional environments of the Red Sandstone Group, Rukwa Rift Basin, southwestern Tanzania: New insight into Cretaceous and Paleogene terrestrial ecosystems and tectonics in sub-equatorial Africa [J]. Journal of African Earth Sciences, 2010, 57: 179-212.
- [7] Delvaux D. The Karoo to recent rifting in the western branch of the east African Rift System a bibliographical synthesis [M]. Tervuren: Mus. Roy. Afr. Centr., 1991: 63-83.
- [8] 许志刚. 东非裂谷系西支中南段 Karoo 地层分布特点与勘探前景 [J]. 吉林地质, 2014, 33(1): 14-19.
- [9] Bumby A J, Guiraud R. The geodynamic setting of the Phanerozoic basins of Africa [J]. Journal of African Earth Sciences, 2005, 43: 1-12.
- [10] Chorowicz J. The East African Rift System [J]. Journal of African Earth Sciences, 2005, 43(1): 379-410.
- [11] 徐宁, 张杰, 史卜庆, 等. 红海盆地石油地质特征及其油气勘探潜力 [J]. 地学前缘, 2014, 21(3): 155-165.
- [12] Bosworth W, Huchon P, McClay K. The Red Sea and Gulf of Aden Basins [J]. Journal of African Earth Sciences, 2005, 43: 334-378.
- [13] Kim S. Crustal velocity structure of the Rukwa rift in the Western Branch of the East African Rift System [J]. South African Journal of Geology, 2009, 112: 251-260.

- [14] Kjennerud T. Short term development of intracontinental rifts, with reference to the late Quaternary of the Rukwa Rift [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2001, 18: 307-317.
- [15] Delvaux. Late Quaternary tectonic activity and lake level change in the Rukwa Rift Basin [J]. *Journal of African Earth Sciences*, 1998, 26(3): 397-421.
- [16] Damblon F. Identification of a fossil wood specimen in the Red Sandstone Group of southwestern Tanzania; stratigraphical and tectonic implications [J]. *Journal of African Earth Sciences*, 1998, 26(3): 387-396.
- [17] Morley C K, Karanja F M, Wescott W A, et al. Geology and geophysics of the western Turkana Basins, Kenya [C]// Morley C K. *Geoscience of Rift Systems-Evolution of East Africa*; AAPG Study 44. Tulsa: AAPG, 1999: 19-54.
- [18] Wescott W A, Krebs W N, Engelhardt D W, et al. New biostratigraphic age dates from the Lake Rukwa rift basin in western Tanzania [J]. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 1991, 75: 1255-1263.
- [19] 赵伟, 韩文明, 胡滨. 东非裂谷 Tanganyika 地堑石油地质特征和勘探潜力分析 [J]. *中国地质调查*, 2016, 3(1): 14-19.
- [20] Semkiwa. The geology, petrology, palynology and geochemistry of Permian coal basins in Tanzania; 2. Songwe-Kiwira Coalfield [J]. *International Journal of Coal Geology*, 2003, 55: 157-186.
- [21] 马君, 刘剑平, 潘校华, 等. 东非大陆边缘地质特征及油气勘探前景 [J]. *世界地质*, 2008, 27(4): 400-405.
- [22] 张可宝, 史卜庆, 徐志强, 等. 东非地区沉积盆地油气潜力浅析 [J]. *天然气地球科学*, 2007, 18(6): 869-874.
- [23] 赵伟, 韩文明, 胡滨, 等. 东非裂谷 Albertine 盆地石油地质条件和成藏规律 [J]. *四川地质学报*, 2016, 36(2): 275-279.

PETROLEUM GEOLOGY AND EXPLORATION POTENTIAL OF RUKWA BASIN IN EAST AFRICAN RIFT SYSTEM

HU Bin¹, XU Zhigang², HAN Wenming¹, JIA Shen¹, ZHAO Wei²

(1 CNOOC Research Institute Ltd., Beijing 100028, China; 2 CNOOC International Ltd., Beijing 100027, China)

Abstract: Since the breakthrough in oil and gas exploration in the Albertine Basin, the Western Branch of East African Rift System (EARS) has become a hot spot for research and exploration. Among the basins in EARS, the Rukwa Basin is the one with thickest deposits but low exploration degree. It is a pull-apart half graben characterized by strike-slipping, located in the Tanganyika-Rukwa-Malawi transform zone. There are three sedimentary sequences in the basin, i. e. the Permian-Triassic Karoo Super-group, the Cretaceous-Paleogene Red Sandstone group and the Pliocene-Pleistocene Lake Beds respectively. The maximum thickness of total deposits may reach 11 kilometers with great horizontal variation. There are two potential source rocks, the Karoo (coal and black shale) and the Lake Beds (lacustrine mudstone). Good reservoir-seal combination and good hydrocarbon accumulation conditions with well developed fracture system has been found in the southeast, the favorable exploration area of the basin. Source rock is the main geological risk of the exploration in this basin.

Key words: East African Rift System (EARS); Rukwa Basin; petroleum geological features; petroleum accumulation condition; exploration potential; source rock; overseas