

doi: 10.11720/wtyht.2020.0074

王学发,王万银,马杰,等.基于重力资料的马达加斯加岛及邻区盆地构造单元分布特征[J].物探与化探,2020,44(4):928-937.<http://doi.org/10.11720/wtyht.2020.0074>

Wang X F, Wang W Y, Ma J, et al. A study of the distribution characteristics of basin tectonic units based on gravity data in Madagascar and its adjacent basins [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2020, 44(4): 928-937. <http://doi.org/10.11720/wtyht.2020.0074>

基于重力资料的马达加斯加岛及邻区 盆地构造单元分布特征

王学发^{1,2,3}, 王万银^{1,2,3}, 马杰^{1,2,3}, 杨敏^{1,2,3,4}, 梁建设⁵, 邱春光⁵,
王丁丁^{1,2,3}, 纪晓琳^{1,2,3}, 刘金兰^{1,2,3}

(1.长安大学 重磁方法技术研究所, 陕西 西安 710054; 2.长安大学 地质工程与测绘学院, 陕西 西安 710054; 3.长安大学 西部矿产资源与地质工程教育部重点实验室, 陕西 西安 710054; 4.纽芬兰纪念大学 地球科学系, 加拿大 圣约翰斯市 A1B3X5; 5.中海油研究总院有限责任公司, 北京 100027)

摘要: 随着非洲油气资源对外开放程度的加大,为我国海外石油勘探提供了机遇。非洲低勘探程度区油气地质资料匮乏,矿产资源丰富,为了利用地球物理资料研究马达加斯加岛构造特征,本文搜集了研究区已有的重力资料。根据布格重力异常,采用沉积层重力异常提取、最小曲率场分离、归一化总水平导数垂向导数(NVDR-THDR)、曲率属性深度反演等识别出断裂信息和盆地边界,结合地质资料、地球物理资料,分析了主要断裂的地质及地球物理特征,确定了研究区内的断裂特征和盆地分布。通过研究,推断了研究区内一级断裂9条,二级断裂11条,断裂走向主要为NNE向、NE向和近NS向;结合断裂分布和前人研究现状,重新划分了马达加斯加岛塔姆塔夫盆地、穆伦达瓦盆地和马任加盆地的边界及内部隆坳构造格架,识别了7个坳陷和3个隆起,隆坳构造呈“两坳夹一隆”带状分布。该研究成果可以为马达加斯加岛及邻区油气和矿产资源勘探提供地球物理依据。

关键词: 马达加斯加岛;重力异常;断裂分布;构造单元

中图分类号: P631 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-8918(2020)04-0928-10



0 引言

马达加斯加岛处于非洲板块与印度洋板块的结合部,经历了三期构造演化阶段,岛内地质构造较为复杂,褶皱及断裂发育,油气和矿产资源丰富,勘探程度较低,油气地质资料匮乏。因此,需要对该研究区构造单元进一步研究。前人^[1]对马达加斯加岛的断裂和盆地边界(安比卢贝盆地、马任加盆地、穆伦达瓦盆地、塔姆塔夫盆地、圣玛丽角盆地)做了大量的研究工作,Robertson 和 USGS 主要依据地质资

料划分了盆地边界;温志新等基于地震及地质等资料研究了盆地结构;IHS Markit 综述了研究区内断裂及盆地划分结果^[2];Selley 等基于前人资料综述了研究区内断裂展布^[3]。

通过对研究现状的总结,马达加斯加岛构造单元划分存在以下两个问题:盆地边界在陆地部分基本一致,但盆地之间分界线及盆地海域边界差异较大,且盆地二级构造单元划分等研究程度有限;研究区东部断裂分布研究较少,且断裂分布特征缺乏系统的研究。因此笔者利用重力资料,重新划分了马达加斯加岛断裂展布、盆地边界及内部隆坳构造格局,分析断裂的作用和地质意义,明确其构造区划。

收稿日期: 2020-02-18; 修回日期: 2020-05-28

基金项目: 国家科技重大专项“大型油气田及煤层气开发”专项项目“海外重点区勘探开发关键技术研究”“非洲重点区油气勘探潜力综合评价”(2017ZX05032-002)

作者简介: 王学发(1994-),男,甘肃庆阳人,长安大学硕士研究生,研究方向为重、磁方法理论及应用。Email: wxf20129@163.com

通讯作者: 王万银(1962-),男,博士,教授,博士生导师,主要从事重、磁位场理论及应用研究和教学工作。Email: wwy7902@chd.rdu.cn

研究结果能够有效弥补井、震资料匮乏的不足,为油气及矿产资源勘探提供地球物理依据,缩小异常圈定的范围,降低勘探难度,提高勘探精度,减少钻井验证的经费支出。

1 地质与地球物理概况

1.1 地质背景

马达加斯加岛位于非洲东南部,印度洋西海岸,是世界第四大岛屿,面积 62.7 万 km²。马达加斯加岛经历了三期构造演化阶段:晚石炭世—早侏罗世卡鲁裂谷阶段、晚侏罗世—早白垩世末马达加斯加岛裂谷阶段、晚白垩世至今马达加斯加岛漂移阶段^[4-12]。

1)晚石炭世至早侏罗世,冈瓦纳大陆裂解,形成卡鲁裂谷,主要分布在索马里以南的东非(包括马达加斯加、塞舌尔)各盆地。卡鲁层序以河流相、泛滥平原相、湖相和三角洲相以及少量的海侵为特征,沉积在 NE—SW 走向的裂谷盆地内。

2)晚侏罗世—早白垩世晚期,随着冈瓦纳大陆裂解,马达加斯加板块和南极板块先后与非洲大陆

分离,随后印度板块和南极板块分离,印度洋逐渐张开。马达加斯加板块和印度板块沿 Davie 断裂带向东南运动,马达加斯加板块在早白垩世晚期基本停止运动。马达加斯加裂谷系统相关盆地的碳酸盐岩台地沉积都与局部海侵作用有关。

3)晚白垩世早期,非洲板块东缘和马达加斯加板块西缘进入漂移期被动大陆边缘阶段,马达加斯加板块与印度板块分裂,马达加斯加板块基本停止运动,而印度板块则向 EN 向快速运移。马达加斯加岛的多期构造演化控制了构造单元和盆地的结构。在马达加斯加岛的中东部地区,大约三分之二的岛屿面积具有前寒武纪结晶基底;西部和北部为二叠纪至新生代的沉积盆地,并伴随有白垩纪的玄武质火山岩出露;在东部边缘为带状分布的白垩纪玄武岩和流纹岩^[13-21](图 1)。马达加斯加岛内盆地属于“断陷型”盆地,其典型特征是具有下伏裂谷层系厚、上覆拗陷层系较薄的盆地构造,穆伦达瓦盆地、马任加盆地属于该构造类型,整体特征是纵向分层,横向分带。马达加斯加岛盆地和断裂走向为 NE 向、近 SN 向和 NNE 向展布(图 2)。

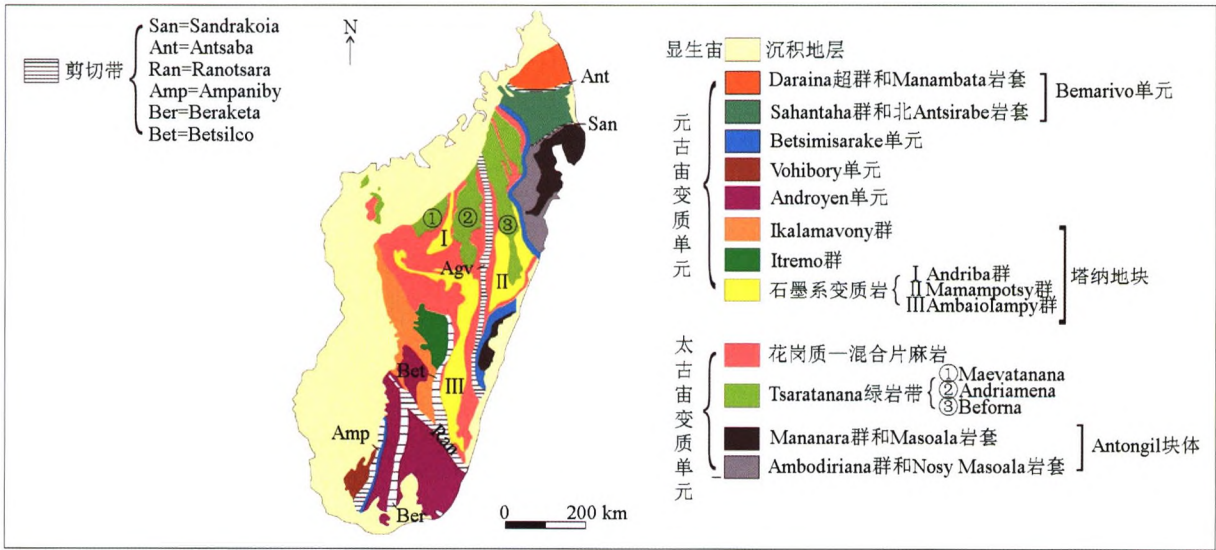


图 1 研究区地质^[14]

Fig.1 Geological map of study area^[14]

1.2 重力场特征

本文的研究范围为东经 38°~55°,南纬 6°~30°,覆盖了整个马达加斯加岛。地形数据(图 3)和卫星测高重力异常数据(图 4)均来自美国两位教授 David T. Sandwell(加利福尼亚大学斯克里普斯海洋研究所)和 Walter H. F. Smith(美国国家海洋与大气局卫星测高实验室)共同维护的全球卫星重力异常数据库中的全球地形数据(V18.1)和重力数据

(V24.1)。地形数据网度为 1'×1',重力数据在海域网度为 1'×1',在陆域网度为 5'×5'。依据密度资料^[22],海水密度取 1.03×10³ kg/m³,新近纪(2.2~2.3)×10³ kg/m³,中生代(2.4~2.5)×10³ kg/m³,基底 2.75×10³ kg/m³,地壳平均密度取 2.30×10³ kg/m³。采用双界面模型重力场快速正演方法^[23]计算海水的重力影响值以及地形影响值,进而得到布格重力异常(图 5)。对布格重力异常进行沉积层重力异常

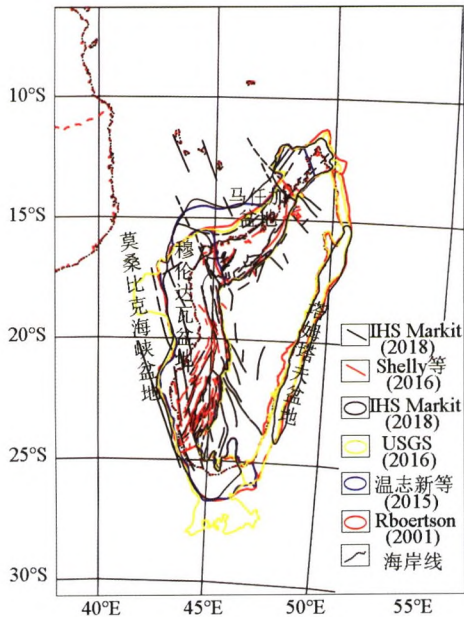


图 2 研究区断裂及盆地研究现状^[1-3]

Fig.2 Distribution map of study area fault and basin^[1-3]

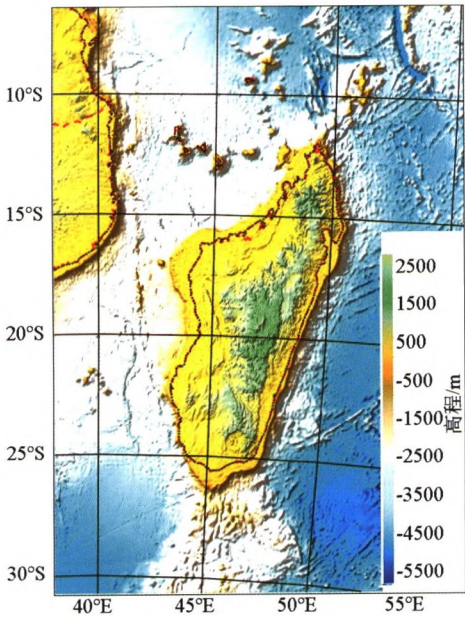


图 3 马达加斯加岛地形

Fig.3 Topography map of Madagascar

提取^[24],得到沉积层重力异常。

马达加斯加岛卫星测高重力异常(图 4)变化范围约为-133~440 mGal。整体上马达加斯加岛中部呈重力高,西部和北部陆域以及该岛周围海域为重力低值区。卫星测高重力异常的走向以 NNE 向、NE 向和近 SN 向为主,这与地质构造的走向一致。

马达加斯加岛布格重力异常(图 5)变化范围约为-141~326 mGal。马达加斯加岛整体呈现重力低,西部和北部海域处于重力低与重力高过渡区,东部海域为重力高值区。布格重力异常的梯级带反映为研究区内不同规模的断裂位置和岩体接触位置,

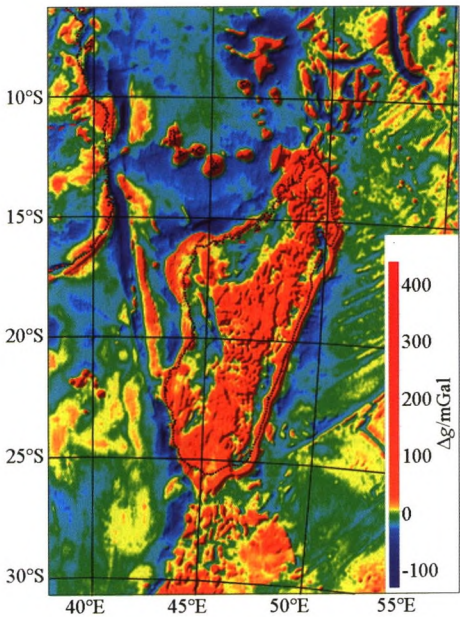


图 4 马达加斯加岛卫星测高重力异常

Fig.4 Satellite altimetry gravity anomaly map of Madagascar

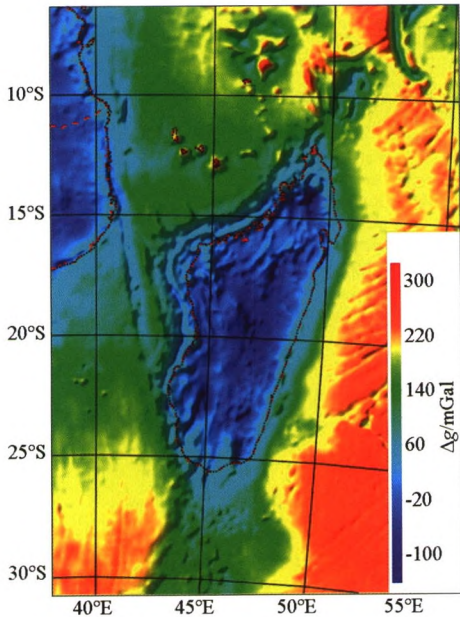


图 5 马达加斯加岛布格重力异常

Fig.5 Bouguer gravity anomaly map of Madagascar

高低变化也进一步说明马达加斯加岛及邻区地质构造的不对称性以及地壳厚度的变化。

2 马达加斯加岛断裂分布

笔者采用布格重力异常归一化总水平导数垂向导数技术(NVDR-THDR)^[25]识别断裂平面位置。深大断裂可以控制两侧的构造形成不同的构造格局,从而破坏原来地质体的连续性,形成物性上的横向差异。由于密度的横向差异必然在重力异常上有

所表现,因而可以用布格重力异常的归一化总水平导数垂向导数(NVDR-THDR)来划分断裂的平面分布位置。断裂平面位置的主要识别标志为布格重力异常 NVDR-THDR 极大值连线或极大值错段位置,在布格重力异常 NVDR-THDR 的极大值连续性较差的地方,需结合布格重力异常特征进行判断。断裂视深度是根据重力异常曲率属性反演方法^[26],利用布格重力异常反演得到。

结合前人断裂研究成果和地质构造,本次在马达加斯加岛及邻区推断断裂 20 条(图 6a),根据断裂是否控制盆地边界,将推断结果划分为一级断裂和二级断裂,其中一级断裂 9 条,二级断裂 11 条。利用布格重力异常曲率属性反演方法得到断裂视深度(图 6b),由图 6b 可以看出,断裂视深度在 2~8 km。根据断裂走向和长度绘制断裂走向玫瑰花图(图 7),从图中可以看出断裂走向主要为 NNE 向、

NE 向和近 SN 向,其次为 NW 向和近 EW 向。对断裂长度进行统计得到断裂长度的频数分布直方图(图 7b),可以看出研究区以中小规模断裂为主,大规模断裂较少。

与前人研究成果^[2-3]相比(图 8),断裂走向基本一致,与地质构造运动基本吻合,断裂体系更为明确。断裂分布位置及走向与地质构造的位置和方向吻合,研究区北部在中侏罗纪受马达加斯加岛与非洲大陆分离的影响形成 NE 向断裂;西部在晚侏罗纪至早白垩纪受马达加斯加岛漂移走滑的影响形成近 SN 向断裂;东部在晚白垩世主要受印度板块与马达加斯加岛分离的影响形成 NNE 向断裂。

根据布格重力异常 NVDR-THDR(图 9)和布格重力异常(图 10),下面对识别的一级断裂详细论述。一级断裂属性统计结果见表 1 所示。

F1-1 位于马达加斯加岛东部海域,F1-2 位于马

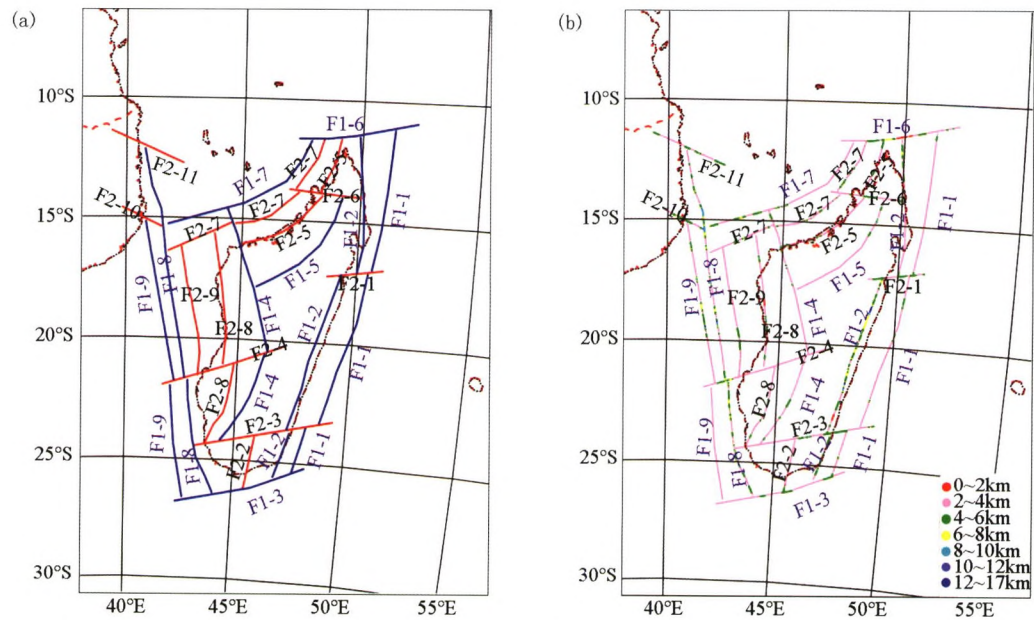


图 6 马达加斯加岛及邻区断裂平面位置分布(a)和视深度(b)
Fig.6 The plane location distribution of faults (a) and their apparent depth (b) in the Madagascar and its adjacent area

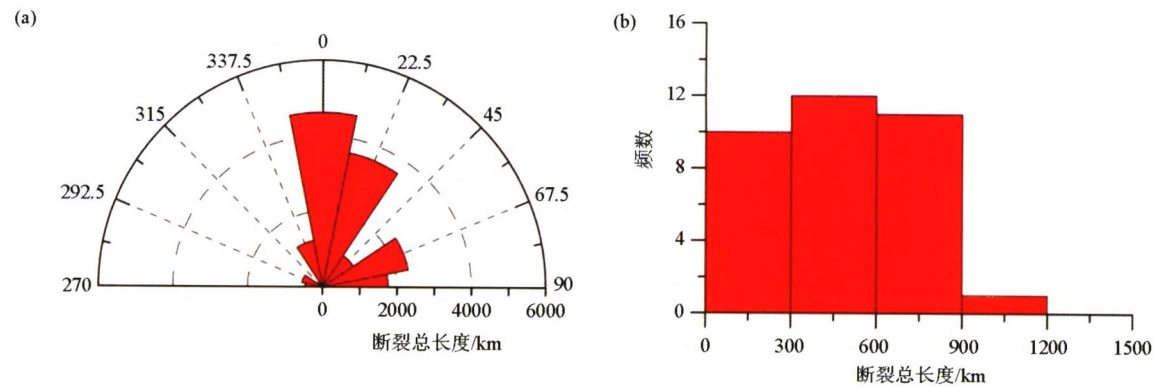


图 7 马达加斯加岛断裂走向玫瑰花图(a)和断裂长度的频数分布直方图(b)
Fig.7 The rose diagram of faults'strikes (a) and histogram of frequency distribution of faults'length(b) in the Madagascar

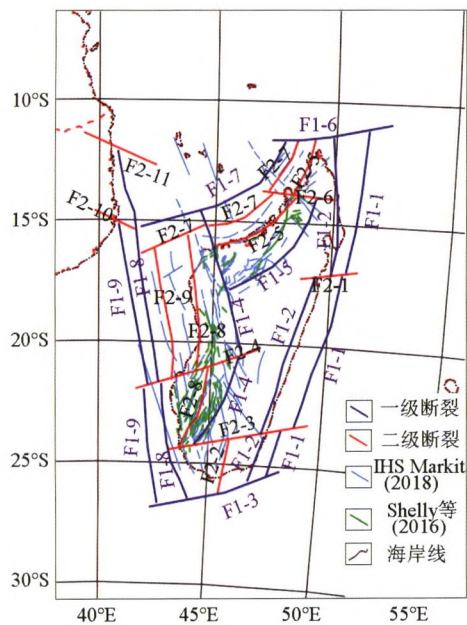


图 8 本次断裂划分结果与前人研究结果
Fig.8 Determined faults and the results of previous studies

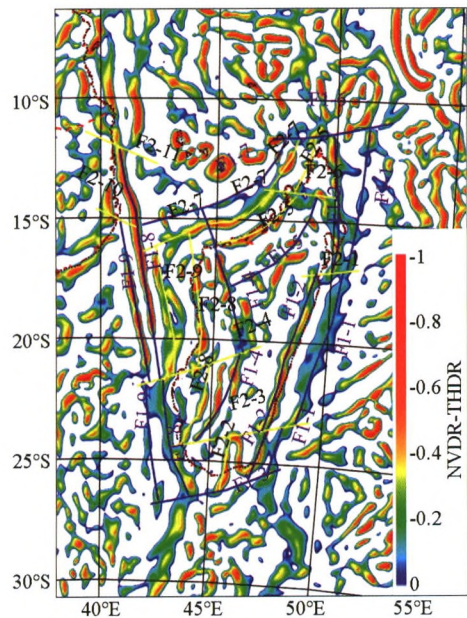


图 9 断裂与布格重力异常 NVDR-THDR
Fig.9 Faults and NVDR-THDR of Bouguer gravity anomaly

达加斯加岛东部海岸线附近,F1-1、F1-2 位于布格重力高与重力低过渡带之间,极大值连续性好,均为 NNE 向,F1-1 两侧极大值走向不同,西侧为 NNE 向,受印度—塞舌尔板块和马达加斯加岛分离的影响而形成,东侧为 NE 向,受印度—塞舌尔板块漂移的影响而形成,推断 F1-1、F1-2 断裂控制塔姆塔夫盆地边界。

F1-3 位于马达加斯加岛南部海域,F1-3 断裂北侧和南侧极大值走向发生变化,且 F1-3 南北两侧布格重力异常特征不同,南部为 NNE 向,北部为近 SN 向,由此推断 F1-1、F1-2、F1-8、F1-9 四条断裂向南延伸至 F1-3 为止。

F1-4 位于马达加斯加岛西部陆域内,受马达加斯加岛漂移影响主要为 NNW-NNE 向,极大值连续性好,且位于布格重力高与重力低过渡带之间,推断为穆伦达瓦盆地东部边界。F1-5 位于马达加斯加岛北部陆域内,F1-7位于马达加斯加岛北部海域

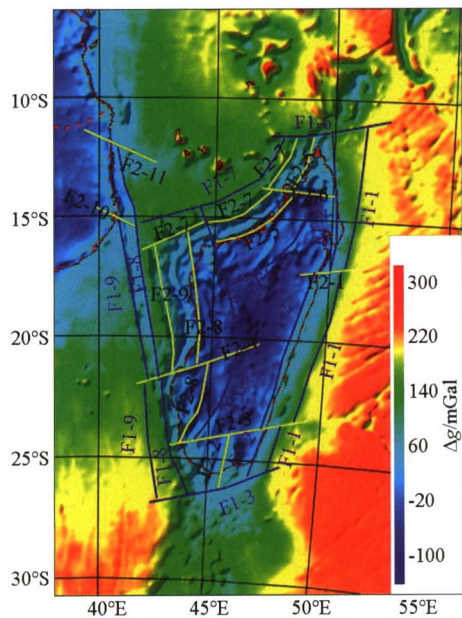


图 10 断裂与布格重力异常
Fig.10 Faults and Bouguer gravity anomaly

表 1 研究区一级断裂属性统计

Table 1 The statistical table of attributes of first-class fault

编号	走向	位置	性质	长度/km	备注
F1-1	NNE	东部洋壳边界	扩张	1588	3
F1-2	NNE	东部陆架—陆坡转换带	扩张	1596	3
F1-3	NEE	南部洋壳边界	扩张	618	1
F1-4	NNW-NEE	马达加斯加岛西部	扩张	1129	2
F1-5	NE	马达加斯加岛北部	扩张	594	1
F1-6	近 EW	北部洋壳边界	扩张	556	1
F1-7	NEE	北部洋壳边界	扩张	803	1
F1-8	近 SN	西部洋壳边界	走滑	2445	2
F1-9	近 SN	西部陆架—陆坡转换带	走滑	2023	2

内,F1-5、F1-7 断裂走向为 NE 向,受马达加斯加岛与索马里分离的影响而形成,F1-5 南部极大值走向发生变化,为 NNE 向,推断为马任加盆地南部边界;F1-7 推测为洋陆边界。F1-6 位于马达加斯加岛东北部海域,南侧极大值和布格重力异常走向为 NNE 向和 NE 向,北侧受火山岛影响,走向发生变化,为环状,故 F1-1、F1-2 和 F1-7 断裂被 F1-6 断裂所截。

F1-8 位于坦桑尼亚东部海域至马达加斯加岛西部海域、F1-9 位于坦桑尼亚海岸线、莫桑比克东部海岸线附近至马达加斯加岛西部海域,F1-8、F1-9 断裂走向为近 SN 向,极大值连续性特征明显,主要受马达加斯加岛由北向南漂移走滑—拉张作用控制,形成 Davie 断裂带。在 F2-11 断裂(位于坦桑尼亚和莫桑比克国界线附近,方向为 NW 向)位置 F1-8 断裂发生错断,受马达加斯加岛漂移方向发生改变的影响而形成,F1-8 断裂及西侧极大值特征受马达加斯加岛漂移过程西部边缘影响形成,F1-8 断裂东侧极大值连续性较差,被火山岛和 NW 向断裂所截断,推断受马达加斯加岛漂移过程中部和北部影响形成。根据地震剖面解释,F1-8 为洋壳陆壳边界。

与前人断裂划分相比,前人未识别的断裂有研究区东部 NNE 向断裂、南部和北部 NEE 向断裂,西部和北部断裂多不连续,且对断裂未进行分级。本文研究认为,东部 F1-1 和 F1-2 断裂延伸至马达加斯加岛南部和北部;研究区南部和北部分别被 F1-3 和 F1-6 断裂所截断;西部和北部断裂走向和切割关系与前人划分结果大致相同,但断裂体系更加明确。根据地质演化,北部 NE 向断裂形成时间最早,主要为中侏罗纪裂谷期断裂;晚侏罗纪开始,马达加斯加岛开始漂移形成西部近 SN 向的走滑断裂;东部 NEE 向断裂形成时间最晚,主要为晚白垩世印度板块与马达加斯加岛分离形成裂谷期断裂。

3 马达加斯加岛盆地构造特征

前人对马达加斯加岛盆地边界的主要认识是陆域以前寒武纪基底为界,海域以海水等深线为界。本次研究在前人研究的基础上,结合本次划分的断裂和研究区重力异常,以及地质构造,重新划分了研究区内穆伦达瓦、马任加、塔姆塔夫盆地边界及内部隆拗格局(图 11),认为盆地边界均以断裂为界。

由于布格重力异常是地下地质体的综合响应,反映了地下不同大小和埋深地质体的叠加效果。为了研究不同的地质体,需要从叠加场中分离出各地质体的异常,实现规模、强弱不同的异常分离,从而

为盆地边界划分提供更有效的信息。本次对布格重力异常采用沉积层重力异常提取方法获得了研究区的沉积层重力异常,再采用最小曲率位场分离方法^[27-28],获得了研究区的沉积层区域重力异常(图 12)和沉积层剩余重力异常(图 13)。根据沉积层剩余重力异常,采用双界面模型重力场快速正反演方法^[23],可反演得到基底深度,进而可计算得到沉积层厚度(图 14)。利用沉积层区域重力异常的等值线走向确定盆地的大致走向,利用沉积层剩余重力异常的高值带划分盆地边界,利用沉积层剩余重力异常的零值线划分盆地内部隆拗构造的边界。在划分盆地边界和内部隆拗构造格局过程中,同时结合了本次划分的断裂和计算得到的沉积层厚度。

沉积层区域重力异常(图 12)在马达加斯加岛中部呈现重力高,海域为重力低值区,东部等值线走向为 NNE 向,西部和北部陆域为重力低和重力高过渡区,方向分别为近 SN 向和 NE 向,沉积层区域重力异常等值线走向确定了盆地的走向。沉积层剩余重力异常(图 13)在岛周围具有明显的高值带和低值带相间分布的带状特征。沉积层厚度(图 14)整体呈现“陆厚洋薄”的特征,在海岸线附近陆域最厚,超过 10 km,盆地较薄处大约为 5~6 km,同时也具有带状分布特征。

利用沉积层剩余重力异常高值带及其零值线,结合沉积层厚度对马达加斯加岛及邻区进行盆地划分。重新划分了穆伦达瓦盆地、马任加盆地和塔姆

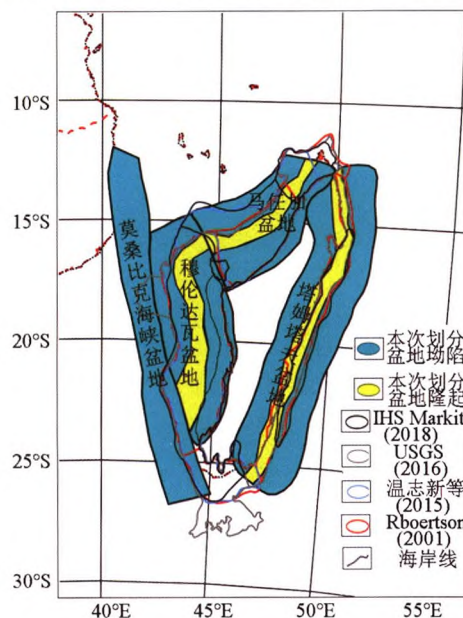


图 11 本次划分盆地结果与前人研究结果

Fig.11 Determined boundaries of basin and the results of previous studies

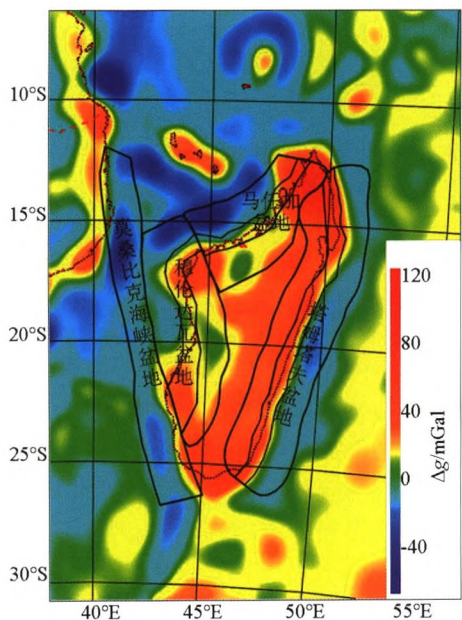


图 12 马达加斯加岛沉积层区域重力异常
Fig.12 Sediments of regional gravity anomaly
map in Madagascar

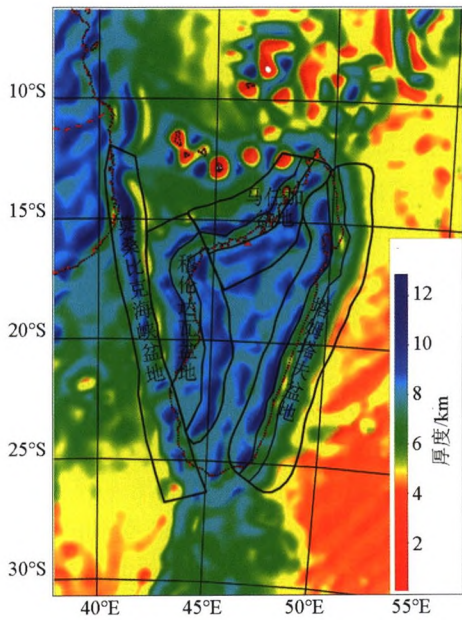


图 14 马达加斯加岛沉积层厚度
Fig.14 Thickness of sedimentary map of Madagascar

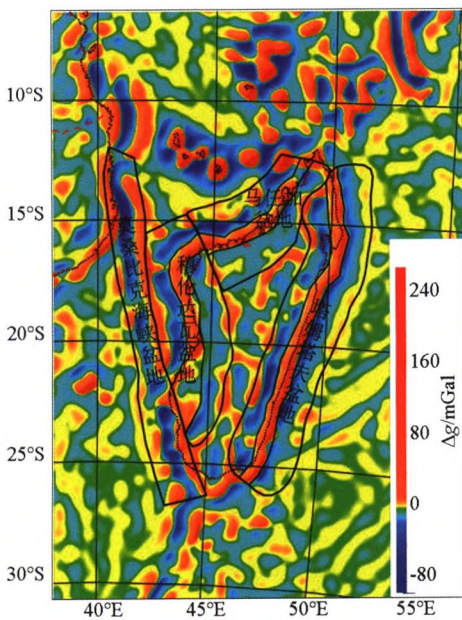


图 13 马达加斯加岛沉积层剩余重力异常
Fig.13 Sediments of residual gravity anomaly
map in Madagascar

塔夫盆地,识别了莫桑比克海峡盆地,盆地总体呈 NNE 走向、NE 走向和近 SN 走向。与前人研究结果相比,盆地陆域边界基本相同,海域边界和盆地分界线有所不同,且划分了盆地内部隆坳构造单元。东部塔姆塔夫盆地受印度—塞舌尔板块张裂和漂移的影响,走向为 NNE 向,受 F1-1 和 F1-2 断裂控制,与前人盆地边界划分相比,扩充了东西两侧盆地边界,东部边界位于区域重力高与重力低过渡带位置,沉积层剩余重力异常西部为 NNE 向,东部为 NE 向。

东部穆伦达瓦盆地受马达加斯加岛由北向南漂移影响,走向为近 SN 向,受 F1-4 断裂和 F1-8 (Davie 东断裂)断裂控制,东西部边界位于区域重力高和重力低过渡带位置,东西部边界与前人边界划分基本一致,与 USGS 划分结果相比,缩小了南部边界,马任加盆地分界线依据异常走向修改为 NNW 向。北部马任加盆地受马达加斯加岛与索马里张裂影响,走向为 NE 向,受 F1-5 和 F1-7 断裂控制,南部边界位于区域重力高和重力低过渡带位置,且南侧沉积层区域重力异常和沉积层剩余重力异常走向转变为 NNE 向,北部边界北侧沉积层区域重力异常和沉积层剩余重力异常走向转变为 NW 向,相比 IHS Markit 划分结果,依据沉积层区域重力异常和沉积层剩余重力异常走向特征和连续性,合并了安比卢贝盆地与马任加盆地。在马达加斯加岛东部海域,依据沉积层区域重力异常低和沉积层剩余重力异常低走向,划分了莫桑比克海峡盆地,主要受 F1-13 和 F1-19 断裂 (Davie 东断裂)控制。

马达加斯加岛及邻区盆地内部隆坳构造整体呈现“两坳夹一隆”的带状分布特征。东部塔姆塔夫盆地走向为 NNE 向,东部坳陷相比西部坳陷沉积层厚度较小,约为 8.5 km,西部坳陷约为 10 km,中部隆起沉积层厚度约为 6 km。西部穆伦瓦达盆地走向为近 SN 向,两侧坳陷沉积层厚度约为 10 km,中部隆起约为 7 km。北部马任加盆地走向为 NE 向,南部坳陷沉积层厚度约为 9.5 km,北部坳陷沉积层最厚处超过 11 km,中部隆起厚度约为 7 km。

盆地的形成和演化与断裂密不可分,断裂往往

控制着沉积层的分布范围、盆地边界(图 15)。本文研究认为 F1-1 拉张断裂控制了东部塔姆塔夫盆地海域边界,其东侧为印度板块漂移形成的沉积地层,西侧为张裂作用形成的构造演化;F1-4 断裂两侧沉积地层有所不同,东部为前寒武纪基底,西部为沉积层,F1-8 断裂为马达加斯加岛在漂移过程中形成的 Davie 走滑断裂,分别控制了穆伦达瓦盆地的陆域边界和海域边界;F1-5 南部为前寒武纪基底,北部为沉积层,F1-7 断裂南部为马达加斯加岛张裂作用形成的构造,北部为漂移过程形成的沉积层,分别控制了马任加盆地的陆域边界和海域边界;重新划分的莫桑比克海峡盆地受 Davie 断裂带 F1-8 和 F1-9 断裂控制。盆地划分结果与前人^[1-2]研究对比(图 10),可以看出塔姆塔夫盆地东西边界有所扩大,穆伦达瓦盆地东西边界基本一致,南部边界有所缩小,与马任加盆地分界线有所不同;马任加盆地陆域边界基本一致,海域边界有所扩充,东部合并了安比卢贝盆地。整体而言,本次划分的盆地边界陆域基本一致,海域有所不同。

综上所述,马达加斯加岛及邻区盆地演化过程中受到断裂的控制作用,整体呈现带状特征,其内部隆坳构造呈现“两坳夹一隆”的特征。

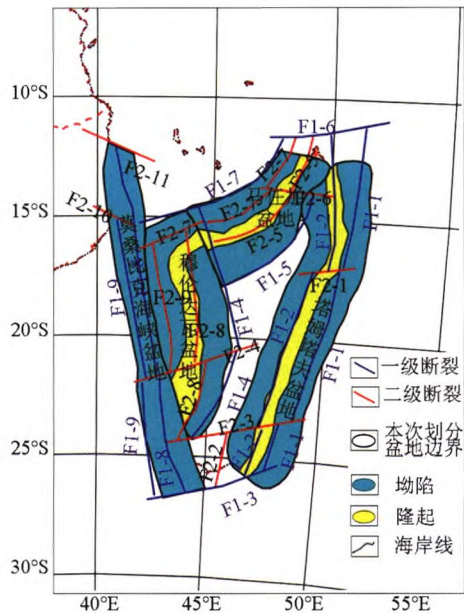


图 15 马达加斯加岛构造区划
Fig.15 Tectonic division map of Madagascar

4 结论与建议

通过对马达加斯加岛及邻区重力资料的处理与分析,结合地质资料,得到以下几点结论:

1) 在研究区内推断断裂 20 条,其中一级断裂 9

条,二级断裂 11 条。断裂走向主要为 NNE 向、NE 向和近 SN 向,其次为 NNE 向和近 EW 向;断裂视深度约为 2~8 km。识别了前人在研究区东部未识别的断裂,并对研究区内断裂进行分级,使得断裂体系更加明确。

2) 重新划分了 3 个盆地边界(塔姆塔夫盆地、穆伦达瓦盆地、马任加盆地),识别了莫桑比克海峡盆地边界,盆地面积约 117.1 km²,走向为 NNE 向、NE 向和近 SN 向,断裂走向与盆地展布方向一致,一级断裂多控制盆地边界和走向,二级断裂控制盆地内部隆坳构造格局。在各盆地内共识别 7 个坳陷和 3 个隆起,具有“两坳夹一隆”的带状分布特征。

通过本文研究,对马达加斯加岛及邻区断裂平面位置分布和盆地边界有了基本认识,但还不够深入和细致,建议继续开展这方面工作,充分利用地球物理资料,对深部构造做进一步研究,并可持续关注本次新识别的盆地,展开相应的验证性工作。

参考文献 (References):

[1] 温志新,王兆明,宋成鹏,等. 东非被动大陆边缘盆地结构构造差异与油气勘探[J]. 石油勘探与开发,2015, 42(5):671-680.
Wen Z X, Wang Z M, Song C P, et al. Structural architecture difference and petroleum exploration of passive continental margin basins in East Africa [J]. Petroleum Exploration and Development, 2015, 42(5):671-680.

[2] IHS. International energy oil & gas industry solution[DB/OL]. [2018-12-30]. <http://www.ihs.com/industry/oil-gas/international.aspx>.

[3] Selley R C, Van Der Spuy D. The oil and gas basin of Africa[J]. IUGS, 2016, 39(2):429-445.

[4] 黄国平,胡清乐,陈冬明,等. 马达加斯加地质矿产概况[J]. 资源环境与工程, 2014, 28(5):626-632.
Huang G P, Hu Q L, Chen D M, et al. Overview of Madagascar geology and minerals[J]. Resources Environment & Engineering, 2014, 28(5): 626-632.

[5] 许志刚,韩文明,孙玉梅. 东非大陆边缘构造演化过程与油气勘探潜力[J]. 中国地质, 2014, 41(3):961-969.
Xu Z G, Han W M, Sun Y M. Tectonic evolution and petroleum exploration prospect of East Africa[J]. Geology in China, 2014, 41(3):961-969.

[6] 张光亚,刘小兵,温志新,等. 东非被动大陆边缘盆地构造—沉积特征及其对大气田富集的控制作用[J]. 中国石油勘探, 2015, 20(4):71-80.
Zhang G Y, Liu X B, Wen Z X, et al. Structural and sedimentary characteristics of passive continental margin basins in east Africa and their effect on the formation of giant gas fields[J]. China Petroleum Exploration, 2015, 20(4): 71-80.

[7] 张光亚,刘小兵,赵健,等. 东非被动大陆边缘盆地演化及大气田形成主控因素:以鲁伍马盆地为例[J]. 地学前缘, 2018,

- 25(2):24-32.
- Zhang G Y, Liu X B, Zhao J, et al. Passive continental margin basin evolution of East Africa and the main controlling factors of giant gas fields: an example from the Rovuma Basin[J]. *Earth Science Frontiers*, 2018, 25(2): 24-32.
- [8] 于璇, 侯贵廷, 代双河, 等. 东非大陆边缘构造演化与油气成藏模式探析[J]. *地质科技情报*, 2015, 34(6):147-158.
- Yu X, Hou G T, Dai S H, et al. Tectonic evolution and hydrocarbonpooling patterns analysis in East Africa continental margin[J]. *Geological Science and Technology Information*, 2015, 34(6): 147-154.
- [9] Phethean J J J, Kalnins L M, Hunen J V, et al. Madagascar's escape from Africa: A high-resolution plate reconstruction for the Western Somali Basin and implications for supercontinent dispersal[J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2016, 17(12):5036-5055.
- [10] Collins A S, Windley B F. The tectonic evolution of central and northern Madagascar and its place in the final assembly of Gondwana Madagascar: Its place in the Last African Orogen[J]. *Journal of Geology*, 2002, 110(3):325-340.
- [11] Collins A S, Kroner A, Fitzsimons I C W, et al. Structure of the eastern margin of the East African Orogen in central Madagascar[J]. *Precambrian Research*, 2003, 123(2):111-133.
- [12] Schandelmeyer H, Bremer F, Holl H G. Kinematic evolution of the Morondava rift basin of SW Madagascar - from wrench tectonics to normal extension[J]. *Journal of African Earth Sciences*, 2003, 38(4):321-330.
- [13] 刘田, 王志敏, 丁媛媛. 马达加斯加前寒武纪地质构造单元划分[J]. *科技创新导报*, 2011(6):254.
- Liu T, Wang Z M, Ding Y Y. Precambrian geology tectonic units of Madagascar[J]. *Science and Technology Innovation Herald*, 2011(6): 254.
- [14] 杨明建, 狄永军, 张达, 等. 马达加斯加 Antanisoa 石墨矿床成因分析[J]. *矿床地质*, 2020, 39(2):381-396.
- Yang M J, Di Y J, Zhang D, et al. Genetic analysis of Antanisoa graphite deposit in Madagascar[J]. *Mineral Deposits*, 2020, 39(2):381-396.
- [15] Windley B F, Razafiniparany A, Razakamanana T, et al. Tectonic framework of the Precambrian of Madagascar and its Gondwana connections: a review and reappraisal[J]. *Geologische Rundschau*, 1994, 83(3):642-659.
- [16] 李俊锋, 李金虎, 朱玉婷. 马达加斯加铬铁矿分布特征及成因简析[J]. *西部资源*, 2016(4):1-2.
- Li J F, Li J H, Zhu Y T. Distribution feature and formation of chromium deposit in the Madagascar[J]. *Western Resources*, 2016(4): 1-2.
- [17] 车继英, 赵院冬, 王奎良, 等. 马达加斯加前寒武纪变质基底特征综述[J]. *地质与资源*, 2013, 22(4):340-346.
- Che J Y, Zhao Y D, Wang K L, et al. Overview of the Precambrian geology of Madagascar[J]. *Geology and Resources*, 2013, 22(4): 340-346.
- [18] 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.
- Ma J, Liu J P, Pan X H, et al. Geological characteristics and prospect on hydrocarbon exploration in east Africa continental margin[J]. *Global Geology*, 2008, 27(4):400-405.
- [19] 金宠, 陈安清, 楼章华, 等. 东非构造演化与油气成藏规律初探[J]. *吉林大学学报:地球科学版*, 2012, 42(s2):121-130.
- Jin C, Chen A Q, Lou Z H, et al. Tectonic evolution and hydrocarbon accumulation principle in east Africa[J]. *Journal of Jilin University: Earth Science Edition*, 2012, 42(s2): 121-130.
- [20] Geiger M, Schweigert G. Toarcian-Kimmeridgian depositional cycles of the south-western Morondava Basin along the rifted continental margin of Madagascar[J]. *Facies*, 2006, 52(1):85-112.
- [21] 何文祥, 江凯禧, 万欢, 等. 东非 Morondava 盆地 Tsimiroro 稠油油田成藏特征[J]. *地质科技情报*, 2017, 36(5):60-68.
- He W X, Jiang K X, Wan H, et al. Heavy oil accumulation characteristic of the Tsimiroro oilfield in Morondava Basin, Easter Africa[J]. *Geological Science and Technology Information*, 2017, 36(5): 60-68.
- [22] Tamannai M S, Winstone D, Deighton I. An evaluation of the petroleum system-offshore Morondava basin, Madagascar, based on 2D seismic data interpretation[C]//European Association of Geoscientists & Engineers. 70th EAGE Conference & Exhibition, 2009:1-5.
- [23] 王万银, 潘作枢. 双界面模型重力场快速正反演问题[J]. *石油物探*, 1993, 32(2):81-87, 123.
- Wang W Y, Pan Z S. Fast solution of forward and inverse problem for gravity field in a dual interface model[J]. *Geophysical Prospecting for Petroleum*, 1993, 38(2):81-87, 123.
- [24] 王万银, 任飞龙, 王云鹏, 等. 重力勘探在沉积型铝土矿床调查中的应用研究[J]. *物探与化探*, 2014, 38(3):409-416.
- Wang W Y, Ren F L, Wang Y P, et al. The application research on the gravity exploration in sedimentary bauxite deposit survey[J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2014, 38(3): 409-416.
- [25] Wang W Y, Pan Y, Qiu Z Y. A new edge recognition technology based on the normalized vertical derivative of the total horizontal derivative for potential data[J]. *Applied Geophysics*, 2009, 6(3):226-233.
- [26] 刘金兰. 重磁位场新技术与山西断陷盆地构造识别划分研究[D]. 西安:长安大学, 2008.
- Liu J L. Development new technologies for potential field processing and research on the tectonic recognition & division of Shanxi fault basin[D]. Xi'an: Chang'an University, 2008.
- [27] 纪晓琳, 王万银, 邱之云. 最小曲率位场分离方法研究[J]. *地球物理学报*, 2015, 58(3):1042-1058.
- Ji X L, Wang W Y, Qiu Z Y. The research to the minimum curvature technique for potential field data separation[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2015, 58(3): 1042-1058.
- [28] 纪晓琳, 王万银, 邱之云. 最小曲率位场分离方法参数选择试验研究[J]. *地球物理学进展*, 2019, 34(4):1441-1452.
- Ji X L, Wang W Y, Qiu Z Y. Parameter choose experimental research to the minimum curvature technique potential field data separation method[J]. *Progress in Geophysics*, 2019, 34(4): 1441-1452.

A study of the distribution characteristics of basin tectonic units based on gravity data in Madagascar and its adjacent basins

WANG Xue-Fa^{1,2,3}, WANG Wan-Yin^{1,2,3}, MA Jie^{1,2,3}, YANG Min^{1,2,3,4}, LIANG Jian-She⁵, QIU Chun-Guang⁵,
WANG Ding-Ding^{1,2,3}, JI Xiao-Lin^{1,2,3}, LIU Jin-Lan^{1,2,3}

(1. *Institute of Gravity and Magnetic Technology, Chang'an University, Xi'an 710054, China*; 2. *College of Geology Engineering and Geomatics, Chang'an University, Xi'an 710054, China*; 3. *Key Laboratory of Western China's Mineral Resources and Geological Engineering, Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an 710054, China*; 4. *Department of Earth Sciences, Memorial University of Newfoundland, St. John's, A1B3X5, Canada*; 5. *Cnooc Research Institute Limited, Beijing 100027, China*)

Abstract: With offering the increasing opening exploration of oil and gas resources to the oversea exploration companies in Africa which remains in an early exploration stage, a good opportunity is provided for the companies in China. In this study, the gravity data of this research area were collected in order to study the tectonic characteristics of Malagasy Island, which has insufficient oil and gas geological data but abundant mineral resources. The faults and the boundaries of this basin were identified according to the response of the gravity anomaly to the sediments by the separation method of the minimum curvature, the vertical derivative of the normalized total horizontal derivative (NVDR-THDR) and the inversion of the depth of the curvature attribute, with Bouguer gravity anomaly. The geological and geophysical characteristics of the main faults were analyzed, and the distribution characteristics of faults and basins were determined, which were based on the geological and geophysical data. According to this research, there are 9 primary faults and 11 secondary faults inferred in this study area trending NNE, NE and nearly NS. The tectonics of Tamatave Basin, Morondava Basin and Majunga Basin were re-divided into 7 depressions and 3 uplifts combined with the distribution of faults from this study and previous studies, which are shown as a zonal distribution like "two depressions with one uplift". This research can provide geophysical information for exploration of oil, gas and mineral resources in Madagascar and its adjacent regions.

Key words: Madagascar; gravity anomaly; fracture distribution; tectonic units

(本文编辑:王萌)