第44卷第4期 2020年8月

doi: 10.11720/wtyht.2020.0070

马涛,朱莹洁,杨永,等.基于重磁异常的嘉偕平顶山群构造区划特征研究[J].物探与化探,2020,44(4):938-948.http://doi.org/10.11720/wtyht. 2020.0070

Ma T, Zhu Y J, Yang Y, et al. Research on tectonic division in Jiaxie guyots based on gravity and magnetic anomalies [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2020, 44(4):938-948. http://doi.org/10.11720/wtyht.2020.0070

# 基于重磁异常的嘉偕平顶山群构造区划 特征研究

马涛<sup>1,2,3</sup>,朱莹洁<sup>1,2,3,4</sup>,杨永<sup>5,6</sup>,纪晓琳<sup>1,2,3</sup>,王丁丁<sup>1,2,3</sup>,刘金兰<sup>1,2,3</sup>,王万银<sup>1,2,3</sup> (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.自然资源部 海底矿产资源重点实验室, 广东 广州 510075;6.中国地质调查局 广州海洋地质调查局,广东 广州 510075)

摘要:西太平洋嘉偕平顶山群是中国富钴结壳合同区之一,蕴藏钴等战略性金属矿产资源。由于海山的局部构造 对矿产资源的宏观分布具有重要的控制作用,因此研究海山的构造区划对于认识海山的形成过程及矿产资源勘探 具有十分重要的意义。笔者利用嘉偕平顶山群的重、磁异常数据和地形数据,采用归一化总水平导数垂向导数 (NVDR-THDR)断裂识别方法与曲率属性深度反演方法研究了嘉偕平顶山群的断裂分布特征,利用最小曲率位场 分离方法研究了侧翼裂谷带及重力滑塌区的分布特征。研究表明,嘉偕平顶山群的断裂走向以 NW 和 NE 向为主, 其次为 NNW 和 NEE 向;断裂视深度在 3000~7000 m 之间,且 NW 向断裂深度比 NE 向断裂的深度浅,NW 向与 NE 向断裂相互交叉构成了呈雁行式排列的共轭剪切断裂带,为海山形成与岩墙侵入提供了重要通道。侧翼裂谷带是 岩浆沿断裂通道侵入发育而成,使得海山呈现不规则的星形,因此通常位于海山地形不规则延伸地带。在侧翼裂 谷带的发育过程中,由于受地震等构造活动的影响,会产生重力滑塌,在其两侧形成了滑塌沉积区,因此重力滑塌 区通常位于海山陡峭边缘与侧翼裂谷带的两侧。本次研究成果为嘉偕平顶山群的形成过程及富钴结壳资源综合 评价提供了重要的构造依据。

关键词: 嘉偕平顶山群;NVDR-THDR; 最小曲率; 曲率属性; 断裂; 侧翼裂谷带; 重力滑塌 中图分类号: P631 文献标识码: A 文章编号: 1000-8918(2020)04-0938-11



0 引言

基于卫星测高重力数据的全球海山普查结果显示,远离大陆边缘的高度大于 0.1 km 的海山共有 24 643 座,其中高于 1 km 的海山共 8 458 座<sup>[1]</sup>。全 球近 50%的海山位于太平洋板块,其中以西太平洋 最为发育。近年来,我国针对位于西太平洋的麦哲 伦海山链进行了科学考察及研究。麦哲伦海山链位 于西太平洋马里亚纳海盆,西侧为马里亚纳海沟,整 个海山链属于大型断块隆起,延长近 1 200 km,海山 年龄在 80~120 Ma 之间,其洋壳基底为中侏罗世— 早白垩世的玄武岩。海山链由多座海山共同组成, 包括 Vlinder、Loah、Pallada、Ita Mai Tai(嘉偕平顶山 群)等,整体呈 NW 向链状分布,单座海山的走向为 NE 向。目前关于麦哲伦海山链的成因主要有两种 观点,即断裂成因和热点成因。断裂成因所依赖的 证据是磁条带展布特征和地层分布特征,热点成因

收稿日期: 2020-02-17; 修回日期: 2020-05-28

基金项目:中国大洋"十三五"资源环境类课题"合同区海山地形单元识别与底质类型研究"(DY135-C1-1-03);国家重点研发计划项目"典型 覆盖区航空地球物理技术示范与处理解释软件平台开发"项目(2017YFC0602200)之课题"航空地球物理数据综合处理解释方法研 究及软件开发"(2017YFC0602202)

作者简介:马涛(1994-),男,长安大学硕士研究生,研究方向为重、磁方法理论及应用。Email:taoma@ chd.edu.cn

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.edu.cn

所依赖的证据则是热点追踪和视极漂移路径计算, 两种成因有效地结合可以解释海山的形成<sup>[2]</sup>。白 垩纪期间海山区内的热点群发生大规模的火山喷 发,之后随着太平洋板块的 NW 向运动到达目前的 位置。在板块漂移的过程中海山区受到了断裂、大 火成岩省等多种地质构造活动的作用。在断裂的作 用下,海山的主体由于岩浆上涌发生岩墙侵入形成 侧翼裂谷带,将呈圆形或亚圆形的海山形态改造成 为不规则的星形或放射形。另外,受火山喷发和地 震活动等的影响,在海山陡峭边界与侧翼裂谷带两 侧易发生大规模岩石崩塌,崩塌的岩石和碎屑随着 重力作用滑落到山脚,形成重力滑塌沉积区。本次 研究的嘉偕平顶山群位于麦哲伦海山链南部,主要 包含2个相对独立的平顶山,规模较大的主体海山 为维嘉平顶山,规模较小的附属海山为维偕平顶 山<sup>[1-3]</sup>。根据磁条带和海山的分布特征推断<sup>[23]</sup>,海 山链是在 NW 向转换断层(Ogasawara FZ 断裂带)的 控制下形成的,而根据单座海山的 NE 走向展布特 征推断,在海山的后期形成过程受到了 NE 向断裂 的控制作用。西太平洋海山群常常发育高品位和高 吨位的富钴结核与结壳等为代表的金属矿产资源, 潜在的经济价值非常重要[2-3]。海山在形成和运移 的过程中,受到了多期火山喷发、断裂等构造作用, 岩浆的多次喷发和侵入为富钴结壳的生长提供了营 养物质,伴随发生的海底抬升与沉降提供了有利水 深。海山群的形成、矿产资源的成矿宏观控制因素 与断裂构造具有密不可分的关系,因此研究海山群 的断裂构造可以为海山成因与资源勘探与评价提供 依据。嘉偕平顶山群作为我国与国际海底管理局签 订的第一个富钴结壳勘探合同区之一,断裂构造的 研究意义显得更为重要。

前人对麦哲伦海山链区域大断裂进行了一些研究,而针对嘉偕平顶山群的断裂研究较为缺乏。其中,Wedgeworth等对嘉偕平顶山群的自由空间重力 异常结合地震剖面进行了联合反演,计算得到海山 的平均密度为 2.59 g/cm<sup>3</sup>并且地壳未增厚,认为该 海山是局部未补偿的<sup>[4]</sup>。Utkin 利用地球动力学中 岩石圈内板块差异运动的概念结合形态学类比的方 法对麦哲伦海山链进行了研究,首次确立了大洋岩 石圈深部走滑断裂重新激活对洋内火山带形成的决 定性作用<sup>[5]</sup>。Lee 等 对麦 哲伦 海山链东南部 Ogasawara 断裂带附近海山的多道地震资料进行了 分析,认为该断裂带是一个包含众多海山的宽裂谷 带,并根据声学特征和深度划分了不同单元<sup>[6]</sup>。杨 永等对嘉偕平顶山群的重、磁异常及其垂向导数等 特征进行研究,分析了嘉偕平顶山群的构造与沉积 特征<sup>[7]</sup>。另外,有学者针对大西洋的其他海山断裂 及构造进行了相关研究。Carbó等对 Canary 群岛附 近的船测重力异常进行垂向导数计算,并且结合地 质信息将呈线性分布的重力梯度带高值区解释为断 裂区域<sup>[8]</sup>。Catalán 等对 Canary 群岛附近的船测磁 异常进行解析信号振幅处理和欧拉反褶积反演,经 分析得到 2 条可能存在的 NW—SE 走向的断裂以 及异常顶部埋深<sup>[9]</sup>。

综上所述,笔者针对麦哲伦海山链的单座海 山——嘉偕平顶山群,利用地形数据和重磁异常数 据,采用归一化总水平导数垂向导数(NVDR-THDR)断裂识别技术及曲率属性深度反演方法、最 小曲率位场分离等方法,研究了断裂的水平位置和 深度特征、得到了包括断裂、侧翼裂谷带及重力滑塌 区的构造区划,为嘉偕平顶山群的形成过程及海山 矿产资源勘探与综合评价研究提供地球物理和构造 依据。

#### 1 重磁异常特征

目前针对嘉偕平顶山群的科学考察属于起步阶 段,浅钻测站等岩石采样结果还未公开发表,因此岩 石种类及其物性参数(密度、磁性等)亦无公开资 料。而针对同样属于麦哲伦海山链的采薇平顶山群 的科学考察较早,已有公开发表的浅钻资料,可以作 为研究嘉偕平顶山群的参考资料。通过对采薇平顶 山群的浅钻资料分析得知,采薇平顶山群基底岩石 主要由早白垩世拉斑玄武质熔岩、玄武岩和火山碎 屑岩组成,而其平顶边缘则以碎屑岩为主<sup>[10]</sup>。在海 山形成的过程中,隐伏断裂为不同地质时期的岩浆 上涌或岩浆侵入提供了通道,进而有助于形成改变 海山形态的侧翼裂谷带,而不同地质时期的岩浆可 能经历了不同的地磁环境,使得侧翼裂谷带表现为 局部磁低值或高值异常特征。后期地震活动或者火 山活动导致海山陡峭边缘和侧翼裂谷带两侧容易发 生岩石崩塌滑落,形成火山碎屑岩重力流沉积,即重 力滑塌,表现为重力低值异常特征。

本次研究使用的原始数据包括由广州海洋地质 调查局提供的船测数据和自行下载的公开数据。船 测数据包括多波束地形数据、船测自由空间重力异 常数据和船测磁异常数据,相关参数见表1。其中 地形数据和重力数据的测线间距为4~8km,磁数据 的测线间距为12km,由于船测时以秒为单位记录 数据,所以同一测线上的测点间距非常小(约为50 m 以内),而不同测线之间的间距非常大(以 km 为 单位),常常统计测线间距而对测点间距不做说明, 因此地形与重力数据的测线比例尺为 1:800 000~ 1:400 000,而磁数据的测线比例尺为 1:1 200 000。

表 1 船测数据相关参数 Table 1 The relevant parameters of ship survey data

数据类型	数据量 /km	测线间距 /km	备注
地形	约 2500	4~8	EM122 多波束系统
重力	约 2500	4~8	ZLS 重力仪
磁	约 2000	12	G801 磁力仪

公开数据中的地形数据和卫星测高重力异常数 据分别来自美国 David T. Sandwell(加利福尼亚大 学斯克里普斯海洋协会)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 全球地形数据库(V18.1)和全球卫星重力异常数据 库(V24.1)(Satellite Geodesy 网站),数据网度为1'× 1'。磁异常数据来自世界磁异常(Geomagnetism 网 站),为4km处磁异常数据,数据网度为2'×2'。由 于嘉偕平顶山群位于低磁纬度地区,因此需要对磁 异常数据首先进行化极处理,得到化极磁异常数据。 在对船测数据和公开数据处理时,由于两套数据的 精度和范围不同,船测数据较之公开数据精度高、范 围小且集中于海山主体区域,因此对两套数据进行 数据融合:首先采用位场延拓技术得到海平面处的 两套数据,然后采用回归分析消除背景场偏差,之后 将两套数据按照大比例尺数据的网格尺寸网格化, 最终进行数据融合。由此,既保留精度较高的数据 又使得数据范围加大,覆盖整个嘉偕平顶山群。

根据嘉偕平顶山群地形图(图1)可知,嘉偕平顶山群包括两座海山,其中规模较大的为维嘉平顶山,规模较小的为维偕平顶山。平顶山群呈现 NE 走向,山顶地形平坦,海山及其附近水深处于-1400~-5200m之间。

根据嘉偕平顶山群卫星测高重力数据与船测 自由空间重力数据融合得到嘉偕平顶山群重力异常 图(图2)。嘉偕平顶山群主体为重力高值区,海山 周围为重力低值区,幅值变化范围为-60~260 mGal。重力异常形态与地形起伏形态一致,由此认 为嘉偕平顶山群的重力异常主要与其地形起伏有 关;异常整体走向为 NE 向,与海山的走向一致;异 常具有明显的双峰特征,推断该特征显示了断裂的 改造作用<sup>[11]</sup>。由此可得,卫星测高重力异常的高低 和走向反映了嘉偕平顶山群的地质构造特征。

根据嘉偕平顶山群世界磁异常数据与船测磁数



**图 1 嘉偕平顶山群地形**(黑色实线为地形等高线,图 2~图 8、图 13~图 17 同)

Fig.1 Topography map of Jiaxie Guyots(The black solid lines indicate contour lines of terrain, same as figure3~9 and figure14 ~18)



Fig.2 Gravity anomaly map of Jiaxie Guyots

据融合得到嘉偕平顶山群磁异常图(图 3),通过化极处理得到化极磁异常图(图 4)。化极磁异常与世界磁异常差别明显,体现在异常位置北移且幅值发生改变,幅值变化范围为-500~600 nT。嘉偕平顶山群主体磁性比较复杂,规模较大的维嘉平顶山中部为正磁异常高值区,东北角及西南角表现为负磁异常,这可能与平顶山内部发育岩墙侵入有关;规模较小的维偕平顶山整体表现为正磁异常,东北角磁异常值较高。嘉偕平顶山群化极磁异常正负高低变化的复杂性,说明在海山发育期间存在多期多段火山喷发和岩墙侵入,这与前人对海山的构造演化认识是一致的。



图 3 嘉偕平顶山群磁异常





图 4 嘉偕平顶山群化极磁异常 Fig.4 RTP anomaly map of Jiaxie Guyots

#### 2 断裂分布

断裂通过控制其两侧的构造活动,从而破坏原 来地质体的连续性,形成物性(磁性)上的横向差 异,最终形成不同的构造格局。由于磁性的横向差 异会在磁异常上有所表现,因此可以利用磁异常特 征进行断裂构造划分<sup>[12]</sup>。笔者利用化极磁异常采 用归一化总水平导数垂向导数(NVDR-THDR)边缘 识别技术<sup>[13]</sup>,参考剩余磁异常进行断裂划分。

化极磁异常 NVDR-THDR 图(图 5)很好地刻画 了断裂的水平分布特征,断裂平面位置的主要识别 标志为化极磁异常 NVDR-THDR 的极值位置或极值 错断位置,另外,还需结合剩余化极磁异常特征,最 终确定断裂的平面位置。剩余化极磁异常是采用最 小曲率位场分离方法<sup>[14]</sup>对磁异常进行位场分离计 算得到的。断裂视深度反映了断裂的深度特征,是 利用曲率属性反演方法<sup>[15]</sup>对化极磁异常进行反演 计算得到的,其视深度结果位于真实断裂的顶端位 置附近。

根据本次的断裂划分结果(图 6),认为嘉偕平 顶山群断裂带主要包括近 NW 向和近 NE 向 2 组断 裂,推断出断裂共 34 条,其中近 NW 向断裂组推断 出 18 条(图 6 红色实线段,F17~F34),近 NE 向断 裂组推断出 16 条(图 6 蓝色实线段,F1~F16)。从 图上可以看出近 NW 向断裂以 NW 向为主,其次为 NNW 向、NS 向;近 NE 向断裂以 NE 向为主,其次为 NEE 向、WE 向。



近NW向断裂组主要分布于嘉偕平顶山群中

图 5 嘉偕平顶山群化极磁异常 NVDR-THDR Fig.5 NVDR-THDR of RTP anomaly of Jiaxie Guyots





部,维嘉平顶山西部及维偕平顶山东部,整体呈带状分布,从属于 Ogasawara 断裂带的伴生断裂,规模较小,局部走向从 NW 向过渡为 NNW 向与 NS 向,但 主体宏观走向与 NW 向 Ogasawara 断裂带一致,并 且近 NW 向断裂组将嘉偕平顶山群大致切割成西南 与东北两部分。

近 NE 向断裂组主要分布于嘉偕平顶山群的主体部分,即由近 NW 向断裂组所切割成的东北与西南两部分。结合剩余化极磁异常(图 7)特征,可以用来区分岩体边界与断裂。东北部分近 NE 向断裂组分布较为规则,规模较大呈带状分布,走向由 NE 向逐渐过渡为 NEE 向。断裂 F11~F16 之间存在高磁异常,部分位于侧翼裂谷带附近,推断为岩浆沿着由断裂形成的通道多期多次喷发或岩墙侵入形成,一些部位进而发育成为侧翼裂谷带;西南部分近 NE 断裂组分布较为稀疏,规模较小,走向较为一致,均为近 NE 向展布,其中 F9 和 F10 为两组近 NE 向半环形断裂,被 NW 向断裂 F28 截断形成错断。同样在 F20 与 F6 之间存在高磁异常,位于维偕平顶山侧









翼裂谷带附近,发育原因同上。

利用曲率属性深度反演方法对化极磁异常进行 计算得到断裂视深度结果如图 8 所示,根据断裂走 向与总条数和总长度绘制的断裂走向玫瑰花图如图 9 所示,根据断裂长度与对应条数绘制的断裂长度 统计直方图如图 10 所示。从图 8 可以看到,绝大部 分断裂的视深度在 3 000~7 000 m 之间, 深于 7 000 m 的断裂只占很小部分。多数近 NE 向断裂组视深 度在 5000~7000 m 之间, 而多数近 NW 向断裂组视 深度在 3000~5000 m 之间, 总体上近 NE 向断裂组 埋深较深,而近NW 向断裂组埋深较浅,这可能是由 东太平洋延伸至西太平洋的 NE 向断裂被激活的 NW 向断裂组切割形成的。从图 9 可以看出断裂走 向主要为 NE 向、NW 向和 NNW 向,其中 NE 向总长 度与总条数均为最大。从图 10 可以看出度在 20~ 60 km 的断裂占绝大多数,总数达到 27 条,而其他 长度的断裂则为少数。分析以上数据可以得出,嘉 偕平顶山群的断裂基本为存在于浅部的小型断裂









4期

Fig.10 The statistical histogram of fault lengthes map of Jiaxie Guyots

组,走向以NE向、NW向、NNW向为主。

从断裂划分结果可以看出,近 NW 向断裂组与 近 NE 向断裂组整体上呈现交叉关系,局部上呈现 "人"字型交叉,例如 F4 与 F20~F23、F24 与 F11~ F16等。前人对于嘉偕平顶山群所在麦哲伦海山链 的研究表明,该种线状构造交汇的现象在整个海山 链都是十分明显的[16],而且两种走向的断裂影响着 海山链内海山的形成<sup>[17]</sup>。海山群中近 NW 向断裂 与近 NE 向断裂为右旋和左旋走滑断层<sup>[5]</sup>,是经过 海山链两侧 Ogasawara 断裂带在经向挤压作用下产 生的,最终断裂组交汇呈雁行式排列(图11)。地壳 受经向挤压期间,在深部右旋走滑断层上方形成了 早期剪切有关的褶皱,其方向与上述雁行式排列相 同。岩浆室在共轭剪切带的交叉处开启,之后岩浆 沿着由断裂形成的通道上涌,形成海山主体或产生 岩墙侵入,因此大部分海山及磁性岩体均位于剪切 断裂带的交叉处(图 12)。

# 3 侧翼裂谷带

嘉偕平顶山群近 NW 向与近 NE 向断裂组交汇 形成共轭剪切断裂带,为海山基底上的岩浆房提供 通道,使得岩浆上涌形成岩墙侵入,在海山周围较为 薄弱的部位容易发育侧翼裂谷带。在受到火山喷 发、岩墙侵入等构造活动的影响下,海山会发生重力 滑塌沉积,尤其是在海山陡峭和侧翼裂谷带两侧均 易形成重力滑塌区。侧翼裂谷带不仅是海山斜坡富 钴结壳发育的有利区域,而且在一定程度上反映了 海山的形成与构造演化。

目前对于海山侧翼裂谷带的研究较少,且多为 国外学者的研究。Vogt和Smoot利用多波束测深数 据对Geisha海山链进行研究,表明侧翼裂谷带是由 火山作用而产生的,伴随海山高度增大其长度亦随 之增大,并且在后期将海山形状由圆形改造成不规 则形态<sup>[18]</sup>;Smoot利用水深数据对 Marcus-Wake海山区进行研究,认为侧翼裂谷带的趋向有助于辨认断裂带趋势或板块展布方向和解释海山的形成,并且结合磁条带的特征推断了 Dutton 海岭的形成<sup>[19]</sup>; Mitchell 对全球 141 个海山的形态进行研究,表明侧 翼裂谷带的发育是海山形态由圆形或亚圆形转变为 星状或不规则形态的原因,而其是由基底之上的岩 浆房沿断裂喷发而成,该特征在高度大于3 km的海 山更加明显<sup>[20]</sup>;Lee等利用声学回声对西太 Ogasawara 断裂带海山进行研究,推断侧翼裂谷带是 由于岩浆沿断裂侵入形成岩墙侵入而产生的<sup>[17]</sup>; Hansen 利用地震速度层析成像和衰减层析成像两 种方法对夏威夷 Kilauea 海山进行研究,经反演表明 海山下方存在岩浆库和内部发育通道,推测由此产 生了海山南翼变形的侧翼裂谷带<sup>[16]</sup>。

侧翼裂谷带的存在使得海山地形显示为不规则 形态,例如呈现星状或放射状,而且由于岩浆多期多 次喷发与地磁倒转,在局部磁异常上呈现既有正值 又有负值的特征。因此本文采用地形数据和重力异 常数据,采用归一化总水平导数垂向导数(NVDR-



1—深海板块;2—海山火成岩(亚碱性玄武岩);3—山顶沉积岩; 4—火山主体覆盖层;5—等深线;6—海山编号;7—纬向火山区; 8—控制火山共轭右旋和左旋走滑断层的对角线系统;9—麦哲 伦海山边界(潜在的右旋走滑断层带);10—大洋地壳挤压方向 1—abyssal plate;2—igneous rocks of guyots;3—sedimentary complexes of summit plateaus;4—overlying lower stages of volcanic edifices;5—generalized isobaths (km);6—guyot numbers;7—latitudinal volcanic fields;8—diagonal systems of conjugated dextral and sinistral strike-slip faults that control volcanic edifices;9—boundary of the Magellan Seamounts (potential dextral strike - slip fault zones);10—direction of the oceanic crust compression

> 图 11 麦哲伦海山链断层与褶皱<sup>[6]</sup> Fig.11 Folds and faults of the Magellan Seamounts<sup>[6]</sup>

万方数据



1-岩石圈水平滑动面和特定的岩屑层;2-岩石圈下部的走滑 断层;3-潜在走滑断层;4-雁行状短岩线;5-减压作用下形成 的岩浆室:6-充当岩浆通道的右旋和左旋走滑断层对角线系 统;7-岩石圈下部的走滑断层在深海板块表面的投影;8-深海 板块中的走滑断层:9-软流圈镁铁质岩石和流体沿岩石圈下部 走滑断层的上升;10-物质从岩浆室向深海板块表面的传递 1-surfaces of horizontal slip of the lithosphere and particular lithic sheets; 2-strike-slip faults in the lower lithosphere; 3-potential strike-slip fault; 4-expressed as en echelon brachyanticlines; 5magma chambers formed beneath brachyanticlines under decompression; 6-diagonal systems of dextral and sinistral strike-slip faults in brachyanticlines that served as magma conduits; 7-projection of a strikeslip fault in the lower lithosphere on the surface of an abyssal plate; 8-strike-slip fault in the abyssal plate; 9-ascent of asthenospheric mafic rocks and fluids along the strike-slip faults in the lower lithosphere; 10-farther propagation of matter from a magma chamber toward the surface of an abyssal plate

## 图 12 岩石圈分层条件下火山带形成的地球 动力学模型<sup>[5]</sup>

## Fig.12 Geodynamic model of volcanic belt formation under conditions of the delaminated lithosphere<sup>[5]</sup>

THDR)断裂识别技术进行侧翼裂谷带划分。其中 嘉偕平顶山群重力异常 NVDR-THDR 图(图 13)的 极值位置与海山边界基本吻合,并且可以辅助识别 侧翼裂谷带,而嘉偕平顶山群地形 NVDR-THDR 图 (图 14)能更好地反映侧翼裂谷带。

本次侧翼裂谷带划分结果显示(图 14),嘉偕平 顶山群共发育 5 条侧翼裂谷带(flank rift zone,frz1~ frz5),其中 1 条规模较大(frz1),4 条规模较小(frz2~frz5)。嘉偕平顶山群地形 NVDR-THDR 呈现出海 山 NE 向的走向,整体形态表现为星状,在极值连线 凸出处是侧翼裂谷带的形成位置。侧翼裂谷带 frz1 位于维嘉平顶山西部,长度约为 42 km,走向为 NE 向,大致分为 3 段。从海山地形图(图 1)可以看出, 该处山顶发育局部隆起,并且整体较为宽阔平坦;从 剩余重力异常及剩余化极磁异常图(图 15 和图 16) 可以看出,该处为剩余重力异常高值区与剩余化极 磁异常负值区。侧翼裂谷带 frz2、frz4、frz5 位于维嘉 平顶山东部,长度均约为 30 km 左右,其中 frz2、frz4 走向为近 NS 向,frz5 走向为近 EW 向。海山地形图



图 13 嘉偕平顶山群重力异常 NVDR-THDR Fig.13 NVDR-THDR of gravity anomaly map of Jiaxie Guyots



Fig.14 Flank rift zones and NVDR-THDR of topography map of Jiaxie Guyots

(图1)表明这3条侧翼裂谷带与 frz1 形态不同,它 们由山顶逐渐开始变窄到达山底并尖灭于海盆;剩 余重力异常及剩余化极磁异常图表明这3条均处在 剩余重力异常高值区,其中 frz4、frz5 处在剩余化极 磁异常正值区,而 frz2 处在剩余化极磁异常负值区。 侧翼裂谷带 frz3 位于维偕平顶山东部,长度约为33 km,走向为近 NE 向。结合海山地形可以发现,该侧 翼裂谷带与上述3条侧翼裂谷带形态相同且该裂谷 带处在剩余重力异常高值区与剩余化极磁异常正值 区。

根据海山地形及剩余重、磁异常,得到嘉偕平顶 山群侧翼裂谷带5条。其中侧翼裂谷带frz1形成较



图 15 嘉偕平顶山群侧翼裂谷带与剩余重力异常 Fig.15 Flank rift zones and residual gravity anomaly map of Jiaxie Guyots



因 10 新自牛顶面鞋两翼装在带与刺汞化放破并带 Fig.16 Flank rift zones and residual RTP anomaly map of Jiaxie Guyots

为平坦的平台,frz2~frz5由山顶开始变窄最终尖灭 于山底。5条侧翼裂谷带所处位置的剩余重力异常 均呈现高值特征,而剩余化极磁异常有正值特征也 有负值特征。由此推断嘉偕平顶山群主体海山形成 之后,位于海山下部基底之上的岩浆沿着由共轭剪 切断裂形成的通道上涌,与形成海山主体的岩浆来 源基本相同,参考对麦哲伦海山链另一座海山—— 采薇平顶山群的岩石类型研究认为,可能为碱性或 亚碱性玄武岩。在海山主体形成后漫长的地质时期 中,产生多期多次的岩墙侵入或者火山活动,期间可 能还发生了地磁倒转的地质活动,因而导致上涌岩 浆的磁性产生了变化,而之后岩墙侵入发育形成多 个侧翼裂谷带,在侧翼裂谷带的控制和改造作用之 · 945 ·

下海山的形态随之发生变化。因此,侧翼裂谷带在 重力特征上与海山主体相似,在磁特征上呈现正负 异常相间且幅值很大。

### 4 重力滑塌区

沉积学中认为自然界中的流体包括重力流和牵 引流两种。重力流是由重力驱动的流体,即由于密 度差异产生的流体[21]。在火山活动、地震等偶然性 因素的影响下,海山随之会产生重力流沉积作用,形 成重力流沉积,而重力滑塌沉积便是其中的一 种[18]。目前国内外整体对于海山重力滑塌的研究 较少,并且采用的技术多为声学手段。Moore 等利 用声呐数据对夏威夷专属经济区进行了系统测绘, 划分了滑塌沉积物的区域,分析认为其与火山活动 及断层有着密切联系<sup>[22-23]</sup>: Elsworth 等从岩石力学 的角度进行分析认为岩脉侵入会触发地震等活动以 致火山侧翼发生大规模的破坏,随即在其附近容易 形成大规模的滑塌沉积现象<sup>[24]</sup>;Masson 等利用声波 反射和地震层析成像技术划分了 Canary 群岛的山 体滑坡,划分依据包括岛侧的滑坡痕迹、岛下的碎屑 沉积和临近海盆地底的火山碎屑浊积岩,并根据特 征的不同将该岛侧翼的滑坡分为岩崩、滑坡和泥石 流3种<sup>[25]</sup>:Peter 等利用声呐图像、地震反射剖面等 数据绘制了 Mauna Loa 火山西侧的海底滑塌区,研 究得到该事件是由沿断陷带的地震活动引发的[18]; Vidal 等利用以火山为中心的垂直断层模型研究火 山口崩塌的机制,试验证明火山受到地震等因素影 响后发生变形,进而产生逆断层构造导致火山侧翼 崩塌<sup>[27]</sup>。海山重力滑塌往往伴随侧翼裂谷带的发 育而形成,在海山侧翼裂谷带容易发生岩墙侵入和 火山溢出等活动,而由该活动引发的地震是重力滑 塌的主要驱动因素,因此海山周边与侧翼裂谷带两 侧易发生大规模的重力滑塌沉积。

重力滑塌沉积主要以碎屑流为主,属于低密度 沉积,在重力上显示为局部低值异常,而且在地形上 会产生划痕特征。因此本文采用剩余重力异常的零 值线及所圈定负值区结合地形数据刻痕区对重力滑 塌区进行划分。

本次重力滑塌区划分结果如图 17。在嘉偕平 顶山群共划分重力滑塌区 9 处(gravity slide,gs1~ gs9),均在剩余重力异常局部低值区。其中规模较 大的有 3 处(gs3~gs5),规模较小的有 6 处(gs1、 gs2、gs6~gs9)。处于维嘉平顶山的重力滑塌区有 6 处(gs2、gs3、gs5、gs6、gs8、gs9),处于维偕平顶山的 物探与化探

重力滑塌区有 2 处(gs1、gs7),由两座平顶山共同形成的有 1 处(gs4)。对比海山地形图(图 1)可以发现滑塌所处位置地形存在划痕特征,划痕方向与坡顶方向呈垂直关系。在滑塌区域发育了较厚的低密度碎屑流沉积,并且均处于海山侧翼裂谷带两侧,说明两者存在一定联系,推测可能是由于侧脊处容易产生岩墙侵入,在此因素影响之下发生阵发性地震,以致大规模重力滑塌的发生,进而形成滑塌沉积。



图 17 嘉偕平顶山群重力滑塌区与剩余重力异常 Fig.17 Gravity landslide area and residual gravity anomaly map of Jiaxie Guyots

5 结论及建议

本文利用嘉偕平顶山群的地形数据和重磁异常 数据,并且结合地质等资料,综合研究了该地区的构 造区划特征,得到了以下几点认识。

1)利用化极磁异常,采用归一化总水平导数垂 向导数(NVDR-THDR)断裂识别技术和曲率属性深 度反演方法,推断了断裂的分布特征。研究表明,该 区发育了众多埋深较浅的小型断裂组,走向主要为 NE、NW 及 NNW 向。在两侧大型走滑断裂带的挤 压作用下,上述断裂组构成共轭剪切断裂带呈雁行 式排列分布,同时深度特征也表明 NE 向断裂可能 是由重新激活的 NW 向断裂错断。该区利用化极磁 异常研究断裂分布特征的方案效果明显、结果清晰, 为麦哲伦海山群其他单座海山断裂分布研究提供案 例与技术支撑。

2)利用地形资料和重力异常数据,采用 NVDR-THDR断裂识别技术和最小曲率位场分离方法,共同分析了侧翼裂谷带和重力滑塌区域的分布特征。研究表明,侧翼裂谷带可能是由于沿断裂上 涌的多期多次的岩墙侵入等造成的,使得海山由亚 圆形改变为放射形或星形。在侧翼裂谷带的两侧, 由于岩墙侵入与火山活动的影响下,容易发生重力 滑塌,进而形成滑塌沉积区。本次对侧翼裂谷带和 重力滑塌区域的划分结果证明了其他海山利用地形 和重力资料进行相同研究的可行性与必要性。

3)通过对嘉偕平顶山群的断裂、侧翼裂谷带及 重力滑塌区的分布特征研究,进而对构造区划有了 更精细的刻画,为了解该区海山的形成演化过程和 未来金属矿产资源的勘探提供了丰富的地球物理支 撑。此外由于目前缺乏物性和地震等资料,建议对 嘉偕平顶山群继续开展相应工作以便进一步地研 究,并且对麦哲伦海山链乃至西太平洋其他海山也 可以采取相同方案进行研究。

#### 参考文献(References):

- Kim S S, Wessel P. New global seamount census from altimetryderived gravity data[J]. Geophysical Journal International, 2011, 186(2):615-631.
- [2] 赵俐红.中西太平洋富钴结壳生长海山的构造成因研究[D]. 青岛:中国科学院研究生院(海洋研究所), 2005.
   Zhao L H. Study on the formation of seamounts distributed by cobalt-rich crust in the central-west Pacific[D].Qingdao: Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, 2005.
- [3] Hein J R, Spinardi F, Okamoto N, et al. Critical metals in manganese nodules from the Cook Islands EEZ, abundances and distributions[J]. Ore Geology Reviews, 2015, 68(1):97-116.
- [4] Wedgeworth B, Kellogg J. A 3-D Gravity-tectonic study of Ita Mai Tai Guyot: An uncompensated seamount in the East Mariana Basin
   [J]. Geophysical Monograph Series, 1987, 43:73-84.
- [5] Utkin V P. Role of strike-slip faulting of the oceanic Lithosphere in the formation of Pacific Volcanic Belts [J]. Doklady Earth Sciences, 2006, 409(1):692-696.
- [6] Lee T G, Lee K, Hein J R, et al. Geophysical investigation of seamounts near the Ogasawara Fracture Zone, western Pacific [J]. Earth Planets & Space, 2009, 61(3):319-331.
- [7] 杨永,何高文,刘方兰,等. 嘉偕平顶山群重磁异常及其构造 和沉积特征[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2016,36(1):107-113.

Yang Y, He G W, Liu F L, et al. Gravityand magnetic anomalies of jiaxie guyots and their structural and sedimentary characteristics [J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2016, 36(1):107 – 113.

- [8] Carbó A, Muñoz-Martín A, Llanes P, et al. Gravity analysis offshore the Canary Islands from a systematic survey [J]. Marine Geophysical Researches, 2003, 24(1-2):113-127.
- [9] Catalán M, Martín Davila J. A magnetic anomaly study offshore the Canary Archipelago [J]. Marine Geophysical Researches, 2003, 24(1-2):129-148.
- [10] 韦振权, 邓希光, 朱克超, 等. 西太平洋采薇海山群基岩特征

[J]. 海洋地质前沿, 2017, 33(12):1-6.

tion, 2016(7):31-32.

Wei Z Q, Deng X G, Zhu K C, et al. Characteristic of substrate rocks of caiwei Seamounts in the west Pacific Ocean [J]. Marine Geology Frontier, 2017, 33(12):1-6.

- [11] 赵俐红,杨明明,张超,等.麦哲伦海山区重力特征及深部特征[J].中国科技信息,2016(7):31-32.
  Zhao L H, Yang M M, Zhang C, et al. Gravity and deep features of Magellan seamount[J]. China Science and Technology Informa-
- [12] 罗新刚, 王万银, 张功成, 等. 基于重力资料的南海及邻区断 裂分布特征研究[J]. 地球物理学报, 2018, 61(10):4255-4268.

Luo X G, Wang W Y, Zhang G C, et al. Study on distribution features of faults based on gravity data in the South China Sea and its adjacent areas [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2018, 61 (10):4255-4268.

- [13] 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 field data [J]. Applied Geophysics, 2009, 6(3):226-233.
- [14] 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 J. Geophys. (in Chinese), 2015, 58(3):1042-1058.
- [15] 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.
- [16] Hansen S. Seismic velocity and attenuation structure of the east rift zone and south flank of Kilauea Volcano, Hawaii [J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2004, 94(4):1430-1440.
- [17] Lee T G, Hein J R, Lee K, et al. Sub-seafloor acoustic characterization of seamounts near the Ogasawara Fracture Zone in the western Pacific using chirp (3~7 kHz) subbottom profiles[J]. Deep-Sea Research I, 2005, 52:1932 - 195.
- [18] Vogt P R, Smoot N C. The Geisha Guyots: Multibeam bathymetry and morphometric interpretation [J]. Journal of Geophysical Research, 1984, 89(B13): 11085 - 11107.
- [19] Smoot N C. The Marcus-Wake seamounts and guyots as paleofracture indicators and their relation to the Dutton Ridge[J]. Marine Geology, 1989, 88(1):117-131.
- [20] Mitchell N C. Transition from circular to stellate forms of submarine volcanoes[J]. Journal of Geophysical Research, 2001, 106 (B2):1987-2003.
- [21] 方爱民,李继亮,侯泉林. 浊流及相关重力流沉积研究综述
  [J]. 地质论评, 1998,44(3):270-280.
  Fang A M, Li J L, Hou Q L. Sedimentation of turbidity current sand relative gravity flows: a review [J]. Geological Review, 1998,44(3):270-280.
- [22] Moore J G, Clague D A, Holcomb R T, et al. Prodigious submarine landslides on the Hawaiian Ridge[J]. Journal of Geophysical

Research Solid Earth, 1989, 94(B12):17465-17484.

- [23] Moore J G, Normark W R, Holcomb R T. Giant Hawaiian underwater landslides [J]. Science, 1994, 264(46):46-47.
- [24] Elsworth D, Voight B. Dike intrusion as a trigger for large earthquakes and the failure of volcano flanks[J]. Journal of Geophysical Research, 1995, 100(B4):6005-6024.
- [25] Masson D G, Watts A B, Gee M J R, et al. Slope failures on the flanks of the western Canary Islands [J]. Earth-Science Reviews, 2002, 57(1-2):1-35.
- [26] Peter W L , William R. N , James G M , et al. The giant submarine Alika Debris Slide, Mauna Loa, Hawaii [J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 1988,93(B5):4279-4299.
- [27] Vidal N, Merle O. Reactivation of basement faults beneath volcanoes: A new model of flank collapse [J]. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 2000, 99(1):9-26.
- [28] Koppers A A P, Staudigel H, Wijbrans J R, et al. The Magellan seamount trail: implications for Cretaceous hotspot volcanism and absolute Pacific plate motion [J]. Earth & Planetary Science Letters, 1998, 163(1-4):53-68.
- [29] 章家保,金翔龙,高金耀,等.断裂和白垩纪岩浆活动对中西 太平洋海山区海山形成的影响[J].海洋地质与第四纪地质, 2006,26(1):67-74.
  Zhang J B, Jin X L, Gao J Y, et al. Influence on the seamounts' formation in MPM and WPSP from fractures and cretaceous magma' s activities[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2006,26 (1):67-74.
- [30] 张国祯,张子健. 西太平洋海底平顶山研究[J]. 海洋地质与 第四纪地质, 2001, 21(1):19-24.
  Zhang G Z, Zhang Z J. Investigation of guyots in the Western Pacific Ocean[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2001, 21 (1):19-24.
- [31] 赵俐红,金翔龙,高金耀.麦哲伦海山链漂移史及可能的来源
  [J].海洋学报,2010,32(3):60-66.
  Zhao L H, Jin X L, Gao J Y, et al. There search on the drifting history and possible origin of the Magellan seamount trail[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2010, 32(3):60-66.
- [32] Staudigel H, Clague D. The Geological history of deep-sea volcanoes[J]. Oceanography, 2010, 23(1):58-71.
- [33] 梁劲,沙志彬,陈弘. 西太平洋 MF 海山磁异常特征及其地质 解释[J]. 南海地质研究, 2003(1):74-81.
  Liang J, Sha Z B, Chen H. The magnetism anomaly and its geological significance of MF seam ount in west pacific [J]. Geological South China Sea, 2003(00):74-81.
- [34] Prokofev V Y, Avdonin V V, Mel'nikov M E. Physicochemical parameters of the crystallization of plagioclases in basaltic rocks from guyots of the Magellan Seamounts (Pacific Ocean) [J]. 2008, 421(2):995-999.
- [35] Lee T G, Lee S M, Moon J W, et al. Paleomagnetic investigation of seamounts in the vicinity of Ogasawara Fracture Zone northwest of the Marshall Islands, western Pacific [J]. Earth Planets & Space, 2003, 55(6):355-360.
- [36] Hein J R, Mizell K, Koschinsky A, et al. Deep-ocean mineral deposits as a source of critical metals for high- and green-technology

applications: Comparison with land-based resources[J]. Ore Geol-

ogy Reviews, 2013, 51(2):1-14.

#### Research on tectonic division in Jiaxie guyots based on gravity and magnetic anomalies

MA Tao<sup>1,2,3</sup>, ZHU Ying-Jie<sup>1,2,3,4</sup>, YANG Yong<sup>5,6</sup>, JI Xiao-Lin<sup>1,2,3</sup>, WANG Ding-Ding<sup>1,2,3</sup>, LIU Jin-Lan<sup>1,2,3</sup>, WANG Wan-Yin<sup>1,2,3</sup>

(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. Johns', A1B3X5, Canada; 5. Key Laboratory of Marine Mineral Resources, Guangzhou 510075, China; 6. Ministry of Natural and Resources, Guangzhou Marine Geological Survey, Guangzhou 510075, China; 6. Key Laboratory of Natural and Resources, Guangzhou Marine Geological Survey, Guangzhou 510075, China; 6. Ministry of Natural and Resources, Guangzhou Marine Geological Survey, Guangzhou 510075, China; 6. Key Laboratory of Natural and Resources, Guangzhou Marine Geological Survey, Guangzhou 510075, China; 6. Ministry of Natural and Resources, Guangzhou Marine Geological Survey, Guangzhou 510075, China; 6. Key Laboratory of Natural and Resources, Guangzhou Marine Geological Survey, Guangzhou 510075, China; 6. Key Laboratory of Natural and Resources, Guangzhou Marine Geological Survey, Guangzhou 510075, China; 6. Key Laboratory of Natural and Resources, Guangzhou Marine Geological Survey, Guangzhou 510075, China; 6. Key Laboratory of Natural and Resources, Guangzhou Marine Geological Survey, Guangzhou 510075, China; 6. Key Laboratory of Natural and Resources, Guangzhou Marine Geological Survey, Guangzhou 510075, China; 6. Key Laboratory of Natural and Resources, Guangzhou 510075, China; 6. Key Laboratory of Natural and Resources, Guangzhou Marine Geological Survey, Guangzhou 510075, China; 6. Key Laboratory of Survey, Guangzhou 510075, China; 6. Key Labor

**Abstract:** The Jiaxie Guyots, located in the western Pacific and belongs to China's contract areas of cobalt-rich ferromanganese crusts, contains strategic metal mineral resources, especially cobalt. Local structures of the guyots play an important controlling role in the macroscopic distribution of these resources, which leads to the research on the tectonic division of the guyots to understand their formation processes and explore mineral resources. In this paper, the gravity and magnetic data as well as topographic data were used to delineate fracture features of Jiaxie Guyots by using the normalized vertical derivative of the total horizontal derivative (NVDR-THDR) edge recognition method and curvature attribute depth inversion method. The minimum curvature potential field separation method was used to delineate the distribution features of flank rift zones and gravity slide areas. The results show that faults of Jiaxie Guyots are mainly NW- and NE-trending, followed by NNW- and NEE-trending. The range of apparent depths of faults is between 3000 and 7000 m, and usually the depth of NW-trending faults are shallower than that of NE-trending faults. The faults of these two different directions intersect to form a conjugate shear fault zone, showing a geese-like arrangement, which provides magma volcanic conduits for seamount formation and rock wall intrusion. The flank rift zones are generally located in irregular terrain extensions of guyots, because they were shaped with magma intrusion and reshaped the seamount as irregularly appearances. During the development of flank rift zones, the gravity slide areas were also formed due to the influence of tectonic activities like earthquakes, and commonly they were located on sharp sides of margins and two sides of flank rift zones. The authors hold that this study of geological structures could give strong support to the study of the formation of Jiaxie Guyots and the comprehensive evaluation of cobalt-rich crust ferromanganese.

Key words: Jiaxie Guyots; NVDR-THDR; minimum curvature; curvature attribute; fault; flank rift zone; gravity slide (本文编辑:王萌)