

郭瑞婧, 季汉成, 温志新, 等. 东非裂谷系 Albert 湖盆构造活动对沉积充填的影响[J]. 海洋地质前沿, 2019, 35(3): 1-12.

东非裂谷系 Albert 湖盆 构造活动对沉积充填的影响

郭瑞婧^{1,2}, 季汉成^{1,2*}, 温志新³, 房超^{1,2}, 李超^{1,2}, 李林致^{1,2}

(1 中国石油大学(北京)油气资源与探测国家重点实验室, 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)

摘要: Albert 湖盆作为东非裂谷系重要的裂谷盆地, 具有巨大的油气资源潜力。但前期资料匮乏, 制约着 Albert 盆地的研究进展, 目前仍存在着构造活动背景下沉积物响应特征不明确等亟待解决的问题。通过录井、测井及地震地质资料, 结合 Google Earth 对该区盆地结构、湖盆断裂体系和沉积体系开展研究, 并深入探讨构造对沉积物分配的控制作用。研究表明, Albert 湖盆发育非对称式地堑结构, 盆地两侧以正断层发育为主, 西侧陡, 东侧缓; 主要为三角洲-湖泊沉积体系, 其中三角洲包括三角洲平原及前缘亚相, 湖泊包括滨浅湖及深湖亚相。不同裂谷演化时期, 构造对沉积物分配控制作用明显。低扩张阶段南侧断层活动强烈, 沉积物主要从北侧入湖, 主要发育河流及正常三角洲; 初始断裂阶段西北侧断层活动强烈, 沉积物从东南侧入湖, 主要发育扇三角洲及辫状河三角洲; 第 2 断裂阶段断裂活动基本终止, 沉积物从东南、东北两方向入湖, 主要发育扇三角洲、辫状河三角洲及河流相。湖盆内主要发育同向叠置型和相向平行型 2 类构造调节带, 断层组合样式形成的构造低部位, 作为沉积物搬运的有利通道, 对沉积物的分配起到控制作用。

关键词: 东非裂谷系; Albert 湖盆; 断裂系统; 沉积相; 构造调节带

中图分类号: P512.2; P542 **文献标识码:** A **DOI:** 10.16028/j.1009-2722.2019.03001

0 引言

国外对东非裂谷系的研究可追溯到 19 世纪。1894 年, Gregog^[1] 在研究东非大裂谷时, 首次总结提出“裂谷”(rift)的概念。20 世纪以来, 地质

学家们不断对其形成、演化、构造特征、含油气条件等方面进行研究与探索。1936 年, Willis^[2] 认为东非裂谷系是由于地下深部存在热源, 造成岩浆侵入与火山喷发, 引起地表形成穹隆, 在其顶部发生裂陷。Morgan 等^[3] 认为裂谷成因源于地下地幔热对流。随着板块学说的不断完善, Baker 等^[4] 结合红海-亚丁湾的形成与阿拉伯板块漂移的关系, 提出东非裂谷系是由于在 Afar 地区发育地幔热柱导致板块运动, 形成红海-东非裂谷系-亚丁湾“三岔裂谷带”的一支。

东非裂谷系可划分为近于平行的东、西两支。东支为相对成熟的大陆裂谷系, 西支被认为是一个较新、较晚的大陆裂谷。前人对东非裂谷西支的盆地形成与演化进行了研究。Rosendahl 等^[5]

收稿日期: 2018-07-11

基金项目: 优博基金“裂谷盆地沉积物分配与响应”(2462014YXBS01)

作者简介: 郭瑞婧(1994—), 女, 在读硕士, 主要从事沉积和古地理方面的研究工作。E-mail: 848623879@qq.com

* 通讯作者: 季汉成(1966—), 男, 教授, 主要从事沉积岩、沉积相、成岩作用等方面的研究工作。E-mail: jihancheng@vip.sina.com

学者首先对西支系列裂谷盆地结构进行了分析,认为走向上由一系列串珠状地堑组成,彼此之间极性发生反转。随后, Morley 等^[6]学者利用露头、浅井资料,结合早期模拟地震数据对东非裂谷西支构造、沉积开展研究,认为整个裂谷系以古近系和新近系沉积充填为主,推测西支南端裂谷发育卡鲁期和白垩纪地层。

对东非裂谷系西支的早期研究,主要局限于 Albert 裂谷。Albert 裂谷发育 5 个次盆,自北向南依次为 Rhino Camp 次盆、Pakwach 次盆、Albert 次盆、Semliki 次盆、Edward-George 次盆。在 Albert 裂谷中,油气前景最大、研究最多的是 Albert 湖盆。前人研究普遍认为 Albert 湖盆是半地堑结构,但 Karner 等^[7]基于新的地震数据和重力处理,发现在晚新生代,沿盆地两侧发育的边界断层系统对称并连续地下降,认为 Albert 湖盆是全地堑结构。此外对于 Albert 湖盆演化初始时期和演化阶段研究目前尚不统一。Ebinger^[8]基于现今生物地层学研究,认为最初期沉积物为湖泊沉积,形成于距今 8 Ma 的晚中新世。Abeinonugisha 等^[9]基于最新勘探进展和生物地层研究,提出裂谷初期断裂时期可能更早,约可以追溯到距今 17 Ma 的早中新世。在演化阶段研究方面,蔡文杰等^[10]通过整理前人研究资料认为 Albert 盆地的演化分 3 个阶段:①中新世末(9~4 Ma),盆地边界主断层开始发育,进入主要裂陷期,边界断层控制 Albert 湖盆形成;②早上新世末(4~2.6 Ma),盆地两侧边界断层构造快速沉降,Albert 湖进入扩张期,湖盆水体深度变大,与南部 Edward 湖连通;③更新世,区域扭张应力加剧,Rwenzori 山隆起,大的湖泊分隔成现今的 Albert 湖和 Edward 湖,Albert 盆地形态形成。但是 Roller 等^[11]通过对 Kisegi-Nyabusosi 地区露头的分析,将 Albert 湖盆演化分为 4 个阶段:① 14.5~10 Ma 盆地下降,几乎没有充填空间,充填河流沉积;② 10.0~4.5 Ma 可容空间有限,湖平面明显上升,沉积环境由河流末端变为湖泊环境,沉积物供给速率增加代表了断裂活动的开始;③ 4.5~2 Ma 湖盆的演化更多的是由沉积物供给速率控制,而非可容空间,湖泊沉积记录了海平面的最高值;④ 2~1.5 Ma 湖盆中地层整体下沉,两侧地层加速隆升,沉积物供给明显增加,主要发育湖

泊相。

赵伟^[12]在层序地层格架建立的基础上,借助岩心、录井、测井和地震等方面手段研究认为,Albert 裂谷东北端油气发现区主要发育浅水三角洲沉积,并根据其演化特征,建立了裂谷盆地转换带浅水三角洲沉积模式。刘桂和等^[13]通过整理前人资料,认为中中新世以发育风化壳沉积为主、晚中新世—早上新世局部发育扇三角洲和少量冲积扇、晚上新世发育大型三角洲沉积、更新世—全新世伴随 Rwenzori 抬升,发育河流相与三角洲沉积。于水等^[14]通过岩心、测井和地震等资料,发现在盆地陡坡带发育规模较大的扇三角洲沉积体,呈裙带状分布,结合现代沉积的证据,认为较大的汇流面积、较长的搬运距离和入湖之前较深的下切谷是扇群发育的必要条件。

通过前人研究,可以看出不同构造演化时期,不同构造样式控制着沉积物的分配情况,但针对本研究区还没有建立相应构造-沉积模式,对构造影响下沉积物分布认识尚浅。

近年来,越来越多的研究表明,构造样式是裂谷盆地中沉积物分配的最主要控制因素。裂谷盆地中构造作用控制了盆地的演化过程,从而影响可容空间的变化、沉积物的供给和分配。张翠梅等^[15]通过对老爷庙背斜的研究,强调了构造转换带对沉积物入湖位置、搬运路径、砂体类型和相带展布的控制作用。吴康军等^[16]和漆家福^[17]通过总结前人资料,将调节带按照规模、力学成因、正断层几何关系等分类,认为按照正断层几何关系分类对研究沉积物平面分布、刻画砂体最具意义。刘子璇和吴冬^[18]通过将调节带进行更加细致的分类,认为构造调节带对于沉积物的影响凸显在对于沉积物输入点的控制。除此之外,熊斌辉^[19]通过地震地质资料对西沙海槽形成原因进行了研究,认为构造作用控制了沉积物源多寡,进而控制沉积类型及搬运方式。

通过对比前人研究,可见 Albert 湖盆在构造演化期次上尚存争议,构造对沉积物分配的控制情况,还没有开展详细研究。因此,我们借助 Google Earth,通过分析该地区钻测井及地震地质资料,对 Albert 湖盆的构造、沉积等情况进行详细研究,明确该地区构造-沉积样式,以期丰富该地区的地质认识。

1 区域地质背景

Albert 盆地位于东非大裂谷西支北端,从南部卢旺达沿着乌干达西部与刚果民主共和国的边境延伸至北部苏丹境内(图 1),长 570 km,宽 45 km,面积 2.5 万 km²,现今最大水深约 50 m。该盆地东西两侧发育 NE—SW 向边界大断层,西侧强烈下掉,东侧相对平缓,基底发育寒武系变质岩,之上为风化壳及上覆较厚的新近系沉积,最大沉积厚度 5 000~6 000 m^[20]。

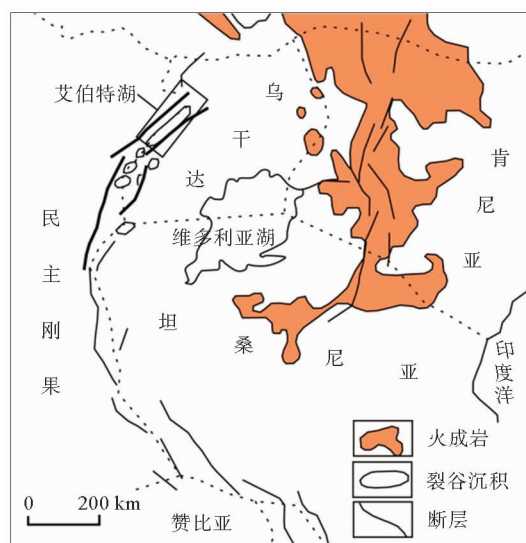


图 1 Albert 湖盆地理位置图

Fig. 1 Location of the Lake Albert

2 断裂分布及构造演化期次

Albert 湖盆发育非对称的地堑结构。区域内存在 2 个边界断裂系统:北西一侧是位于刚果边界的 Bunia 断裂系统,主要由 Bunia 断层组成;南东一侧是位于乌干达边界的 Toro-Bunyoro 和 Tonya 断裂系统,包括 Tonya 断层和 Toro-Bunyoro 断层。2 个边界断裂系统的走向在 $N40^{\circ}$ 到 $N60^{\circ}$ 之间^[21],西侧倾角较大,东侧倾角较小。在这 2 个边界断裂系统之间存在 4 条主要的断层,由南向北依次为 Rwenzori 断层、Semliki 断层、Ngassa 断层和 Butiaba 断层(图 2)。

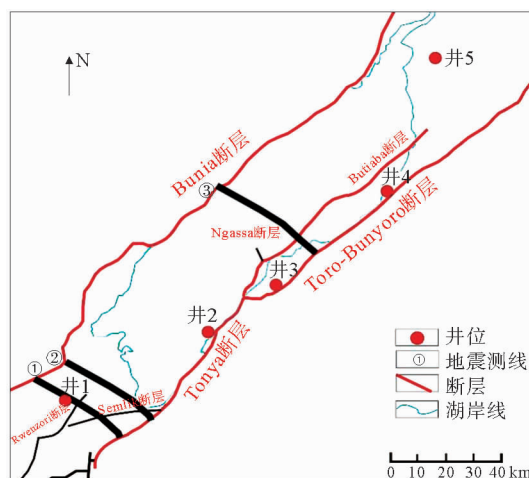


图 2 Albert 湖盆断裂系统及地震测线分布

Fig. 2 Fault system and seismic lines in the Lake Albert

Rwenzori 断层(图 3),走向 $N40^{\circ}$,倾角 40° ,位于 Albert 湖盆南部的鲁佐山北端。该断层切穿基底,并持续活动到 Un_3 界面之上。各时期不整合面在 Rwenzori 断层两侧断距大,断层活动强烈且持续。

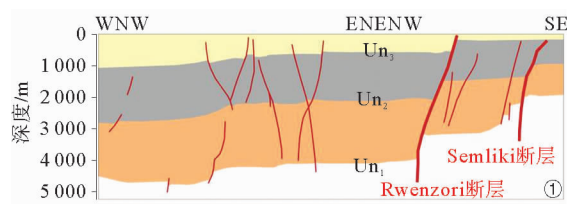


图 3 含 Rwenzori 断层地震地质剖面图(据文献[21])

Fig. 3 A geological section including the Rwenzori fault
(from reference [21])

Semliki 断层(图 4)位于盆地东南部,向 NW 方向倾斜,倾角 50° ,将 Semliki 区域分割开来^[21]。Semliki 断层切穿盆地基底,最终活动时间是在 Un_3 界面附近。断层两侧地层在 Un_3 界面以下的时期断距较大,断层活动强烈。

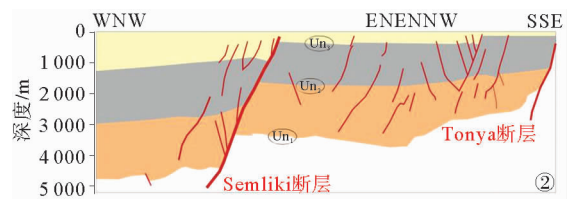


图 4 含 Semliki 断层地震地质剖面图(据文献[21])

Fig. 4 A geological section including the Semliki fault
(from reference [21])

Ngassa 断层位于湖盆中部,倾向为 $N140^{\circ}$ — $N160^{\circ}$,该断层将盆地分为两部分,南部厚度比北部大^[21]。

Butiaba 断层平行于 Toro-Bunyoro 和 Tonya 断裂系统,走向 $N60^{\circ}$,倾角 60° (图 5)。该断层切穿盆地基底,持续活动到 Un_3 界面附近。断层活动强烈,两侧地层持续发生位移,断距较大。

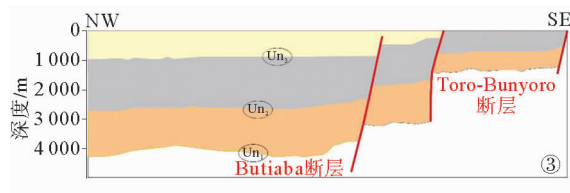


图 5 含 Butiaba 断层地震地质剖面图(据文献[21])

Fig. 5 A geological section including the Butiaba fault (from reference [21])

根据断裂演化资料(图 2~5),将 Albert 湖盆演化分为前裂谷期、低扩张阶段、第 1 裂陷阶段、第 2 裂陷阶段等 4 个阶段。各阶段对应的沉积物分配特征如下:

(1) 前裂谷期

据调研前人资料,前裂谷期是指发生在距今 17 Ma 以前的裂谷发育阶段。在地质剖面图(图 3~5)上对应于 Un_1 以下的沉积地层,主要为冰湖沉积^[21]。断裂活动主要是盆地裂开切口,但切口裂开原因及具体年代尚不清楚。

(2) 低扩张阶段

低扩张阶段(距今 17~6.2 Ma)断陷作用较强,湖盆面积扩张。盆地基底沿 Butiaba 断层位移 1 000 m(NW 下降),沿 Rwenzori 位移 1 200 m(WNW 下降),沿 Semliki 位移 800 m(WNW 下降),沿 Ngassa 位移 1 500 m(NW 下降)。在地质剖面图(图 3~5)上对应于 Un_1 — Un_2 之间的地层,从剖面图上可以看出,该时期断层断距大,断层活动强烈。在湖盆南部多见小型同向正断层。

(3) 第 1 裂陷阶段

第 1 裂陷阶段(距今 6.2~2.7 Ma)断裂活动持续发育,沿 Butiaba 位移 800 m(NW 下降),沿 Rwenzori 位移 500 m(WNW 下降),沿 Semliki 位移 500 m(WNW 下降),沿 Ngassa 位移 500 m(NW 下降)。在地质剖面图(图 3~5)上对应于 Un_2 — Un_3 之间的地层,从剖面图上可以看出,该

时期断层持续活动,较低扩张阶段断距减小,断层活动有所减缓,活动不剧烈。

(4) 第 2 裂陷阶段

第 2 裂陷阶段(距今 2.7 Ma 至今)构造运动减弱,断裂活动基本终止,湖盆内主要断层附近未见明显位移。在地质剖面图(图 3~5)上对应于 Un_3 以上的地层,从剖面图上可以看出,该时期除了 Rwenzori 断层持续活动以外,少见其他位移明显的断裂活动。

3 沉积相类型

通过利用 Google Earth 地图,并结合前人露头、岩心和测井数据,认为 Albert 湖盆主要发育三角洲-湖泊沉积体系,其中三角洲主要发育三角洲平原和三角洲前缘 2 种亚相,湖泊主要发育滨浅湖亚相和深湖亚相(表 1)。

3.1 三角洲沉积体系

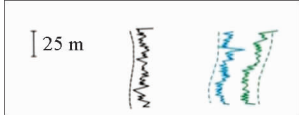
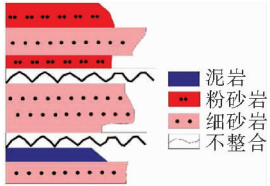
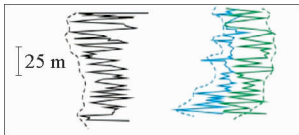
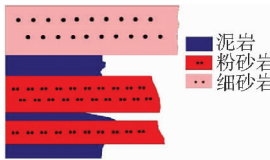
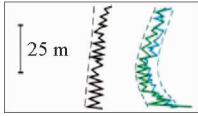
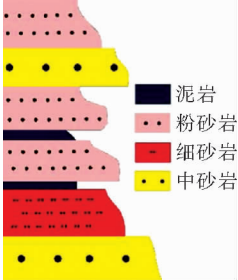
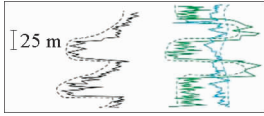
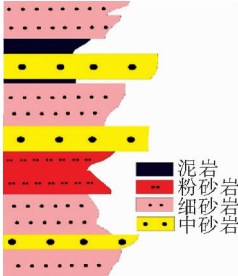
Albert 湖盆沿岸坡度陡缓变化大,地理位置差异导致三角洲类型不同(图 7)。Albert 湖盆北区地势较为平缓,利于砂体沉积,曲流河三角洲多期叠置。除裂谷北区沉积现代三角洲(图 6A)之外,在盆地南侧出露有古三角洲砂体(图 6C)。三角洲沿裂谷走向或以锐角方向与裂谷走向相交,具有物源供给充足,快速堆积、埋藏等特点。Albert 湖盆沿长轴方向,发育边界控盆断裂,由于强烈的断陷作用,断层高、陡,两盘高差大,山脚处发育三角洲砂体。Albert 湖盆西侧陡,东侧缓。陡坡一侧发育扇三角洲(图 6B);缓坡一侧发育辫状河三角洲(图 6D)。本次选取沉积特征明显的北岸曲流河三角洲进行详述如下,主要识别出三角洲前缘和前三角洲 2 种亚相:

(1) 三角洲平原亚相:发育中粒砂岩为主,少量细粒到粗粒砂岩,向上变细,分选好(图 7)。发育巨型波痕,可见水流悬浮搬运形成的爬升结构。在某些地方,这些巨型波痕波长 >10 m,叠加在沙坝上,形成复合波痕。可见垂直的生物潜穴,黏土之间含有盘兴藻。

(2) 三角洲前缘亚相:主要以细粒砂岩为主(图 7)。水下分流河道微相中可见冲刷面和交错层理等沉积构造。测井曲线呈钟形和圆柱形,钟

表 1 沉积相类型及特征(据文献[21]修改)

Table 1 Sedimentary facies and their characteristics (modified from reference [21])

				测井曲线			岩性剖面图
沉积相类型	岩性	沉积构造	生物特征	0	自然伽马	200	
				0.75	孔隙度	0.15	
				1.7	密度	2.7	
湖泊沉积体系	深湖亚相	层状暗色泥岩	铁质结核,石膏	有葡萄球藻,淡水双壳类少,富含有机质		测井曲线呈圆柱形,上下岩相一致;高放射性	
	滨浅湖亚相	以泥岩为主,暗色泥岩和粉砂到中砂交替出现,分选差	泥岩:块状、水平层理 砂岩:交错层理和平行层理	构造多来源于母岩,偶见水平、竖直生物潜穴,可见盘兴藻,局部富含有机质		伽马曲线和孔隙度曲线变化快;伽马曲线呈现向上变粗的漏斗形	
三角洲沉积体系	三角洲前缘亚相	主要以细粒砂岩为主	交错层理,冲刷面	有禾木科		测井曲线呈钟形(河道)和圆柱形,低密度、高孔隙度、高放射性	
	三角洲平原亚相	主要是中粒砂岩,可见细粒到粗粒砂岩;分选好,向上变粗	水流波痕,爬升波痕和沙坝叠加而成的巨型交错层理	偶见垂直生物潜穴,泥岩之间可见盘兴藻		呈现向上变细的钟形;伽马曲线有高位(含有黏土)	

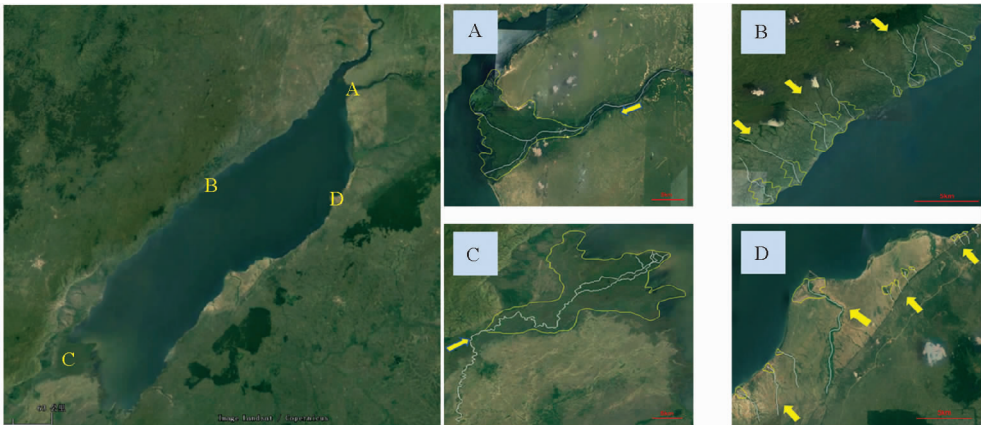


图 6 Albert 湖盆各位置三角洲现代沉积图
Fig. 6 Present deltas in the Lake Albert

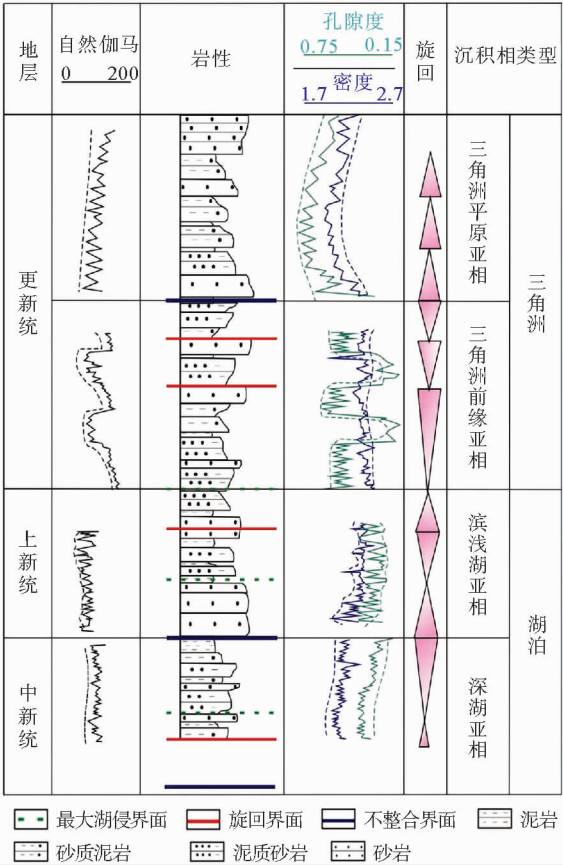


图 7 Albert 湖盆南部测井曲线特征

Fig. 7 Logging characteristics in the south of Lake Albert

形测井曲线段对应向上变细的水下分流河道砂岩,含有巨型波痕,底部具侵蚀冲刷面,顶部具薄层的砂砾岩。测井曲线呈现漏斗形,粒度呈现反粒序,是前缘亚相中河口坝微相的识别标志。

3.2 湖泊沉积体系

Albert 湖盆湖泊沉积体系主要包括滨浅湖和深湖 2 种沉积亚相。

(1)滨浅湖亚相:泥岩和砂岩交替组成,约几十厘米厚。分选差,块状,无粒序,细粒砂岩中可见由水流形成的交错层理和平行层理(图 7)。泥岩之间可见盘兴藻^[22],局部富含有机质,偶见水平、竖直的生物潜穴。由于砂泥岩交互出现,伽马曲线和孔隙度曲线变化大,伽马曲线呈现轻微的漏斗形。

(2)深湖亚相:以大套层状的暗色泥岩为主,泥岩间夹薄层泥质粉砂岩或粉砂质泥岩(图 7),

岩层中可见铁质结核。生物化石少,有少量原地堆积的双壳类,无生物扰动,可见葡萄球藻^[22]。测井信号显示高放射性,富含有机质。

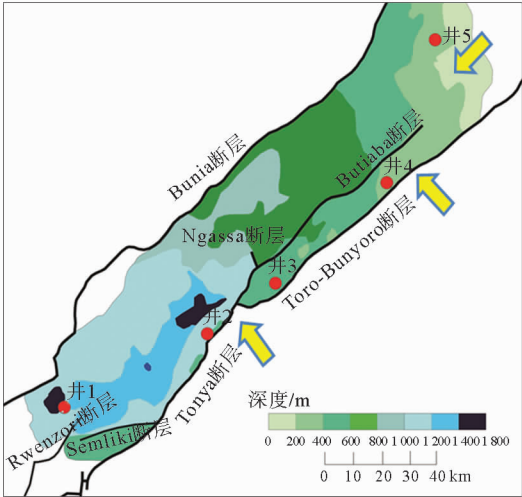


图 8 低扩张阶段地层厚度图

Fig. 8 Isopach map in the low extension phase

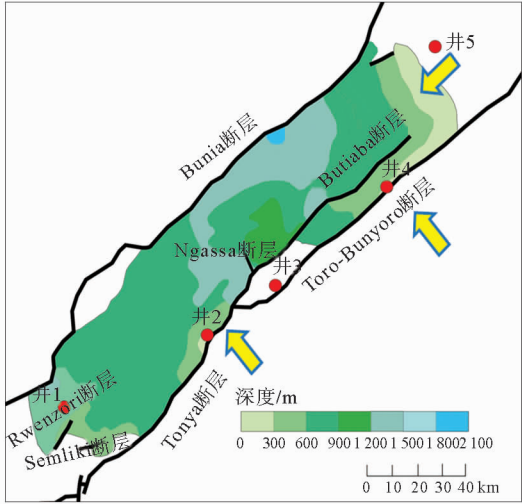


图 9 第 1 裂陷阶段地层厚度图

Fig. 9 Isopach map in the first rifting phase

4 沉积相时空展布特征

4.1 前裂谷期

主要发育冰湖沉积^[20],资料较少暂不详述。

4.2 低扩张阶段

该时期沉积作用主要由南部断层控制,沉积

物最先充填在 Ngassa 南部,沉积速率 150~250 m/Ma,沉积厚度 1 800 m。在连井剖面(图 10)上划分出一个湖侵—湖退旋回,在旋回中部可识别最大湖侵界面。自下而上湖平面先上升后缓慢下降,湖侵阶段,早期湖面上升幅度较小,岩性以砂岩为主,井 4-5 因深度不够未钻遇到湖侵砂岩;湖侵至最大时,泥岩发育,钻遇一套薄层泥岩沉积。井 2 距湖岸较近,主要沉积砂质泥岩;湖面缓慢下降阶段,主要发育砂泥岩交互层,向上砂体比例增大。该时期沉积相主体为深湖亚相,在个别地区可见河流相。沉积响应表明,该时期沉积水体深,孢粉收获率高,蕨类主要为水生蕨类,可见部分盘兴藻属等^[22]。

从连井剖面(图 10)中可以看出,该时期井 1—井 5 砂地比分别为 50%、72%、37%、71%和 66%,可以观察到井 2、井 4 和井 5 砂地比大,砂层厚度较大,结合地层厚度图(图 8)可以推断出该时期物源沿井 2、井 4、井 5 所在位置搬运入湖,即东北、东南等方向。由于湖盆北岸坡度缓,且从连井剖面图(图 10)中可知井 5 中泥质含量相对较高,沉积物粒度相对较细,源远流长的曲流河进入湖盆,搬运距离长,推测其发育正常三角洲;东南侧由于坡度较北岸陡,且井 2 和井 4 中,粒度相对更粗,沉积物入湖位

置距离物源更近,推测其发育辫状河三角洲砂体。

4.3 第 1 裂隙阶段

沉积中心受断层控制,沉积速率大。沉积中心有 3 个,分别位于 Rwenzori 断层西部、Butiaba 断层处和 Ngassa 中心位置。在连井剖面(图 10)中可识别出 1 个可进行全区对比的湖侵—湖退旋回。湖侵早期主要沉积砂岩,井 3 靠近湖中心,受湖面变化影响小,沉积粒度细;湖侵至最大时,发育一套稳定的细粒沉积层,由于钻井分布距湖岸较近,细粒岩发育厚度较薄;湖面缓慢下降阶段,主要沉积砂泥岩交互地层,向上砂岩比例增加。井 1、井 2 和井 3 区域受剥蚀影响小,可见 2 个湖侵—湖退旋回,代表 2 个完整的湖平面上升—下降过程。2 个旋回之上发育多个向上变粗旋回,表明湖平面进入持续下降阶段。富含藻类和有机质的泥岩和砂岩交替出现,葡萄藻属缺乏^[22],表明此处湖泊相沉积与低扩张阶段形成的深湖亚相沉积不同,发育滨浅湖亚相。此外,局部地区发育三角洲。

从连井剖面(图 10)可以看出,该时期井 1—井 5 砂地比分别为 60%、65%、56%、93%、95%(但由于井 3-5 钻遇地层不完整,因此砂地比计算可能存在一定误差)。可以观察到井 2、井 4 和井 5

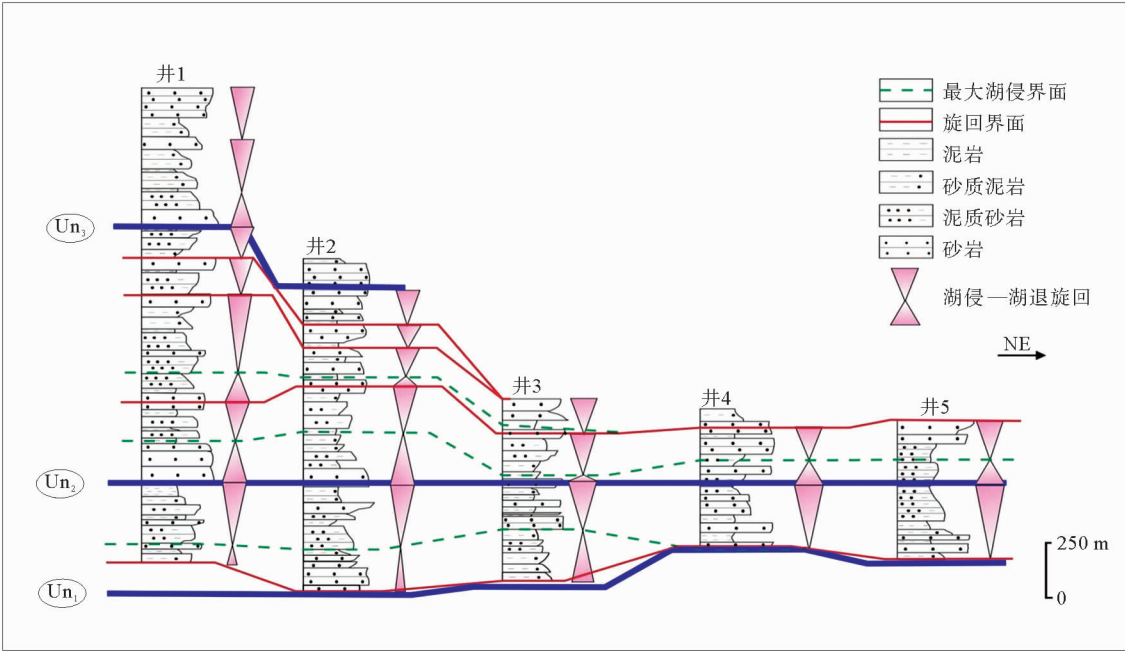


图 10 Albert 湖盆连井剖面图

Fig. 10 Basin-scale correlation of the Lake Albert deposits

砂地比高,井 1 和井 3 砂体含量相对较少,结合该时期地层厚度图(图 9)分析,推测该时期物源沿湖盆北岸、和东南侧搬运入湖。由于北岸坡度缓,且从连井剖面图(图 10)中可以发现,井 5 发育典型反韵律,是正常三角洲河口坝的典型特征,因此推测在北岸入湖处形成正常三角洲砂体;而井 2 和井 4 发育多个间断正韵律,且此时东南侧构造活动强烈,推测其形成扇三角洲砂体的可能性极大。

4.4 第 2 裂陷阶段

沉积中心由断层和地层隆起共同控制,有 2 个沉积中心,分别位于盆地中心的 Ngassa 断层处和盆地南部的 Rwenzori 断层西部,此时北部沉积终止。由于此阶段 KT 地区和北部 Rwenzori 山的隆升、剥蚀,为 Albert 提供主要物源。此时沉积速率降低,由 400 m/Ma 下降至 200 m/Ma。该时期的连井剖面(图 10)仅在井 1 保留有 1 个湖侵—湖退旋回,其他井顶部均被剥蚀。湖面缓慢上升,形成砂泥岩交互的地层,砂岩之间夹有薄层的泥岩;在湖面下降阶段主要沉积砂岩,粒度逐渐变粗。该时期的沉积物中可见禾木科和罗汉松花粉,罗汉松表示高海拔沉积环境,可知此时沉积水体逐渐变浅,且有高海拔沉积物^[22]。

连井剖面(图 10)中,只有井 1 和井 2 记录了该时期沉积,井数据粗略显示井 2 砂地比较高。结合地层厚度图(图 11)分析,推测物源沿东南方

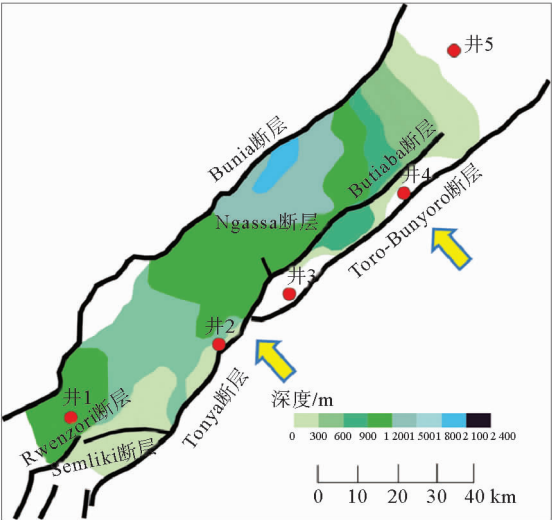


图 11 第 2 裂陷阶段厚度图

Fig. 11 Isopach map in the second rifting phase

向搬运入湖。井 2 砂体粒度较粗,且此时期南侧 Rwenzori 山隆升,构造活动强烈,推测沉积物在东南侧入湖处可能形成扇三角洲砂体。

综上所述,前裂谷期基本无构造活动,第 2 裂陷阶段构造活动已基本终止,Albert 湖盆构造活动主要发生在低扩张阶段和第 1 裂陷阶段。在 2 个阶段中,沉积中心的形成与迁移,沉积物的沉积厚度变化均与断裂的活动密切相关。

5 构造对沉积的控制作用

5.1 构造对沉积相类型的控制

Albert 湖盆长轴与短轴方向构造形态存在差异导致沉积相发育不同。结合 Albert 裂谷盆地结构特征、连井沉积分析(图 10)及地震地质资料解释,建立了 Albert 盆地沉积充填模式(图 11),Albert 盆地长轴方向主要发育正常三角洲,其短轴方向东南侧发育辫状河三角洲,西北侧发育扇三角洲。

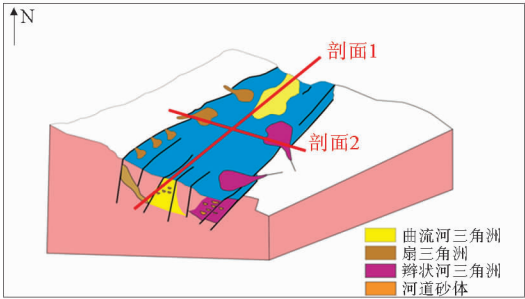


图 12 Albert 裂谷盆地沉积充填模式

Fig. 12 Sedimentary model of the Lake Albert

长轴方向东北端和西南端,地形较缓,物源经过远距离搬运于此,发育正常三角洲(图 13)。三角洲岩性以砂泥岩为主,成熟度较高。此外可见湖泊泥岩和滨岸沉积。

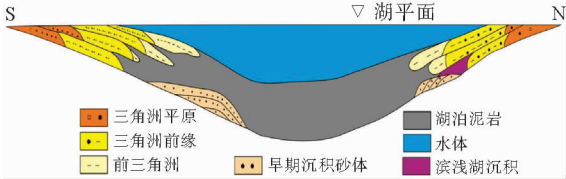


图 13 Albert 湖盆长轴方向剖面图(剖面 1)

Fig. 13 The profile along the long axis of the Lake Albert (section 1)

湖盆短轴方向两岸都发育断裂带,受边界断裂倾角角度大的断裂控制形成陡坡带,其中西北岸较陡,发育裙状分布的中小型扇三角洲,前缘发

育少量滑塌沉积(图 14)。东南岸相对略缓,发育辫状河三角洲,砂体粒度相对较细,成熟度较高,可见滨岸沉积,无滑塌沉积。

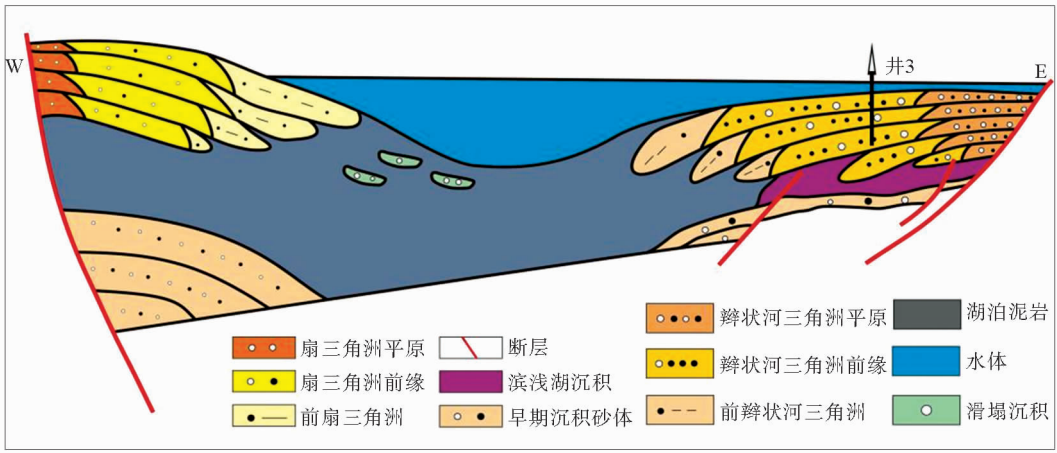


图 14 Albert 湖盆短轴方向剖面图(剖面 2)

Fig. 14 The profile along the short axis of the Lake Albert (section 2)

5.2 构造调节带对物源入口及扇体位置的控制

通过研究 Albert 湖盆区域的构造活动和沉积充填情况,发现该区主要构造带除边界断层和 4 条主要断层外,存在特征明显的构造调节带,这些构造调节带对沉积物的搬运和堆积及沉积相分布影响作用明显。根据 Morley 的构造调节带分类^[23],Albert 湖盆内典型的构造调节带有 2 种,分别是同向叠置型、同向平行型。

(1)同向叠置型

同向叠置型的构造调节带在 Albert 湖盆中部,位于 Kaiso-tonya 区域,由 Butiaba 断层和 Toro-Bunyoro 断层同向叠置而成(图 2)。Butiaba 断层在低扩张阶段和初始断裂阶段分别沿 NW 方向下降 1 000、800 m;Toro-Bunyoro 断层沿 NW 方向下降,2 条断层均为正断层,且朝同一方向倾斜下降并相互叠置,形成同向叠置型构造调节带。调节带现代沉积情况(图 15)显示,砂体主要沿两断层中间部位搬运入湖。图中红色实线表示断层,带箭头的黄色虚线代表沉积物搬运路径。2 条同向断层相互叠置,叠置处形成走向斜坡,是构造中的低部位,坡度约 0.6°,形成沉积物搬运的有利通道。物源从东南方向沿走向斜坡搬运入湖,形成扇形的三角洲砂体(图 16)。



图 15 同向叠置型转换带现代沉积图

Fig. 15 Distribution of sediments of the synthetic overlapping transverse fault zone

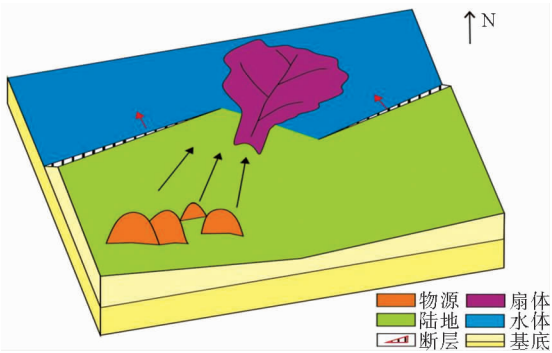


图 16 同向叠置型转换带构造控沉模式

Fig. 16 Depositional model of the synthetic overlapping transverse fault zone

(2)相向平行型

相向平行型构造调节带位于 Albert 湖盆南部(图 17),由断层 1 和断层 2 相向平行而成。断层 1 沿 SE 方向倾斜下降,断层 2 沿 NW 方向倾斜下降,2 条正断层平行切割地层,倾斜方向相对,属于相向平行型构造调节带。现代沉积情况(图 18)显示,红色为断层,黄色为沉积物搬运方向,砂体沿断层中心右侧搬运入湖,湖盆南部发育规模较大的三角洲砂体。构造低部位位于断层中心两侧(图 19),是沉积物搬运的有利通道。沉积物沿右侧低部位搬运入湖,在 Albert 湖盆南部形成三角洲。

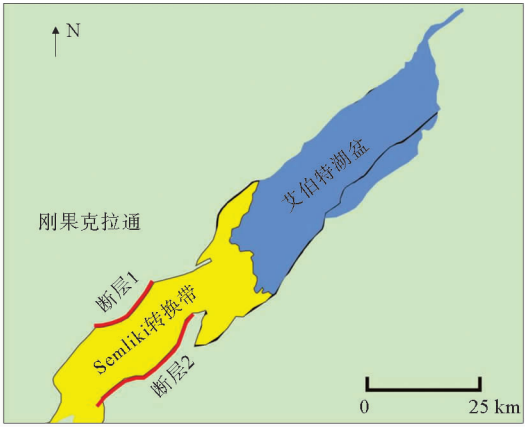


图 17 相向平行型转换带断层位置分布
Fig. 17 Location of faults in the convergent collateral transverse fault zone

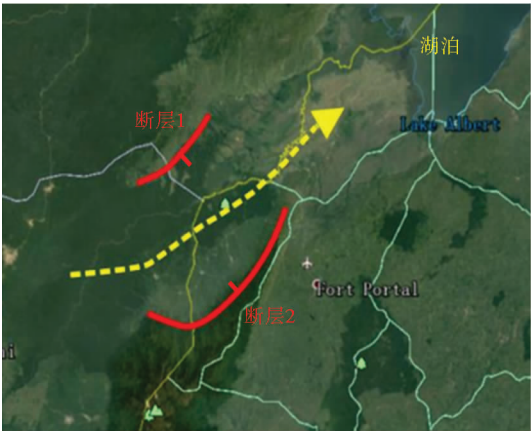


图 18 相向平行型转换带现代沉积图
Fig. 18 Distribution of sediments of the synthetic convergent collateral fault zone

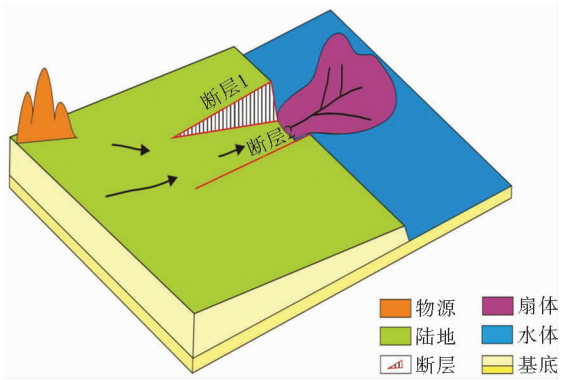


图 19 相向平行型转换带构造控沉模式
Fig. 19 Depositional model of the convergent collateral transverse fault zone

6 结论

Albert 湖盆构造活动较强,断层活动持续时间较长。湖盆两侧边界断层走向基本一致,西侧陡,东侧缓,是非对称的地堑结构。区域内断层倾向基本相同,发育同向断层系统,各断层活动强度在不同时期存在差异。

Albert 湖盆主要发育三角洲-湖泊沉积体系,三角洲包括三角洲平原亚相和三角洲前缘亚相,湖泊包括滨浅湖亚相和深湖亚相。受物源供给和湖盆坡度影响,三角洲发育 3 种类型。西侧湖盆强烈下掉,陡坡带易形成扇三角洲;东侧缓坡带易形成辫状河三角洲;南北两岸坡度更缓,形成正常三角洲。

不同裂谷期与断裂阶段对应沉积物响应有差异。前裂谷期基本无构造活动,低扩张阶段南侧断层活动强烈,沉积物由东北、东南侧入湖,主要发育河流及正常三角洲;第 1 裂陷阶段西北侧断层活动强烈,沉积物由东南侧入湖,主要发育扇三角洲及正常三角洲;第 2 裂陷阶段断裂活动基本终止,沉积物从东南方向入湖,主要发育扇三角洲。

Albert 湖盆内主要发育同向叠置型和相向平行型 2 类构造转换带。2 种构造转换带在断层作用下形成不同样式的构造低部位,作为沉积物搬运的优势通道,通过改变沉积物的搬运通道及入湖位置,实现对沉积物的控制作用。

参考文献:

- [1] Gregory J W. Contributions to the physical geography of British East Africa[J]. The Geographical Journal, 1894, 4 (4): 289-315.
- [2] Willis B, T C R. East African plateaus and rift valleys: studies in comparative seismology[J]. Journal of Geology, 1937, 45: 216-219.
- [3] Morgan W J. Convection Plumes in the Lower Mantle[J]. Nature, 1971, 230(5288): 42-43.
- [4] Baker B H, McConnell R B. The Structural Pattern of the Afro-Arabian Rift System in Relation to Plate Tectonics: Discussion[J]. Philosophical Transactions of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 1970, 267(1181): 383-391.
- [5] Rosendahl B R. Architecture of continental rifts with special reference to East Africa[J]. Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 1987, 15(1): 445-503.
- [6] Morley C K. Comparison of hydrocarbon prospectivity in rift systems[J]. AAPG Special Volumes, 1999, 44: 233-242.
- [7] Karner G D, Byamungu B R, Ebinger C J, et al. Distribution of crustal extension and regional basin architecture of the Albertine Rift System, East Africa[J]. Marine and Petroleum Geology, 2000, 17(10): 1131-1150.
- [8] Ebinger C J. Tectonic development of the western branch of the East African rift system[J]. Geological Society of America Bulletin, 1989, 101(7): 885-903.
- [9] Abeinomugisha D. Tectonics and Sedimentation[C]// Abeinomugisha D, Kasande R. Tectonic control on hydrocarbon accumulation in the intracontinental Albertine graben of the east African rift system, 2012, 16 (special published): 209-228.
- [10] 蔡文杰, 韩文明, 许志刚, 等. 东非 Lake Albert 盆地构造调节带特征及其对油气成藏的控制作用[J]. 地质科技情报, 2015, 34(4): 119-123.
- [11] Roller S, Homung J, Hinderer M, et al. Middle Miocene to Pleistocene sedimentary record of rift evolution in the southern Albert Rift (Uganda)[J]. International Journal of Earth Sciences, 2010, 99(7): 1643-1661.
- [12] 赵 伟. 裂谷盆地转换带浅水三角洲沉积特征与沉积模式——以东非 Albertine 地堑为例[J]. 西部资源, 2016 (2): 118-121.
- [13] 刘桂和, 彭文绪, 刘喜玲. Albertine 地堑构造沉积响应及其油气勘探意义[J]. 长江大学学报: 自然科学版, 2013, 10(14): 27-29.
- [14] 于 水, 韩文明, 赵 伟, 等. 裂谷盆地陡断带三角洲沉积特征与成因模式——以东非裂谷 Albertine 地堑为例[J]. 中国海上油气, 2013, 25(6): 31-35.
- [15] 张翠梅, 刘晓峰, 苏 明. 南堡凹陷老爷庙地区构造-沉积分析[J]. 地球科学: 中国地质大学学报, 2009, 34(5): 829-834.
- [16] 吴康军, 龚福华, 易雪斐. 转换带的分类浅述[J]. 长江大学学报: 自然科学版, 2011, 8(12): 67-70.
- [17] 漆家福. 裂陷盆地中的构造变换带及其石油地质意义[J]. 海相油气地质, 2007, 12(4): 43-50.
- [18] 刘子漩, 吴 冬. 断陷盆地构造转换带对砂体分布影响研究[J]. 复杂油气藏, 2016, 9(1): 17-21.
- [19] 熊斌辉. 构造控制下的西沙海槽沉积模式[J]. 海洋石油, 2013, 33(1): 1-6.
- [20] 张 兴, 童晓光. 艾伯特裂谷盆地含油气远景评价——极低勘探程度盆地评价实例[J]. 石油勘探与开发, 2001, 28 (2): 102-106.
- [21] Simon B, Guillocheau F, Robin C, et al. Deformation and sedimentary evolution of the Lake Albert Rift (Uganda, East African Rift System)[J]. Marine and Petroleum Geology, 2017, 86: 17-37.
- [22] 杨小丽, 胡光义, 庞玉茂, 等. Albert 湖盆北区退积型浅水三角洲沉积及储层特征[J]. 中国海上油气, 2015, 27 (5): 55-61.
- [23] Morley C K, Nelson R A, Patton T L, et al. Transfer zones in the East African Rift System and their relevance to hydrocarbon exploration in rifts[J]. The American Association of Petroleum Geologists Bulletin, 1990, 74(8): 1234-1253.

THE RELATION BETWEEN TECTONIC ACTIVITY AND SEDIMENTARY FRAMEWORK: EVIDENCE FROM THE LAKE ALBERT, EAST AFRICAN RIFT SYSTEM

GUO Ruijing^{1,2}, JI Hancheng^{1,2*}, WEN Zhixin³, FANG Chao^{1,2}, LI Chao^{1,2}, LI Linzhi^{1,2}

(1 State Key Laboratory of Petroleum Resource and Prospecting, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China;

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

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

Abstract: The Lake Albert is a rift basin with large hydrocarbon potential as a part of the East African Rift System. The study of lake geology is limited for lacking of data. The sedimentation under the tectonic background remains unclear up to date. This paper is devoted to the basin tectonics and lake sedimentation based on logging, drilling, seismic data and the data from Google Earth. The Lake Albert is an unsymmetrical graben formed under active tectonics. A steep normal fault occurs in the west and a gentle slope in the east. Three major facies occur as infillings in the lake, i. e. the deep lacustrine, the shallow lacustrine and delta deposits consisting of deltaic plain and deltaic front. Structures have obvious control over the sedimentation pattern. Sediments came from the north side where fluvial and deltaic deposits prevailed. The first phase of rifting was characterized by strong tectonic activity on the northwest side of the lake, and in the second phase fan-delta and braid river delta facies developed as tectonic activities weakened. Sediments were supplied from the southeast and northeast sides of the lake and dominated by fluvial fan delta and braid river delta deposits. There are two major transverse fault zones in the Lake Albert, a synthetic overlapping zone and a convergent collateral zone. The structural pattern of the fault assemblage formed in a relatively low position, which is the dominant path of transportation. Above all, the transverse fault zones have obvious control over the distribution pattern of depositional system.

Key words: East African Rift System; Lake Albert; fault system; sedimentary facies; transverse fault zones