

肯尼亚 Anza 盆地东南部重力场及构造特征

陈青^{1,2}, 袁炳强³, 黄小宇¹, 李君梅⁴, 陈浩⁵, 丁成艺¹, 孙帅¹, 覃雯⁶
 CHEN Qing^{1,2}, YUAN Bingqiang³, HUANG Xiaoyu¹, LI Junmei⁴, CHEN Hao⁵, DING Chengyi¹,
 SUN Shuai¹, QIN Wen⁶

1. 重庆科技学院石油与天然气工程学院地球物理系, 重庆 401331;
2. 复杂油气田勘探开发重庆市重点实验室, 重庆 401331;
3. 西安石油大学地球科学与工程学院, 陕西 西安 710065;
4. 陕西延长石油(集团)有限责任公司油气勘探公司, 陕西 延安 716000;
5. 重庆市二零八地质环境研究院有限公司, 重庆 400700;
6. 重庆市地质矿产勘查开发集团有限公司, 重庆 400700

1. *Department of Geophysics, School of Petroleum and Natural Gas Engineering, Chongqing University of Science and Technology, Chongqing 401331, China;*

2. *Chongqing Key Laboratory of Complex Oil and Gas Exploration and Development, Chongqing 401331, China;*

3. *School of Earth Science and Engineering, Xi'an Shiyou University, Xi'an 710065, Shaanxi, China;*

4. *Oil and Gas Exploration Company Shaanxi Yanchang Petroleum (Group) Co., Ltd., Yan'an 716000, Shaanxi, China;*

5. *Chongqing 208 Geoenvironmental Research Company Co., Ltd., Chongqing 400700, China;*

6. *Chongqing Geology and Minerals Exploration Group Co., Ltd., Chongqing 400700, China*

CHEN Q, YUAN B Q, HUANG X Y, et al., 2021. The gravity field and tectonic features in the southeast of the Anza Basin, Kenya [J]. *Journal of Geomechanics*, 27 (6): 928-937. DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.2021.27.06.075

Abstract: The southeast of the Anza Basin in Kenya, located in the East African Rift System, has developed a very thick Mesozoic and Cenozoic sedimentary cover. However, the low level of exploration in this area restricts us from understanding its structural system and evaluating its oil-gas exploration potential. In this study, we processed and interpreted the gravity anomaly data obtained from the study area based on our understanding of its structural characteristics, and the conclusions drawn from the results are as follows. Under the influence of dextral shear stress of the central Africa shear zone, large-scale NW-oriented basement faults and small-scale NE-oriented caprock faults developed in the study area with the latter cutting off the former. The basement depth of the study area varies greatly and is characterized by "one uplift between two depressions". The very thick Mesozoic and Cenozoic cover layer was deposited in depressions. Controlled by the NW-tensional fault as well as the NE-fault developed along the structural weak zone, the study area is divided into four tectonic units: the eastern depression, the central uplift, the southern uplift and the western depression, showing the structural pattern of the "east-west zone and north-south block".

Key words: Anza Basin; gravity anomaly; fault structure; basement structure

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41702210); 重庆市自然科学基金项目 (cstc2021jcyj-msxmX1070); 重庆市教委科学技术研究项目 (KJQN201901535)

This research is financially supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 41702210), the Natural Science Foundation of Chongqing (Grant No. cstc2021jcyj-msxmX1070), and the Science and Technology Research Program of the Chongqing Municipal Education Commission (Grant No. KJQN201901535)

第一作者简介: 陈青 (1984—), 女, 博士, 讲师, 从事构造地球物理、重磁资料处理与解释研究。E-mail: chenqing0144@126.com

收稿日期: 2021-01-29; **修回日期:** 2021-10-24; **责任编辑:** 吴芳

引用格式: 陈青, 袁炳强, 黄小宇, 等, 2021. 肯尼亚 Anza 盆地东南部重力场及构造特征 [J]. 地质力学学报, 27 (6): 928-937. DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.2021.27.06.075

摘要: 肯尼亚 Anza 盆地东南部地处东非裂谷系,发育了巨厚的中—新生界沉积盖层。然而,该区域勘探程度较低,制约了对其构造体系的认识及油气勘探潜力的评价。文章基于研究区的重力异常数据,针对其构造特征的认识进行了数据处理及解释。研究结果表明,受中非剪切带右旋剪切应力的影响,研究区发育规模较大的北西向基底断裂和规模较小的北东向盖层断裂,且北东向断裂切断北西向断裂;基底深度差异大,总体呈“两凹夹一隆”的特征,凹陷区沉积了巨厚的中—新生界盖层;受北西向拉张断裂和沿构造软弱带发育的北东向断裂的控制,研究区划分为东部凹陷、中部凸起、南部隆起和西部凹陷4个构造单元,呈现“东西分带、南北分块”的构造格局。

关键词: Anza 盆地;重力异常;断裂构造;基底结构

中图分类号: P631.1 **文献标识码:** A

0 引言

Anza 盆地位于东非大裂谷肯尼亚段之中,早期的基础地质 (Morley et al., 1999) 和地球物理勘探 (Dindi, 1994; Morley et al., 1999) 的证据表明,它是一个中—新生代陆内强反转裂谷盆地。Anza 盆地东南部与 Luma 盆地相邻,具有叠合盆地的性质,且因受多次海侵的影响,发育厚 1~11 km 的中—新生界沉积盖层 (Winn et al., 1993; Bosworth and Morley, 1994; Foster et al., 1996), 形成了较好的油气藏。

20 世纪 90 年代,有学者在该地区进行了一定的地球物理工作,基于重力数据揭示了 Anza 盆地构造走向的总体趋势 (Greene et al., 1991; Dindi, 1994), 利用地震资料分析了盆地地下结构和断裂形态 (Greene et al., 1991; Morley et al., 1992, 1999; Bosworth and Morley, 1994; Benoit et al., 2006)。此后,受勘探工作失利及国际油价回落的影响,该地区的勘探工作几乎停滞 (刘桂和和陈全红, 2014)。

Anza 盆地东南部所处的东非裂谷系是全球陆上形成时代最新的裂谷系,目前仍处于构造活动期,且断裂发育,火山岩分布广泛 (温志新等, 2012)。近年来,该盆地的油气勘探潜力再次受到关注。然而,该地区是全球勘探程度最低的地区之一,虽然已经对构造特征取得了一定认识,但对区内重力场的分布特征、基底界面深度、断裂构造对盆地构造演化的控制作用还缺乏深入研究,从而制约了对 Anza 盆地构造体系的认识及油气远景的综合评价。因此,系统研究该区域断裂构造体系和基底界面深度,划分构造单元,探讨其对局部构造发育的控制作用,显得极为重要。

文章通过研究区重力数据的处理及分析,结合相关学者在地质、地球物理方面的研究成果,确定了研究区的断裂构造体系和基底埋藏深度,揭示了研究区的构造区划,从而为深入认识研究区构造特征提供了地球物理依据,也为肯尼亚 Anza 盆地油气勘探潜力评价及进一步勘探工作提供了基础资料和科学依据。

1 研究区地质概况

Anza 盆地位于肯尼亚的中北部,西邻东非古近系—新近系裂谷盆地,东南、东北侧分别与 Lamu 盆地和 Mandera 盆地相接 (图 1),是一个北西—南东向展布的、不活跃的中生代大陆裂谷盆地 (Ebinger et al., 2000; Corti, 2009)。Anza 盆地经历了 Karoo 期裂陷、白垩纪—古近纪裂陷,以及新近纪拗陷沉积,形成了明显的下部断陷、上部新近系广覆式拗陷的双层沉积充填模式 (刘桂和和陈全红, 2014)。Anza 盆地在中非剪切带右旋剪切应力背景的拉张作用下形成,因此,盆地的结构、构造和形成演化均受到冈瓦纳板块的裂解和东非裂谷作用过程的影响 (Greene et al., 1991; Winn et al., 1993; Bosworth and Morley, 1994; 杨俊生和朱筱敏, 2008; 刘桂和和陈全红, 2014; Boone et al., 2018)。侏罗纪时期,马达加斯加板块与非洲板块分离, Anza 盆地开始接受沉降 (Greene et al., 1991; Bosworth and Morley, 1994; Foster et al., 1996)。早白垩世,受中非剪切带右旋剪切应力的影响,盆地形成裂谷雏形。古近纪末,由于东非大裂谷的出现,中非剪切带活动逐渐停止,盆地裂陷作用减弱,沉积厚度逐渐减薄 (Ebinger et al., 2000; Vetel et al., 2005; Benoit et al., 2006; 刘桂和和陈全红, 2014; Brune et al.,

2017)。Anza 盆地基底为前寒武纪变质岩系, 沉积盖层于晚侏罗世开始发育并延续至新近纪 (杨俊生和朱筱敏, 2008; 刘桂和和陈全红, 2014)。盆地广泛出露第四纪沉积物, 几乎完全覆盖了中生代的沉积。北部区域基本为玄武岩所覆盖 (Dindi, 1994; Vetel and Le Gall, 2006), 这可能与 Marsabit 周围存在的大量火山锥有关 (Hackman et al., 1990; Guiraud and Bosworth, 1997)。北西—南东向展布的 Anza 地堑是该区域的主导构造, 反映了与地堑形成相关的拉张作用, 而西南部的北东—南西向构造则可能是由于挤压作用导致的隆起 (Morley et al., 1999; Vetel and Le Gall, 2006)。Anza 地堑北部的南北向构造可能与肯尼亚裂谷的演变和发展有关。

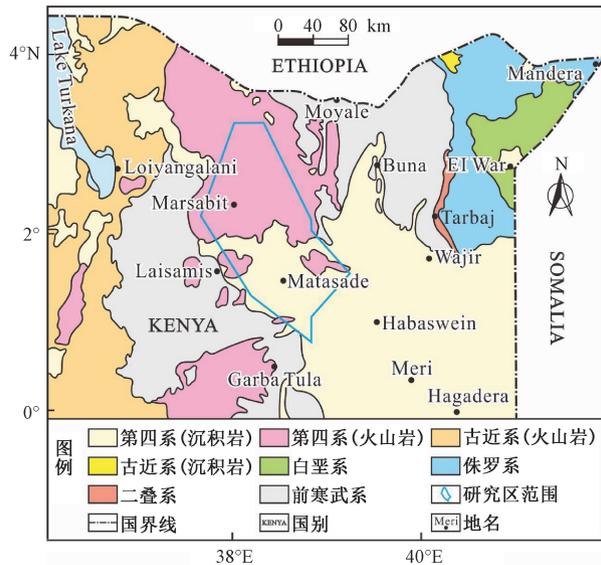


图1 研究区区域地质概况 (据 Dindi, 1994 修改)

Fig. 1 Regional geological survey of the Anza Basin (modified after Dindi, 1994)

2 研究区重力场特征及地质意义

2.1 研究区密度特征

岩石密度是重力资料解释的基础资料。然而, 研究区因勘探程度较低, 缺乏岩石密度统计资料。在 1988—1990 年期间, 该区域实施了 3 口钻井 (Ndovu、Duma 和 Kaisut 井; 图 2), 但因钻井数量有限, 所测密度数据在深度上存在不一致性, 无法建立明显的密度分层 (Dindi, 1994)。同时, 3 口井均未穿透沉积层, 故无法计算得出可靠的密度—深度函数。因此, 文章主要采用 Dindi (1994)

基于钻井和地震等资料, 通过重力模型计算得到的密度界面。

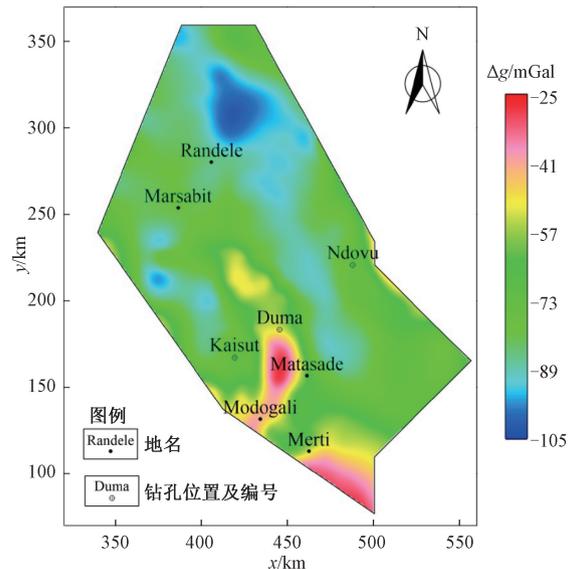


图2 研究区布格重力异常图 ($1 \text{ mGal} = 1.0 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$)

Fig. 2 Contour plane map showing the Bouguer gravity anomaly in the study area ($1 \text{ mGal} = 1.0 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$)

重力模型揭示, 研究区地层宏观可划分为 3 个主要密度界面 (Dindi, 1994): 第一个最大厚度不超过 8 km, 平均密度为 $2.4 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$, 沉积层重力异常主要由该界面引起, 其产生的异常幅值较小; 第二个为沉积层以下至 20 km 的深度范围, 为基底变质岩系, 平均密度约 $2.7 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$, 该密度与 Anza 地堑以西地区暴露的变质岩测量密度一致 (Swain, 1979), 该密度层是研究区主要密度界面, 大范围的重力高与重力低由该层引起; 第三个密度界面即为莫霍面, 深度约 40 km, 但在 Anza 地堑中部深度约 35 km, 该层平均密度为 $2.9 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$, 该密度界面以下, 岩石密度跳转到 $3.2 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ (Sheriff, 1973)。

2.2 布格重力异常特征

研究区的布格重力异常数据来源于 Swain 和 Khan 编辑整理的肯尼亚不同年代的地面重力测量数据, 重力异常数据精度为 $1 \times 10^{-5} \sim 5 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$ 。研究区布格重力异常平面等值线宏观呈北西向 (图 2), 重力场值变化大, 整体表现为南西高北东低, 最大值位于研究区西南 Matasade 附近, 幅值约 $-30 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$, 最小值位于 Randele 东北部, 幅值约 $-102 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$ 。研究区主体呈现重力高与重力低相间分布的特征。Randele 和 Matasade 以东地区有一北西向展布、幅值约 $-102 \times 10^{-5} \sim -80 \times$

10^{-5} m/s^2 的带状重力低, 推测为一北西—南东向的长条形凹陷, 其两侧可能为断层接触, 凹陷中间平缓。Marsabit 与 Madogali 一线为一北西向展布、幅值约 $-70 \times 10^{-5} \sim -30 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$ 的不规则形重力高, 该重力高两侧为梯级带, 推测该区为基底隆起, 两侧为断层接触。Marsabit 西南与 Kaisut 井一线为一宏观呈北西向、幅值约 $-92 \times 10^{-5} \sim -80 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$ 的细长条状重力低, 推测为一凹陷区, 但与东北部重力低值区相比, 该凹陷区范围小、幅值低, 因此推测其盖层厚度应小于东北部凹陷。研究区东南角 Ndovu 井东发育一等值线没有封闭的重力高等。

此外, 与研究区地质图(图1)对比发现, 该区域 Marsabit 以北地区重力低与火山岩分布区相对应。分析原因认为, 虽然较高密度的火山岩会产生重力高效应, 但和沉积层产生的重力低效应相叠加, 其总体重力效应仍为重力低, 这也可能说明中—新生界沉积层厚度很大, 而在此期间发育的火山岩厚度远远小于盆地内非火山岩沉积地层的厚度。

2.3 剩余重力异常特征

剩余重力异常是从布格重力场中分离出区域重力场所剩余的部分, 反映了局部密度不均匀地质体的特征信息。研究区的剩余重力场特征如图3所示。可以看出, Kaisut 井、Duma 井至 Ndovu 井一线的局部重力异常呈现重力低、重力高相间分布, 它们反映了局部凸(隆)起与凹陷构造。已有资料表明(西安石油大学, 2007): Ndovu 井深 4268.72 m, 其中 0~150 m 为上新统、150~750 m 为中新统、750~1475 m 为古近系、1475~1750 m 为上白垩统、1750~4267 m 为下白垩统(未穿透); Duma 井深 3332.99 m, 其中 0~800 m 为古近系、800~1950 m 为上白垩统、1950~3333 m 为下白垩统(未穿透); Kaisut 井深 1449.33 m, 其中 0~500 m 为上新统、500~1000 m 为中新统、1000~1420 m 为古近系。因此, 根据研究区钻井资料结果, 结合研究区区域地质背景推测, Kaisut 井和 Duma 井以东的重力低是由于中—新生界地堑引起; Ndovu 井以东的重力低则是因为中—新生界向南东向逐渐加厚; Matasade 以西的重力高是地垒构造导致, 其中—新生界明显减薄, 而 Ndovu 井西部的重力高是由断层上升盘引起。

研究区的其他局部重力异常, 因所处的区域

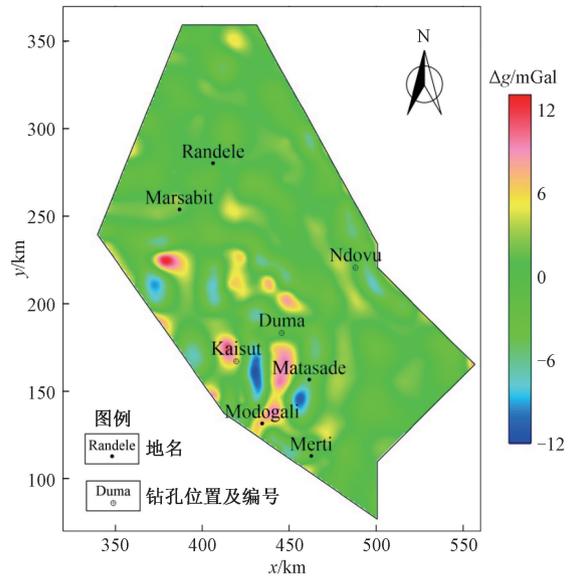


图3 研究区剩余重力异常图 ($1 \text{ mGal} = 1.0 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$)
Fig. 3 Contour plane map showing the residual gravity anomaly in the study area ($1 \text{ mGal} = 1.0 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$)

不同而具有不同成因。研究区西南部, Merti 附近表现为重力高, 而其地表为第四纪的砂岩, 但其南部附近出露前寒武纪变质岩, 因此推测该重力高为前寒武纪基底隆起引起。研究区东北角的重力高, 地表为第四纪的火山碎屑岩, 但其北部则有零星前寒武纪变质岩露头, 故认为该重力高也是由前寒武纪基底引起。Marsabit 东部的重力高, 地表也为第四纪的火山碎屑岩, 该异常在布格重力异常上反映为等值线的鼻状扭曲, 位于反映为凹陷特征的东部重力低的边缘, 推测该重力高是由断鼻构造引起。

总体来看, 研究区局部构造发育, 走向北西向, 且具有明显的东西分带、南北分块特征。发育于研究区内部的正向局部构造一般可能由凹中隆或前寒武纪变质地层引起, 负向局部构造一般为凹陷的沉积层厚度在中、新生界加大引起。

3 断裂构造及基底结构的重力解释

3.1 断裂构造特征

3.1.1 识别方法

断裂构造通常是利用重力场变化的一般特征来识别。垂向二阶导数和水平总梯度图中显著的异常轴线是断裂构造识别的一般标志。但是, 断裂标志常因地质结构差异、演化历史以及地质、

地球物理条件的不同而不能明显的表现出来 (陈青等, 2013)。因此, 基于导数法重磁位场边界识别技术得到了广泛应用, 尤其是数值类计算方法, 如倾斜角相关算法和归一化总水平导数垂向导数法, 都能快速地提取或增强异常场中的微弱信息, 反映构造位置以及场源体的边界范围, 达到确定地下深部地质体和断裂构造的目的 (王万银等, 2010; 许文强等, 2020)。文章即采用水平总梯度倾斜角法 (TAHG)、归一化总水平导数垂向导数法 (NVDR_THDR) 对研究区重力数据进行处理, 并结合传统的垂向二级导数及水平总梯度图中的异常特征, 提取断裂构造。

(1) 水平总梯度倾斜角

为了增强埋深不同的场源体信息, Miller and Singh (1994) 提出了倾斜角法 (Tilt Derivative), 该方法定义为总场强 f 的垂直梯度 (VDR) 比水平总梯度 (THDR) 的绝对值的反正切角度:

$$Tilt = \arctan \frac{VDR}{THDR} = \arctan \frac{(\partial f / \partial z)}{\sqrt{(\partial f / \partial x)^2 + (\partial f / \partial y)^2}} \quad (1)$$

其中, $\partial f / \partial x$ 、 $\partial f / \partial y$ 和 $\partial f / \partial z$ 分别为总场强沿 x 、 y 和 z 方向的一阶导数。由于反正切函数的性质, 倾斜角的振幅被限制在 $-\pi/2$ 和 $+\pi/2$ 之间, 且零值为场源边界位置, 正值位于场源上方, 负值则在场源外部 (Miller and Singh, 1994; Verduzco et al., 2004; 王想和李桐林, 2004)。相较浅源异常, 深源地质体引起的异常曲线较平缓, VDR 和 THDR 振幅都较小, 而其比值可以很大, 因此, 该方法受场源埋深的限制较小, 可以较好地突出深部弱异常的信息。但是, 倾斜角反演结果的零值位置会随着深度的增加发生扩散 (Cooper and Cowan, 2006), 故被突出的深部异常也会偏离真实边界, 因此, 反映出的深源地质体边界位置会偏向于地质体外侧。

Ferreira et al. (2013) 提出水平总梯度倾斜角法 (TAHG), 其表达式为:

$$TAHG = \arctan \left(\frac{\partial THDR / \partial z}{\sqrt{(\partial THDR / \partial x)^2 + (\partial THDR / \partial y)^2}} \right) \quad (2)$$

其中, $\partial THDR / \partial x$ 、 $\partial THDR / \partial y$ 和 $\partial THDR / \partial z$ 分别为水平总梯度 THDR 沿 x 、 y 和 z 方向的一阶导数。同理, TAHG 变换范围也为 $-\pi/2$ 到 $+\pi/2$, 其最大值位于场源边界。该方法继承了倾斜角的优势, 可以有效均衡来自浅源和深源的异常信息。与传统倾斜角法相比, 该方法不易受到噪声的影响, 并为叠加源提供了更清晰的细节信息

(Ferreira et al., 2013)。

(2) 归一化总水平导数垂向导数法

总水平导数垂向导数法 (VDR_THDR) 定义为总水平导数峰值 (PTHDR) 与水平总梯度 (THDR) 的比值 (Wang et al., 2009; 王万银等, 2010):

$$VDR_THDR = \frac{PTHDR}{THDR} \quad (3)$$

其中, PTHDR 为水平总梯度 (THDR) 的垂向导数中大于零的部分, 即 (周蒂等, 2006):

$$PTHDR = \max \left(0.0, \frac{\partial THDR}{\partial z} \right) \quad (4)$$

上式中, 水平总梯度峰值在垂直导数计算中更加尖锐, 有效提高了其水平分辨率。同时, 剔除了结果中小于零的信息, 使得图像更为清晰、场源边界位置更易识别 (周蒂等, 2006; Wang et al., 2009; 王万银等, 2010; Chen et al., 2013; 马杰等, 2019)。

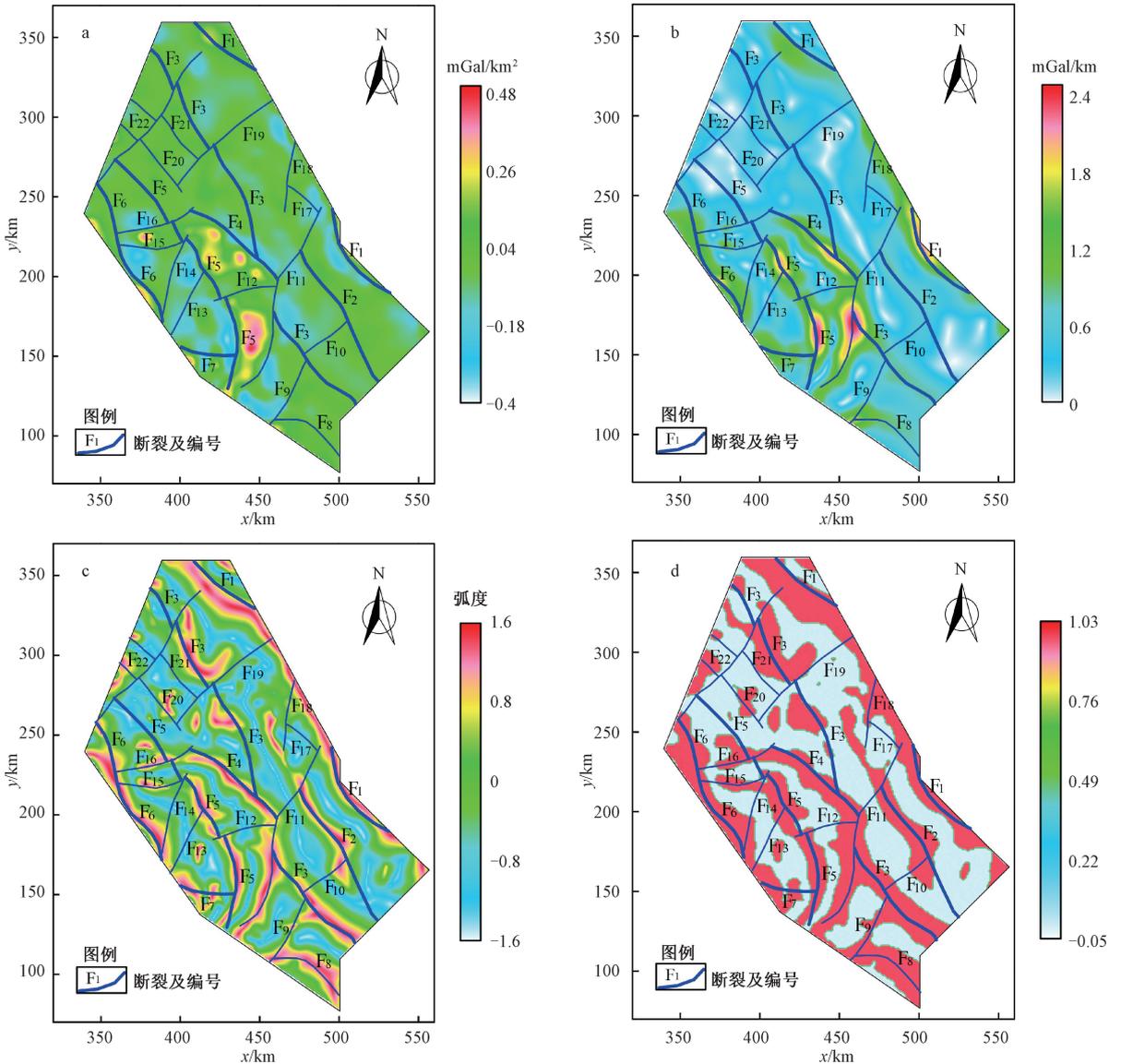
在此基础上, 归一化的总水平导数垂向导数法 (NVDR_THDR) 定义为 (Wang et al., 2009; 王万银等, 2010):

$$NVDR_THDR = \frac{VDR_THDR}{VDR_THDR_{\max}} \quad (5)$$

3.1.2 断裂划分

断裂构造的发生往往使得地层密度、磁性在空间分布不均匀, 而地层密度的不均匀性则会导致重力场的变化。因此, 通过对重力场转换参数的变化特征分析, 可推断断裂构造, 达到地质解释的目的。由图 4 可以看出, 研究区断裂构造发育、规模不一, 主要发育北西向和北东向两组断裂。

北西向主要断裂特征: 断裂规模大, 延伸距离长。F₁ 断裂位于研究区东南角, 为构成东部重力低值区的边界断裂。F₂、F₃ 断裂延伸距离大, 是研究区东部重力低值区西边界的主控断裂。这两组断裂的重力场标志非常明显, 布格重力异常图上反映为密集的重力梯级带, 在剩余重力异常图及垂向二次导数图上均表现为明显的重力高与重力低的过渡带, 在水平总梯度图、TAHG 图和 NVDR_THDR 图上均表现为异常的极值连线。F₅、F₆ 断裂是研究区西部重力低值区的东、西边界断裂, 为倾向相反的一组断层。该组断裂类似于 F₃, 在重力场上断裂标志明显, 在布格重力异常图、剩余重力异常图、垂向二次导数图等图件上均表现为明显的断裂构造特征; 在水平总梯度图、TAHG



a—垂向二阶导数; b—水平总梯度; c—TAHG; d—NVDR_THDR

图 4 研究区布格重力异常处理结果与断裂划分

Fig. 4 Processing results of gravity data and fault structure distribution in the study area

(a) Vertical second derivative; (b) Horizontal total gradient; (c) TAHG; (d) NVDR_THDR

图和 NVDR_THDR 图上也表现为明显的异常的极值连线。北西向主要断裂在上述重力场转换参数图件上反映出明显的线性构造特征, 与布格重力图中密集的重力梯级带走向一致, 这些梯度带反映盆地内发育大规模的北西向断裂。地震反射剖面 (Greene et al., 1991; Bosworth and Morley, 1994) 揭示盆地内发育的北西走向断裂截切基底, 控制了盆地的地层发育及基底隆、凹格局。此外, 区域构造背景也揭示北西向展布的地堑系是该区域的主导构造, 是控制盆地边界的主控断裂 (Morley et al., 1999; Vetel and Le Gall, 2006)。因

此, 推断北西向断裂为控制盆地构造单元边界及盆内隆、凹发育的基底断裂, 限制了盆地沉积层的厚度和范围。

北东向主要断裂特征: 断裂规模相对小, 一般切断北西向断裂。F₁₁ 断裂位于研究区东南部, 布格重力异常图上反映为明显的重力梯级带, 在剩余重力异常图及垂向二次导数图上表现为两重力低鞍部, 西南段在水平总梯度图、TAHG 图和 NVDR_THDR 图上均表现为清晰的异常极值连线。该断裂切断走向北西的 F₂、F₃ 和 F₄ 断裂, 故推测其形成时间可能晚于北西向构造。F₁₉ 位于研究区

东北部, 在布格异常及剩余异常图上体现为两重力低鞍部, 在水平总梯度、TAHG 图和 NVDR_ THDR 图上表现为断续的极值连线。该断裂切断走向北西的 F_3 断裂, 故推测其形成时间可能也晚于北西向构造。重力异常水平轴的明显错动, 以及异常带宽数和延伸长度较小等特征揭示北东向断裂为构造活动发育的次级断裂, 规模相对较小, 切断北西向基底断裂, 为盆地内沉积盖层内部的断裂。地震反射剖面 (Greene et al., 1991; Bosworth and Morley, 1994) 也揭示出前寒武纪结晶基底之上发育大量的次生断裂, 控制盆地沉积盖层的发育。因此, 推断该组断裂是盆地内沉积盖层内部的次生断裂, 可能构成盆地内局部凹陷与凸起的边界。

总的来说, 由于受东非裂谷作用的影响, 研究区内一方面形成北西向拉张断层, 另一方面沿构造软弱带发育北东向断层。北西向构造与北东向断层共同作用, 形成了研究区构造“东西分带、南北分块”的格局。

3.2 基底结构特征

基于研究区重力数据, 利用研究区区域地质背景、部分地区已有的地震剖面和钻井的分层数据作为约束, 选取平均深度 6 km, 密度差 $0.2 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$, 采用 Parker-Oldenburg 界面反演算法, 得到了前寒武纪基底界面深度图 (图 5)。从图 5 中可以看出, 研究区基底深度差异较大, 基底埋深较浅处位于 Ndovu 井东南地区, 这些地区中—新生界盖层较薄, 基底深度在 1~2 km 以内。最深处位于 Randeale 东北地区, 最大深度约 10 km, 反映了研究区发育的凹陷中沉积了巨厚的中—新生界。此外, 研究区总体呈“两凹夹一隆”的特征, 东部 Randeale 东北地区是一北西走向、南北长、东西窄, 且范围较大的凹陷; 西部 Marsabit 西南至 Kaisut 地区也为一北西走向的凹陷, 只是和东部凹陷比较, 其范围小, 盖层厚度薄, 凹陷中心盖层沉积厚度约 7 km; 而这两个凹陷中间所夹的区域则为隆起区, 其盖层厚度约 3 km。

4 构造单元划分

根据研究区重磁场特征、断裂构造体系, 以及基底界面特征的分析, 结合研究区区域构造背景, 对研究区构造单元进行了划分 (图 6)。

东部凹陷: 东部凹陷是研究区的主要构造单元, 为 Anza 盆地在区内的主体。东部凹陷在研究

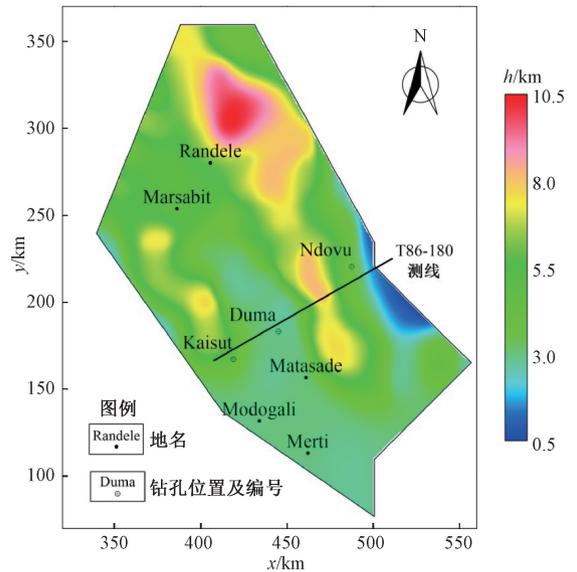


图 5 研究区基底界面深度图

Fig. 5 Contour plane map of basement depth in the study area

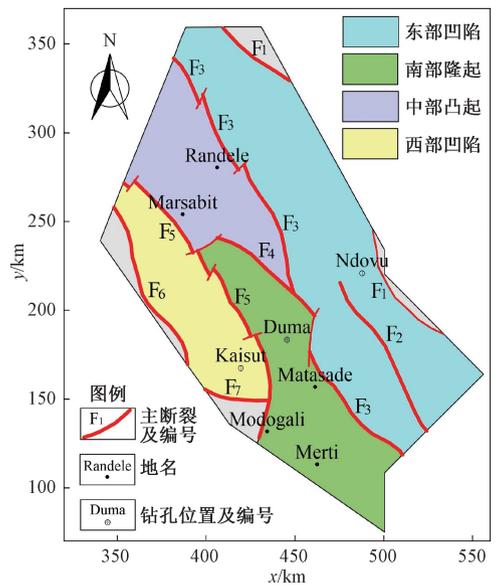


图 6 研究区构造单元划分

Fig. 6 Structural units in the study area

区 Randeale-Ndovu 地区, 断续分布的 F_1 断裂构成其东边界, F_3 断裂则为其西边界。以断层为界、沉积厚度大是东部凹陷的主要特征, 凹陷内中—新生界尤其白垩系和古近系、新近系发育, 且具多个沉积沉降中心。

南部隆起: Marsabit 到 Merti 地区为南部隆起。南部隆起重力场值高, 盖层厚度 1~2 km, 中—新生界不整合于前寒武纪变质基底上, 且 Merti 西南附近前寒武纪变质岩出露地表。

中部凸起: 中部凸起位于南部隆起西北部,

Marsabit 和 Randele 之间。由于边界断裂的控制作用, 中部凸起实际为一地垒构造。中部凸起大部分为第四纪火山岩覆盖, 盖层厚 3~4 km, 而基底界面起伏不大。

西部凹陷: 西部凹陷位于 Marsabit 与 Kaisut 一带, 呈北西向长条状分布, 其东西两侧分别受 F_5 、 F_6 断裂控制。与东部凹陷相比, 沉积体系相似, 但该凹陷面积小, 上覆盖层厚度薄。同时, 该凹陷沉积层中火山岩相对不发育或很少发育。

5 讨论

根据拟合的沉积盖层厚度和构造单元发育特征, 结合该区区域构造演化的 5 个主要阶段, 对断裂形成和沉积层厚度发育过程进行了讨论。

(1) 二叠纪—三叠纪——断陷 1 期

二叠纪初, 随着东冈瓦纳大陆的解体, 前寒武纪基底开始断陷, 逐渐形成东北部 Mandera 和东南部 Lamu 盆地。至三叠纪, 在马达加斯加板块拉张作用的影响下, 北东—南西向陆内裂谷开始发育, 前寒武纪基底之上不整合发育海相沉积, 局部发育断陷湖泊, 可能发育湖底扇和小型三角洲沉积 (Yuan et al., 2012)。

(2) 早侏罗世——断陷 2 期

早侏罗世, 受东冈瓦纳大陆裂解的影响, 海侵开始, 盆地整体接受沉积, 形成以碳酸盐岩沉积为主的较厚的沉积体系。三叠系—早侏罗统, 以砂岩为主的 Mazeras 组地层厚度达 2.0 km。

(3) 中侏罗世—早白垩世——漂移期

中—晚侏罗世时, 受马达加斯加板块与非洲板块的快速分离的影响, 东西向扩展作用使盆地内发育一系列断裂构造, 形成 Anza 裂谷的雏形。这一时期, 广泛的海侵引起边缘海岸到开阔海沉积。早白垩纪时, 盆地快速裂陷沉降, 发育北西—南东向正断层, Anza 地堑系开始形成; 同时, 由于受中非剪切带右行剪切活动的影响, 盆地内发育北东—南西向的右行走滑断裂。该时期为控制盆地构造单元边界的北西—南东向基底断裂的主要发育时期, 它们同时控制了盆地内凹陷和隆起的发育, 将盆地划分为 2 个凹陷、1 个隆起和 1 个凸起, 且控制了凹陷内的沉积层分布和构造发育。利用横穿研究区的一条二维地震反射剖面 (T86-180 测线, 位置见图 5) 进行重震拟合, 结果显示盆地自西向东呈现隆起与凹陷相间分布的格局, 白垩系底界深度变化较大, 深度大致在 0.5~6.3 km (图 7)。该时期, 被动边缘盆地开始形成, 发育一套厚度约 2.3~4.0 km 的湖泊—三角洲相体系 (刘桂和陈全红, 2014)。

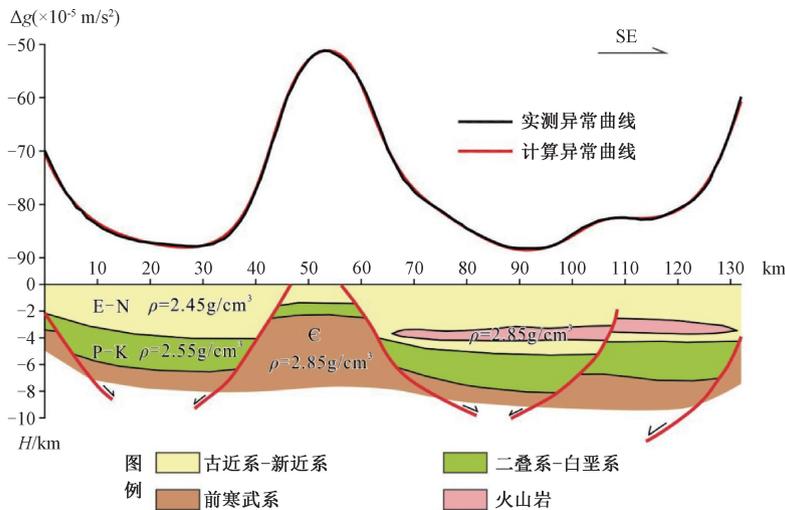


图 7 研究区二维地震反射剖面 T86-180 测线的重力异常解释剖面

Fig. 7 Interpretation profile showing the gravity anomaly of the two dimensional seismic reflection profile on line T86-180

(4) 晚白垩世—渐新世——断陷 3 期

晚白垩世, 中非剪切带的右行走滑活动停止, 裂谷活动也逐渐减弱, Anza 盆地进入缓慢裂陷阶段。据盆地东部凹陷 Ndovu 井钻遇煤层来看, 该时

期主要发育河流相沉积, 厚度为 1.2~2.0 km。晚白垩世晚期, 东非裂谷开始活动, Anza 盆地受到左行剪切挤压的影响, 发生整体抬升。直至始新世, 盆地再次接受沉积, 但沉积厚度仅为 0.6~

1.0 km (刘桂和陈全红, 2014)。因此, 钻井资料显示, Anza 盆地的上白垩统和中新统之间为不整合接触 (Morley et al., 1999), 而镜质体反射率数据表明, 厚约 2.4 km 的上白垩统一古近系可能是在中新世之前被剥蚀 (Morley et al., 1999)。同时, 相关研究也表明, 晚白垩世—古近纪时期, 盆地总体沉积厚度较小, 仅在东南部相对较厚 (Bosworth and Morley, 1994; Morley et al., 1999)。

(5) 中新世—上新世——裂隙 4 期

该阶段, 东非裂谷形成, Anza 盆地普遍发育火山岩沉积, 新近纪沉积以砂泥岩互层为主, 不整合覆盖于上白垩统之上 (Morley et al., 1999)。新近纪晚期, 盆地再次抬升, 在东部凹陷、南部隆起及西部凹陷区接受了第四纪沉积。

综上所述, 构造运动控制了盆地的发生和发展。由于 Anza 盆地断裂活动晚, 导致古近纪—新近纪沉积了较大厚度的盖层。盆地构造演化的多旋回性以及断裂活动产生的掀斜断块运动, 尤其是过早发生海侵作用, 对盆地沉积过程产生影响, 使盆地整体呈现“两凹夹一隆”的特征。

6 结论

(1) 受中非剪切带右旋剪切应力作用, 研究区一方面形成北西向拉张断层, 另一方面沿构造软弱带发育北东向断层。重力异常场及其转换参数反映的线性构造特征, 以及地震反射剖面所揭示的断裂展布特征均表明, 研究区北西向断裂与区域构造走向一致, 发育规模较大, 延伸距离长, 控制着 Anza 盆地的边界及盆地内部地层发育, 为基底断裂; 而北东向断裂发育规模小, 一般切断北西向断裂, 构成盆地内局部凹陷与凸起的边界, 是盆地内沉积盖层内部的次生断裂。

(2) 受盆地构造演化的多旋回性, 以及断裂活动性的影响, 基底深度差异大, 总体呈“两凹夹一隆”的特征。基底较深的东部、西部凹陷区沉积了巨厚的中—新生界盖层, 尤其是白垩系、古近系和新近系发育较好。

(3) Anza 盆地的构造演化受北西向和北东向断裂的共同控制, 形成了研究区隆起与凹陷相间分布的格局。以两组断裂的为界, 将研究区分割为东部凹陷、中部凸起、南部隆起和西部凹陷 4 个构造单元, 整体呈现“东西分带、南北分块”的

特征。

References

- BENOIT M H, NYBLADE A A, PASYANOS M E, 2006. Crustal thinning between the Ethiopian and East African plateaus from modeling Rayleigh wave dispersion [J]. *Geophysical Research Letters*, 33 (13): L13301.
- BOONE S C, KOHN B P, GLEADOW A J W, et al., 2018. Tectono-thermal evolution of a long-lived segment of the East African Rift System: thermochronological insights from the North Lokichar Basin, Turkana, Kenya [J]. *Tectonophysics*, 744: 23-46.
- BOSWORTH W, MORLEY C K, 1994. Structural and stratigraphic evolution of the Anza rift, Kenya [J]. *Tectonophysics*, 236 (1-4): 93-115.
- BRUNE S, CORTI G, RANALLI G, 2017. Controls of inherited lithospheric heterogeneity on rift linkage: Numerical and analog models of interaction between the Kenyan and Ethiopian rifts across the Turkana depression [J]. *Tectonics*, 36 (9): 1767-1786.
- CHEN Q, YUAN B Q, DONG Y P, et al., 2013. The new methods to study fault structure by gravity data and applications to TANA sag in Kenya [J]. *Journal of Northwest University (Natural Science Edition)*, 43 (4): 599-605. (in Chinese with English abstract)
- COOPER G R J, COWAN D R, 2006. Enhancing potential field data using filters based on the local phase [J]. *Computers & Geosciences*, 32 (10): 1585-1591.
- CORTI G, 2009. Continental rift evolution: from rift initiation to incipient break-up in the Main Ethiopian Rift, East Africa [J]. *Earth-Science Reviews*, 96 (1-2): 1-53.
- DINDI E W, 1994. Crustal structure of the Anza graben from gravity and magnetic investigations [J]. *Tectonophysics*, 236 (1-4): 359-371.
- EBINGER C J, YEMANE T, HARDING D J, et al., 2000. Rift deflection, migration, and propagation: Linkage of the Ethiopian and Eastern rifts, Africa [J]. *GSA Bulletin*, 112 (2): 163-176.
- FERREIRA F J F, DE SOUZA J, DE B. E S. BONGIOLO A, et al., 2013. Enhancement of the total horizontal gradient of magnetic anomalies using the tilt angle [J]. *Geophysics*, 78 (3): J33-J41.
- FOSTER D A, GLEADOW A J W, 1996. Structural framework and denudation history of the flanks of the Kenya and Anza Rifts, East Africa [J]. *Tectonics*, 15 (2): 258-271.
- GREENE L C, RICHARDS D R, JOHNSON R A, 1991. Crustal structure and tectonic evolution of the Anza rift, northern Kenya [J]. *Tectonophysics*, 197 (2-4): 203-211.
- GUIRAUD R, BOSWORTH W, 1997. Senonian basin inversion and rejuvenation of rifting in Africa and Arabia: synthesis and implications to plate-scale tectonics [J]. *Tectonophysics*, 282 (1-4): 39-82.
- HACKMAN B D, CHARLESLEY T J, KEY R M, et al., 1990. The development of the East African Rift System in north-central Kenya [J]. *Tectonophysics*, 184 (2): 189-211.
- LIU G H, CHEN Q H, 2014. Structure and sedimentary-filling evolution of Anza Basin of East Africa [J]. *Journal of Xi'an University of Science and Technology*, 34 (3): 326-330. (in Chinese with English abstract)

- MA J, WANG W Y, JI X L, 2019. Tectonic characteristics of Cesar basin and its adjacent areas according to gravity field [J]. *Geological Science and Technology Information*, 38 (1): 285-294. (in Chinese with English abstract)
- MILLER H G, SINGH V, 1994. Potential field tilt—a new concept for location of potential field sources [J]. *Journal of Applied Geophysics*, 32 (2-3): 213-217.
- MORLEY C K, BOSWORTH W, DAY R A, et al., 1999. Geology and geophysics of the Anza Graben [M] // MORLEY C K. *Geoscience of Rift Systems—Evolution of East Africa*. America: AAPG Studies in Geology: 67-90.
- MORLEY C K, WESCOTT W A, STONE D M, et al., 1992. Tectonic evolution of the northern Kenyan Rift [J]. *Journal of the Geological Society*, 149 (3): 333-348.
- SHERIFF R E, 1973. *Encyclopedic dictionary of exploration geophysics* [M]. Tulsa: Society of Exploration Geophysicists: 266.
- SWAIN C J, 1979. *Gravity and Seismic Measurements in Kenya* [D]. Leicester: University of Leicester.
- VERDUZCO B, FAIRHEAD J D, GREEN C M, et al., 2004. New insights into magnetic derivatives for structural mapping [J]. *The Leading Edge*, 23 (2): 116-119.
- VETEL W, LE GALL B, WALSH J J, 2005. Geometry and growth of an inner rift fault pattern: the Kino Sogo Fault Belt, Turkana Rift (North Kenya) [J]. *Journal of Structural Geology*, 27 (12): 2204-2222.
- VETEL W, LE GALL B, 2006. Dynamics of prolonged continental extension in magmatic rifts: the Turkana Rift case study (North Kenya) [J]. *Geological Society, London, Special Publications*, 259 (1): 209-233.
- WANG W Y, PAN Y, QIU Z Y, 2009. A new edge recognition technology based on the normalized vertical derivative of the total horizontal derivative for potential field data [J]. *Applied Geophysics*, 6 (3): 226-233.
- WANG W Y, QIU Z Y, YANG Y, et al., 2010. Some advances in the edge recognition of the potential field [J]. *Progress in Geophysics*, 25 (1): 196-210. (in Chinese with English abstract)
- WANG X, LI T L, 2004. Locating the boundaries of magnetic or gravity sources with T_{dr} and $T_{dr}-Th_{dr}$ methods [J]. *Progress in Geophysics*, 19 (3): 625-630. (in Chinese with English abstract)
- WEN Z X, TONG X G, ZHANG G Y, et al., 2012. Petroleum geology features and exploration potential of basin group in East African Rift system [J]. *China Petroleum Exploration*, 17 (4): 60-65. (in Chinese with English abstract)
- WINN R D JR, STEINMETZ J C, KEREKGYARTO W L, 1993. Stratigraphy and rifting history of the Mesozoic-Cenozoic Anza rift,

- Kenya [J]. *AAPG Bulletin*, 77 (11): 1989-2005.
- Xi'an Shiyou University, 2007. The research of integrated interpretation of gravity, aeromagnetics and seismic data of block 9 and 10A of ANZA basin in Kenya Atlas contents [R]. (in Chinese)
- XU W Q, YUAN B Q, LIU B L, et al., 2020. Multiple gravity and magnetic potential field edge detection methods and their application to the boundary of fault structures in northern South Yellow Sea [J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 44 (4): 962-974. (in Chinese with English abstract)
- YANG J S, ZHU X M, 2008. Lower Cretaceous sequence stratigraphy of Fula depression, Muglad basin, Sudan [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 26 (6): 994-1004. (in Chinese with English abstract)
- YUAN B Q, XIE W S, LIU G H, et al., 2012. Gravity field and tectonic features of Block L2 in the Lamu basin, Kenya [J]. *Geophysical Prospecting*, 60 (1): 161-178.
- ZHOU D, WANG W Y, WANG J L, et al., 2006. Mesozoic subduction-accretion zone in northeastern south China sea inferred from geophysical interpretations [J]. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 49 (5): 471-482.

附中文参考文献

- 陈青, 袁炳强, 董云鹏, 等, 2013. 断裂识别新方法及其在肯尼亚 Tana 凹陷中的应用 [J]. *西北大学学报 (自然科学版)*, 43 (4): 599-605.
- 刘桂和, 陈全红, 2014. 东非 Anza 盆地结构及沉积充填演化 [J]. *西安科技大学学报*, 34 (3): 326-330.
- 马杰, 王万银, 纪晓琳, 2019. 利用重力场研究塞萨尔盆地及邻区构造特征 [J]. *地质科技情报*, 38 (1): 285-294.
- 王万银, 邱之云, 杨永, 等, 2010. 位场边缘识别方法研究进展 [J]. *地球物理学进展*, 25 (1): 196-210.
- 王想, 李桐林, 2004. Tilt 梯度及其水平导数提取重磁源边界位置 [J]. *地球物理学进展*, 19 (3): 625-630.
- 温志新, 童晓光, 张光亚, 等, 2012. 东非裂谷系盆地群石油地质特征及勘探潜力 [J]. *中国石油勘探*, 17 (4): 60-65.
- 西安石油大学, 2007. 肯尼亚 ANZA 盆地 9、10A 区块重磁震联合解释研究报告 [R].
- 许文强, 袁炳强, 刘必良, 等, 2020. 多种重磁位场边缘识别方法及在南黄海北部断裂构造识别中的应用研究 [J]. *物探与化探*, 44 (4): 962-974.
- 杨俊生, 朱筱敏, 2008. 苏丹 Muglad 盆地 Fula 坳陷白垩系 Abu Gabra 组层序地层及沉积体系 [J]. *沉积学报*, 26 (6): 994-1004.
- 周蒂, 王万银, 庞雄, 等, 2006. 地球物理资料所揭示的南海东北部中生代俯冲增生带 [J]. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 36 (3): 209-218.

开放科学 (资源服务) 标识码 (OSID):

可扫码直接下载文章电子版, 能听到作者有关文章情况的语音介绍及更多文章相关资讯

