

卡罗琳 M4 平顶海山区地貌特征与地质过程研究*

刘喆昊^{1,2} 张建兴^{1,3} 王冰⁴ 刘玉斌^{1,2} 杜梦迪^{1,2} 栾振东^{1,2,3}

(1. 中国科学院海洋研究所 中国科学院海洋地质与环境重点实验室 山东青岛 266071; 2. 中国科学院大学 北京 100049; 3. 中国科学院海洋大科学研究中心 山东青岛 266071; 4. 山东石油化工学院油气工程学院资源科学与工程系 山东东营 257061)

摘要 卡罗琳 M4 平顶海山位于卡罗琳海脊与马里亚纳海沟交界处, 对其地貌与地质过程的研究有利于深入理解地球动力及环境背景与该地区海山演化的关系。基于“科学”号实测的全覆盖多波束水深数据与“发现”号遥控无人潜水器(remote operated vehicle, ROV)多次下潜获取的近海底影像资料, 描述了卡罗琳 M4 平顶海山及附近区域的地形地貌特征, 并对影响海山演化的主要地质过程进行了分析。线性喷发中心等火山地貌指示了研究区内沿线性喷口的裂隙式喷发活动。“C”字型的弯曲形态与陡崖说明山顶平台边缘经历过多次崩塌与破坏, 滑坡痕与沉积块体/碎屑组成了块体搬运体系, 并在中下段斜坡转变为浊流形成冲沟与水道。M4 海山顶部还发育有较为完整的残留环礁地貌, 其被淹没的机制可能是由于上升流输入的丰富营养物质影响了底栖环境的光照, 从而抑制了珊瑚生长。

关键词 海山; 海底地形地貌; 碳酸盐斜坡; 边缘崩塌; 生物礁淹没

中图分类号 P737.2 **doi:** 10.11693/hyhz20220700188

海山被认为是岩石圈、水圈与生物圈相互作用的关键交叉点, 它们不仅能够提供岩浆活动的时空变化信息(Fornari *et al.*, 1988), 还可以改变周围的流场特征(Turnewitsch *et al.*, 2013), 孕育独特的生态系统(Xu, 2021); 同时海山也是在海洋中广泛分布的重要地貌类型, Kin 和 Wessel 利用卫星数据统计得出高度大于 100 m 的海山在全球范围内数量可达 25 000 个, 极大地加深了海底地形的复杂程度(Kim *et al.*, 2011)。海山的形成与演化受建设性的火山作用与破坏改造性的侵蚀-沉积作用的共同控制(Casalbore, 2018)。近 20 年来, 船载多波束系统被广泛应用于海洋调查, 获得了全球范围内众多代表性海山的精细测绘数据, 为开展海山的深入研究提供了重要的数据支撑, 并取得了一系列重要成果。已有研究揭示了火山活动、海底滑坡、重力流、等深流及海平面升降等地质过程对海山形态的影响, 丰富了我们对海山形成与演化

过程的认知(Howe *et al.*, 2006; Passaro *et al.*, 2010; Tempera *et al.*, 2013; Schwartz *et al.*, 2018; Choi *et al.*, 2021; Gan *et al.*, 2021)。

Staudigel 等(2010)提出完整的海山演化过程一般包括以下 6 个阶段: 海底喷发作用形成的小海山(高度 100~1 000 m); 发育岩浆管道系统的中等海山(高度>1 000 m, 水深>700 m); 有浅水暴发活动的海山(水深<700 m); 出露海面的火山、岛屿或珊瑚礁; 被淹没的平顶海山、暗礁; 俯冲消亡的海山。目前, 对海山地貌形态的研究主要集中于前四个阶段的海山, 而对处于第五阶段, 即淹没海山的演化过程仍不明晰。在海山演化的第四阶段后期, 岛屿/海山的岩浆活动停止并沉降于海平面以下, 成为记录地区构造活动历史的重要载体(Moore *et al.*, 1996)。热带地区淹没的海山之上造礁珊瑚可以生长发育为碳酸盐台地, 该过程不仅记录了区域气候及海洋环境的

* 中国科学院先导专项项目子课题, E0B435101T 号; 中国科学院先导专项项目子课题, XDA22050502 号。刘喆昊, 硕士研究生, E-mail: liuzhehao21@mails.ucas.ac.cn

通信作者: 栾振东, 硕士生导师, 正高级工程师, E-mail: luan@qdio.ac.cn

收稿日期: 2022-07-15, 收修改稿日期: 2022-08-24

演化, 还将海山的沉积背景从火山碎屑岩堆积控制转换为碳酸盐岩堆积控制, 使海山地貌形态特征与斜坡物质输运方式等发生显著变化(Cohen *et al*, 2004; Adams *et al*, 2014; 马本俊等, 2018)。

卡罗琳 M4 平顶海山位于西太平洋卡罗琳海脊之上, 是一座被淹没的碳酸盐台地。2017 年 8 月, 本课题组成员搭乘“科学”号考察船, 利用船载设备与“发现号”遥控无人潜水机(remote operated vehicle, ROV)及其搭载的水下设备对该海山进行了综合探测调查。基于船载多波束系统获取的高分辨率地形数据与 ROV 采集的近海底高清影像资料, 结合研究区沉积底质、水文动力与水体环境的研究成果, 本文分析了卡罗琳海山区的地形地貌特征, 并讨论了研究区不同地质过程的特征与控制因素, 以期为该海山演化过程研究提供参考。

1 区域背景

卡罗琳 M4 平顶海山位于西太平洋卡罗琳海脊

的西北端, 马里亚纳海沟南侧, 其西南与东南分别与密克罗尼西亚联邦的乌利西环礁及法斯岛相邻。研究区范围大致在 139.98°~140.25°E, 10.35°~10.66°N, 地处太平洋板块、菲律宾海板块与卡罗琳板块的交界处, 构造背景复杂(图 1)。卡罗琳海脊主要由洋岛型玄武岩组成, 是一个由热点火山作用形成的海底高原, 与东部的卡罗琳海山链有相同的地幔柱源区, 深海钻探计划(deep sea drilling program, DSDP)的相关研究结果表明其基底年龄为 24~37 Ma (Altis, 1999; Gaina *et al*, 2007; Zhang *et al*, 2020)。随着卡罗琳板块向西俯冲, 卡罗琳海脊在 25 Ma 与雅浦海沟发生碰撞, 造成了雅浦岛弧火山活动消失, 同时阻碍了俯冲活动的进行, 导致卡罗琳板块沿雅浦海沟向菲律宾海板块的俯冲速率减缓(Fujiwara *et al*, 2000; Xia *et al*, 2020)。此外, 在中新世晚期卡罗琳海脊中央形成裂谷并发育为索罗尔海槽, 进而将卡罗琳海脊分割为卡罗琳群岛海脊与西卡罗琳海隆两部分(Dong *et al*, 2018)。

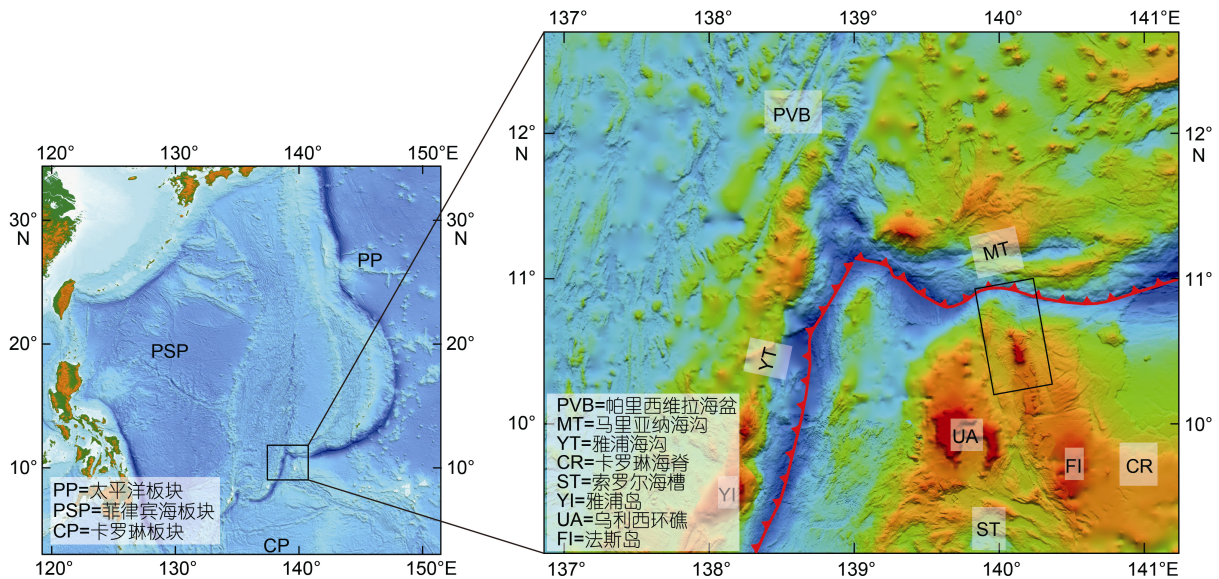


图 1 研究区位置图

Fig.1 Location of the research area

M4 海山区水深 200 m 以浅的表层水体主要受北赤道流(north equatorial current, NEC)控制, 流向以自东向西为主; 水深 300~1 000 m 的水体则主要受北赤道潜流(north equatorial undercurrent, NEUC)控制, 流向转变为自西向东(Hu *et al*, 2015; Shi *et al*, 2021)。海流与地形的相互作用导致 M4 海山区水文特征极其复杂, 深刻影响了海山周围的生态环境。现场调查结果

显示, M4 海山周围站位 100~300 m 的水层中, 等温度线与等盐度线相比远离海山的站位不稳定, 出现了一致的隆起特征(图 2), 反映了上升流的存在(Ma *et al*, 2021)。此外, 上升流也提高了 M4 海山周围的生产力, 使 M4 海山区 200 m 以上水柱中生源要素的平均浓度, 以及浮游病毒丰度都明显高于邻近海区(Zhao *et al*, 2020; Ma *et al*, 2021)。

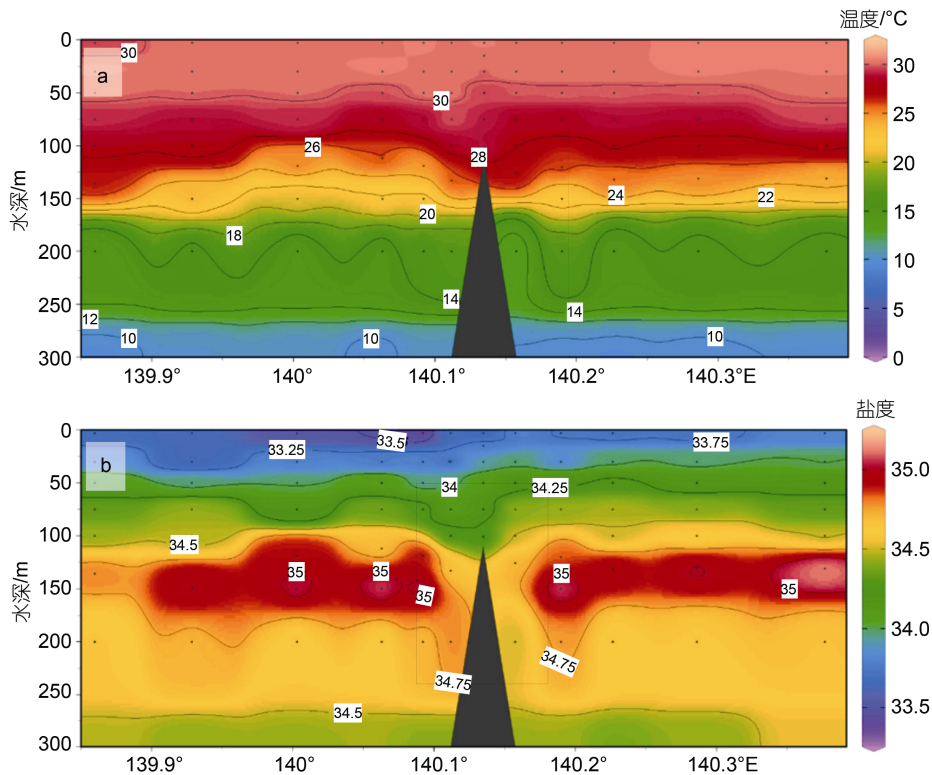


图 2 卡罗琳 M4 海山东西方向断面温(a)、盐(b)分布

Fig.2 The distributions of temperature (a) and salinity (b) in E-W section
注: 改自文献 Ma 等(2021)

2 研究方法

本研究采用的卡罗琳 M4 平顶海山区海底地形数据由搭载于“科学”号考察船的 SeaBeam 3012 全海深多波束测深系统采集。数据采集于 2017 年 8 月 12~26 日, 平行于海山走向布设了 21 条多波束测线, 总长度约 1 300 km。整个测区的测线间距为 4 km, 在海山附近进行加密探测, 测线间距缩小到 1 km。M4 海山地貌受生物碳酸盐岩沉积控制, 斜坡类型表现出岛礁性质, 坡度大且水深变化迅速, 水下声场较为复杂, 因此在测深过程中易出现错误的“假水深”记录(原齐泽等, 2021)。为了提高测绘精度, 在进行多波束作业时船速保持在 5~6 kn, 根据水深调节激发能量, 同时在数据采集过程中将多波束数据与浅剖等设备测深结果进行对比与分析, 最终获得了高精度的测深数据。利用 CARIS HIPS&SIPS 软件对多波束数据进行处理, 包括潮位校正、吃水校正、声速校正以及数据清理等处理步骤。将处理后的结果在 surfer 软件中进行空间插值, 最终得到 100 m 网格的 DEM 栅格数据。

在本次海上调查作业中, “发现”号 ROV 在卡罗

琳 M4 海山区不同水深与站位共进行了 14 次下潜, 获取了丰富的原位水体、地质与生物样品, 以及约 300 G 的高清影像资料。本研究选取其中以 ROV 走航观测为主的视频资料, 结合水深数据, 统计和分析了研究区的底质类型与微地貌形态特征。

3 结果

3.1 研究区地形与底质特征

多波束测深资料覆盖区域南北长约 87 km, 东西宽约 49 km, 总面积约 4 200 km² (图 3a)。整体来看, 卡罗琳 M4 平顶海山北部向马里亚纳海沟延伸, 南部直接与卡罗琳海脊相连, 东西两侧地形平坦。区内最大水深位于海沟处, 可达 6 675 m。海沟轴线走向在点 10°56'N, 140°02'E 由 NEE-SWW 向改变为 NW-SE 向, 斜坡呈阶梯状展布。M4 海山在海底以上高约 2 500 m, 呈南北狭长而东西较窄的长条状, 走向近 NNW-SSE。海山顶部平台南北长约 40 km, 东西宽约 22 km, 最浅处水深仅 28 m, 最深处水深 121 m。海山斜坡在山顶周围较为陡峭, 向山脚处逐渐趋于平缓, 即坡度随水深增大而减小(图 3b)。斜坡剖面的整体形

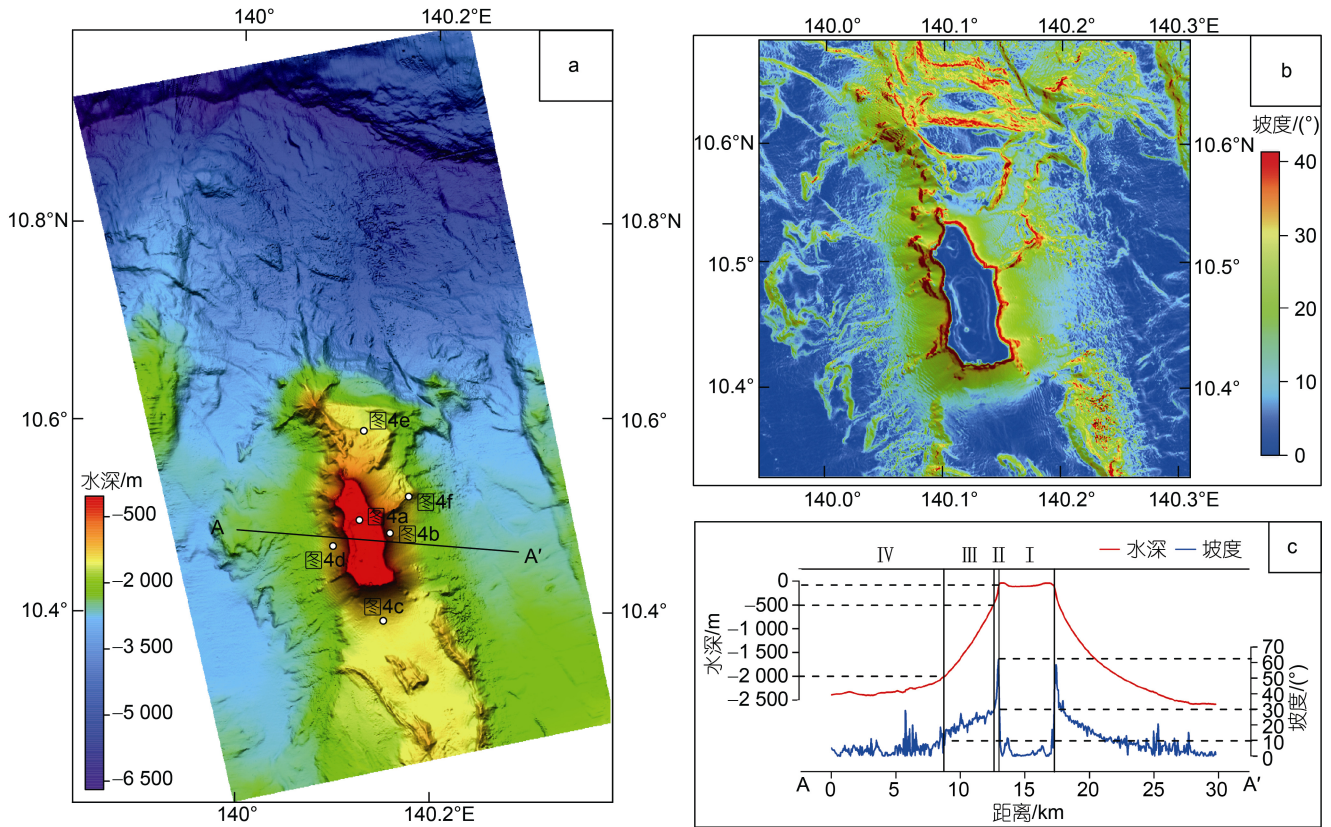


图3 卡罗琳 M4 海山区水深地形图、多波束测线布设图及剖面 AA'位置 (a),卡罗琳 M4 海山区坡度图 (b), 以及剖面 AA' 及海山斜坡分段(c)

Fig.3 Topographic map of the Caroline M4 guyot area (a), the slope of the seamount (b), and the A-A' profiles showing the seamount slope (c)

注: I-山顶平台, II-斜坡上段, III-斜坡中段, IV-斜坡下段

态呈指数函数特征, 根据地形坡度变化, 可以将其划分为三段(图 3c)。水深 500 m 以浅为陡峭的上段斜坡, 坡度一般大于 30°, 100~300 m 等深线范围内坡度都在 60°以上, 最大可达 77°。水深 500~2 000 m 处为斜坡中段, 海山斜坡的坡度从 30°下降至 10°。水深 2 000 m 以下为斜坡下段, 整体坡度小于 10°, 由于沉积物堆积及大型水道发育, 坡度变化较为剧烈。海山南部为平坦的海底台地, 水深在 1 500 m 左右, 高差约 800 m。

根据 ROV 取得的海底样品及高清视频图像来看, 卡罗琳 M4 平顶海山 1 500 m 以浅均覆盖着块状礁灰岩和生物碳酸盐碎屑沉积物, 海山玄武岩未在本航次调查路线中出露, 仅在白色沙质沉积物表面采到浮岩样品。M4 海山山顶平台发育大量藻类(图 4a), 300 m 以浅的斜坡以陡峭的城堡状礁灰岩出露为特征(图 4b), 300~1 500 m 呈现生物碎屑沙地-礁灰岩碎石滩, 300~1 500 m 呈现生物碎屑沙地-礁灰岩碎石滩-大块礁灰岩交替出现的地貌(图 4c~4e)。碎屑沉积

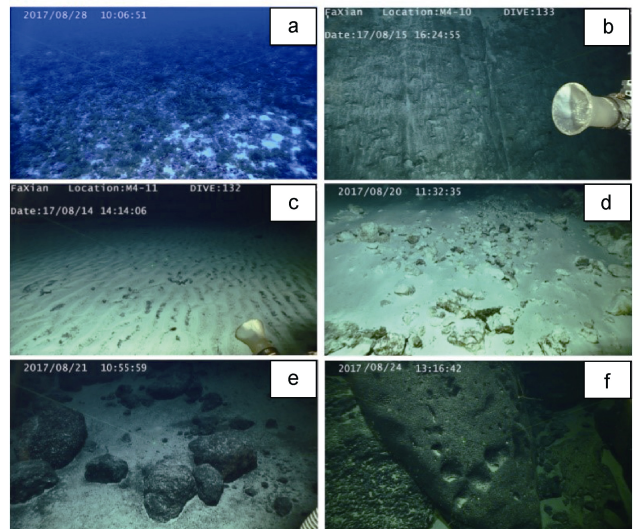


图4 ROV 海底影像资料(位置标记于图 3a)

Fig.4 Seafloor photos collected by ROV (see location on figure 3a)
注: a: 海山山顶平台; b: 出露的城堡状礁灰岩; c: 生物碎屑沙地; d: 礁灰岩碎石滩; e: 大块礁灰岩; f: 巨型礁灰岩山脊与蚀坑状地貌

物在深部以有孔虫沙为主, 浅部以珊瑚沙为主。碎屑沙地常见沙波发育, 波长一般 10~30 cm, 可指示洋流方向。海山东北部一个山脊由巨型礁灰岩构成, 采样分析表明该处碳酸盐岩重结晶程度较高, 其上发育有大量近圆形, 直径 1 m 以内的海蚀坑状地貌(图 4f)。在该山脊上还观察到了大量底栖生物以及铁锰结壳, 说明环境较为稳定。

3.2 地貌解释

3.2.1 火山地貌 由于玄武岩基底被碳酸盐沉积物覆盖, 在 M4 海山主体难以识别火山地貌特征。火山锥是近似圆锥形的正地形, 可以孤立或沿火山脊等主要构造走向分布(Tempera *et al.*, 2013; Casalbore, 2018)。研究区北部有两个北坡向马里亚纳海沟延伸的大型火山锥(图 5, 图 6)。在 M4 海山西北约 14 km 处的大型火山锥也被称作 M8 海山, 其最高点水深为 788 m, 高约 1 200 m, 底面半径约 3 km, 周围有三条放射状山脊。M4 海山东北约 18 km 处存在另一座火山锥, 规模相对较小, 其最高点水深为 2 283 m, 高

约 600 m, 底面半径约 2.5 km。该火山锥形态较为破碎, 可能被附近发育的一组 NE 向海沟洋侧斜坡正断层错段。此外, M4 海山与西北大型火山锥之间的山脊上发育有数个高约 50~100 m, 底面呈近圆形或沿山脊走向拉长的椭圆形的丘状地质体。由于这些地质体的形态较为规则, 且该山脊顶部并不处于 M4 海山的滑塌沉积区域, 故推测它们不是大型沉积块体, 而是成簇出现的火山锥。

线性喷发中心(linear eruptive centers, LEC)是细长的火山成因正地形, 常常沿着山脊方向或主要的构造走向延伸(Casalbore *et al.*, 2015)。在研究区南部的海底台地之上可以识别三个线性喷发中心(图 5), 它们的平均高度约 180 m, 平均宽度约 1.5 km, 走向为近 NNW-SSE 向。台地东部与西部的两个线性喷发中心都向南延伸至多波束作业区域外, 从 GEBCO (the general bathymetric chart of the oceans)全球水深地形资料上可以确定它们的长度约为 20 km。

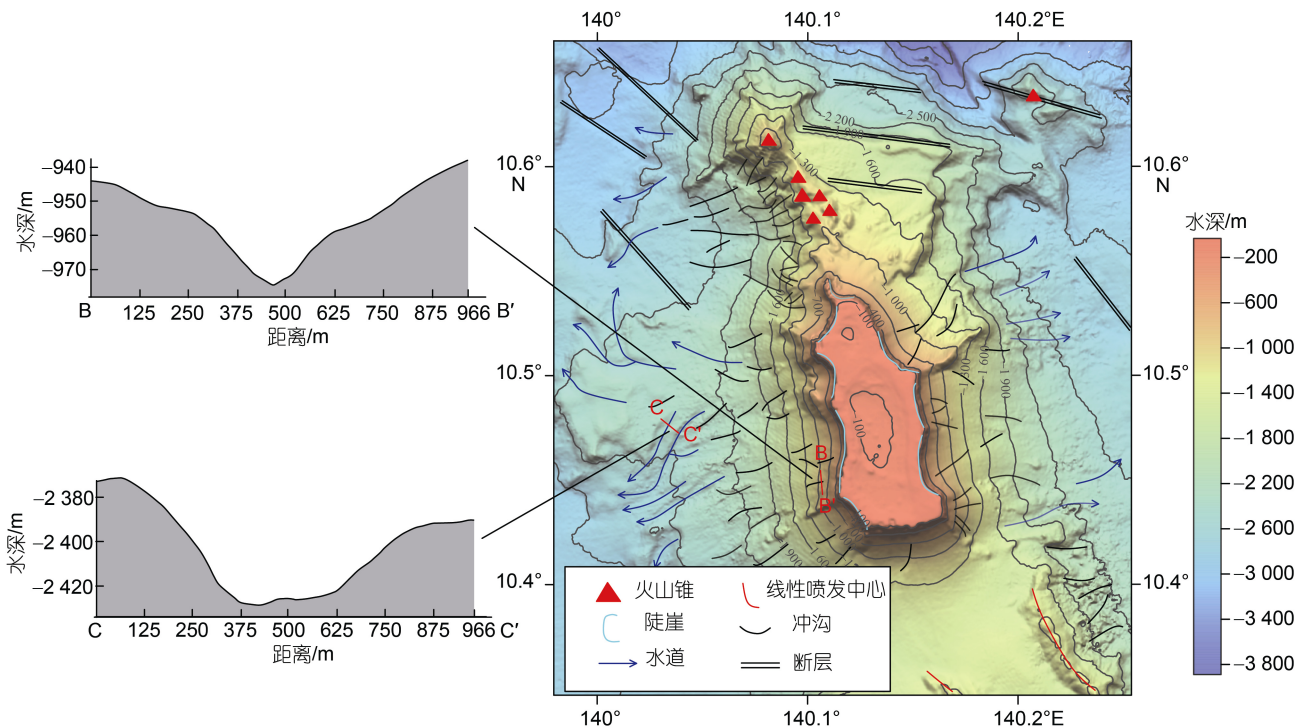


图 5 卡罗琳 M4 海山区地貌解释等深线图及剖面 BB'、CC'

Fig. 5 Contour map and geomorphological interpretation of the Caroline M4 guyot area and profiles BB' and CC'

3.2.2 重力侵蚀地貌 “C”字型的弯曲形态出现在除南部外的全部山顶平台边缘, 是 M4 海山最显著的平面特征(图 5, 图 6)。该形态特征在平台的东北边缘

规模最大, 长度约 5 km; 在平台西南边缘规模最小, 长度约 2 km。它们之间的交汇处向海山外侧突出, 在北部、东北部和西南部与山脊相连。这种“C”字型的

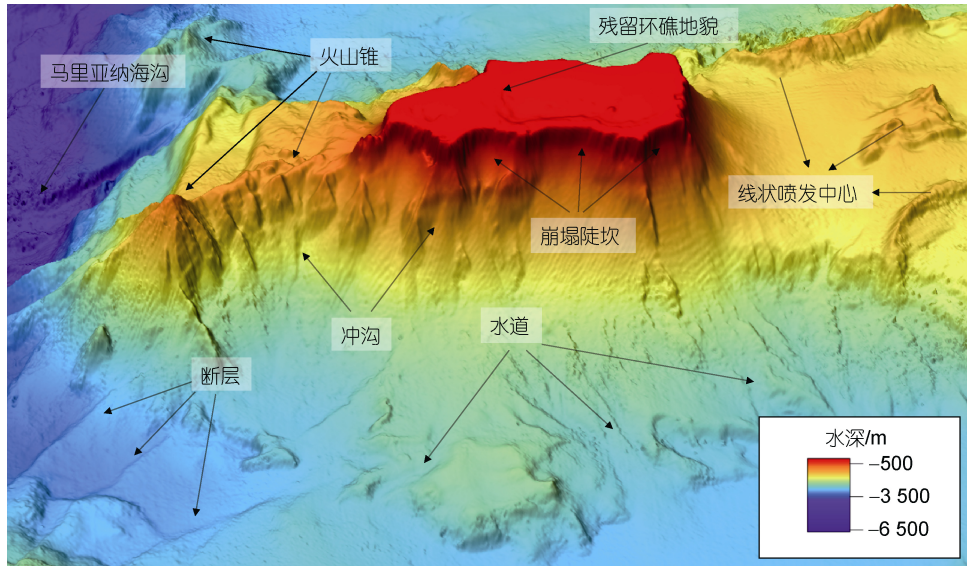


图6 卡罗琳 M4 海山区三维地貌图

Fig.6 3D topographic map of the Caroline M4 guyot area

弯曲形态被认为是失稳崩塌的形态表征, 常发现于火山岛屿及环礁的边缘(Terry *et al*, 2013; Clare *et al*, 2018; Idárraga-García *et al*, 2019)。M4 海山顶部 300 m 水深以浅的斜坡平均坡度达 60° , 由于松散沉积物或岩屑的休止角一般小于 40° (Mitchell *et al*, 2000), 表明海山的上侧斜坡缺少沉积物(Keating, 1998), 推测这一特征为边缘崩塌在斜坡顶部形成的陡崖, 直接向下倾斜突出的等深线也反映了海底滑坡的影响(图 5)。此外, ROV 影像资料显示海山各坡面上都发育生物碎屑沙地-礁灰岩碎石滩, 滑坡垮塌地貌十分显著, 大型底栖生物几乎绝迹(图 4)。其中海山西坡多数礁灰岩碎石并未覆盖黑色铁锰氧化物, 呈现出其原本的灰白色(图 4d), 说明这些礁灰岩暴露于海水中的时间并不长, 很可能是距今较短地质历史时期内的滑坡沉积物。

冲沟地貌是在海山中段斜坡广泛发育的线状负地形, 具有“V”字型的剖面特征(图 5 剖面 BB'), 主要分布在 M4 海山水深 700~2 000 m 范围内, 它们长约数千米, 宽度在百米级别, 深度不大于 50 m。在海山东北部有一条规模较大的冲沟, 其头部直接与山顶平台相连(图 5)。海山西部冲沟数量较多, 数条冲沟可以合并, 在水深两千米以下随着坡度减小过渡为水道。水道相较冲沟规模更大, 具有“U”字型的剖面特征(图 5 剖面 CC'), 末端汇入深海底床。

3.2.3 残留环礁地貌 M4 海山的山顶平台周长约为 33 km, 面积约为 47.5 km^2 , 具有较完整的环礁形态(空桶状的几何构造)(Purdy *et al*, 2005), 可以被识别为残留期的环礁或淹没环礁(图 7)。本文主要参照赵焕庭(1996)提出的珊瑚礁地貌分类体系, 并在综合前人对环礁地貌的遥感研究成果基础上(Leon *et al*, 2011; Phinn *et al*, 2012), 将 M4 海山的残留环礁地貌从外缘到中心划分为礁前斜坡、礁坪与潟湖三大地貌单元。礁前斜坡是指礁坪外缘坡折线至台地基底环绕环礁的向海坡, 在 3.1 节与 3.2.2 节已有描述。在 M4 海山的礁前斜坡并没有发现其他环礁常见的在海平面升降等因素影响下而发育的水下阶地, 可能反映了重力崩塌作用造成的破坏。礁坪是礁前坡折线与潟湖之间的地貌带, 也是环礁珊瑚生长与碎屑堆积的主要部分。M4 海山残留环礁的礁坪平均宽度约 600 m, 水深范围约在 30~70 m, 东部相对西部略宽且连续性较好, 北部缺失礁突起带, 在西北与南部礁坪的外缘还发育有坑洞。潟湖是环礁中心被礁坪环绕的区域, 可被细分为礁坪边缘向潟湖倾斜过渡的潟湖坡以及地形相对平坦的潟湖底。M4 海山的残留环礁发育有两个潟湖: 北部的次级潟湖面积仅 1.6 km^2 , 最深点水深 109 m; 南部的中央潟湖面积为 19.3 km^2 , 最深点水深 121 m。南部潟湖东侧坡度($0^\circ\sim 5^\circ$)远小于西部潟湖坡($10^\circ\sim 15^\circ$), 推测是由于研究区 200 m 以浅的水流方向为自东向西, 造成东部潟

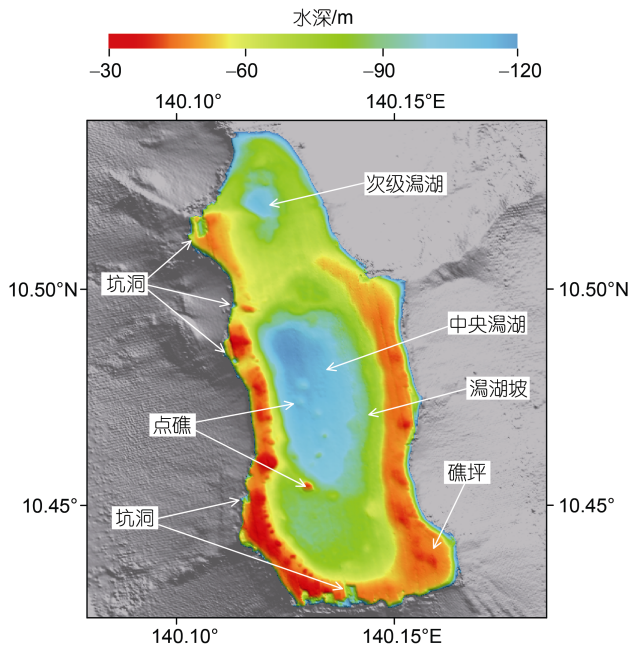


图 7 卡罗琳 M4 海山残留环礁地貌

Fig.7 Atoll morphology on top of the Caroline M4 guyot

湖坡能从礁坪获得更多生物碎屑。南部泻湖有两级深浅不同的泻湖底，地势整体向西北倾斜，泻湖底上还发育有点礁地貌，其中规模最大的高度可达 30 m。

4 讨论

4.1 火山地貌特征及喷发活动与区域构造的关系

火山地貌的形态与分布为我们讨论研究区内火山作用和构造之间的相互关系提供了信息，并可以进一步反映区域岩石圈应力及基底结构的方向。M4 海山基底与其西北的山脊，以及南部的海底台地和线状喷发中心，都呈现出其他海山或岛屿的火山地貌中常见的细长形态(Searle *et al*, 2010; Tempera *et al*, 2013)。它们主要沿 NWW 向延伸，与卡罗琳洋脊西北部的的主要区域构造走向一致，在 M4 海山的东部也可以观察到该走向的断层崖。由于断层裂隙作为岩石圈的薄弱区域，为岩浆上升提供了优先通道，可以造成沿线性喷口的喷发(Zanon *et al*, 2015)。研究区内火山作用时期的主要构造应力方向应为与该组断层方向垂直的 WSS 方向(Casalbore *et al*, 2015)，反映了喷发活动发生在马里亚纳-雅浦海沟向西俯冲的时期，即卡罗琳海脊与马里亚纳海沟碰撞前。在喷发活动后期，由于喷发裂隙内岩浆的快速冷却，导致岩浆通道逐渐阻断，造成喷发喷口的集中(Head III *et al*, 1996)，

进而形成 M4 海山区的大型火山锥。这种线源喷发向点源喷发的快速过渡也在冰岛等地的陆上玄武岩裂隙喷发期间被发现(Andrew *et al*, 2007)。然而，考虑到侵蚀-沉积活动对火山地貌进行的后期改造，以及岩浆成分的差异性，仅基于水深资料对喷发样式进行的分析仍有很大局限性。

4.2 山顶边缘崩塌与触发因素

“C”字型的弯曲形态表明 M4 海山山顶平台经历过多次崩塌，由于残留环礁上未发现珊瑚礁生长受边缘形态破坏影响的证据(Etienne *et al*, 2021)，故推测 M4 海山最近的边缘崩塌事件发生在主要的生物礁建设时期后。这种重力崩塌几乎影响了除海山南部外的全部平台边缘，并且由滑坡痕(陡崖)及斜坡上的块体与碎屑组成块体搬运体系(Puga-Bernabéu *et al*, 2017; Watson *et al*, 2017)。考虑到海山上段斜坡基本没有发育作为重力流固定输出路径的侵蚀冲沟群，因此认为 M4 海山目前浅水沉积物向深水输送的主要方式为间歇性块体搬运。沿斜坡向下，沉积块体的表现形式可发生滑动-滑塌-碎屑流-浊流的转变，并在下段斜坡形成水道(Shanmugam, 2000)。

由于生物礁的沉积作用和早期海底的胶结作用，碳酸盐斜坡通常比硅质碎屑斜坡更为陡峭(Adams *et al*, 2014)，当坡度角高于休止角时，斜坡的破裂崩塌就会被触发以重新调整坡度。此外，在数值模拟实验(Frost III *et al*, 2009)或古碳酸盐台地中(Nolting *et al*, 2018)被发现的同沉积变形作用形成的台地边缘裂缝也可能是诱发重力崩塌的内生因素。M4 海山残留环礁边缘的坑洞可能与巴哈马安德罗斯岛海湾的“蓝洞”一样，是该类裂缝控制下岩溶作用形成的(Smart *et al*, 1988)。而外生的自然因素如地震活动、海平面波动以及极端天气，都可能成为驱动力，与内生因素共同触发 M4 海山山顶的边缘崩塌事件。

4.3 生物礁的生长与消亡

地震数据(Winterer *et al*, 1984)与深海钻探结果(Baudin *et al*, 1993)都表明了太平洋广泛分布的平顶海山被巨厚的碳酸盐岩建隆所覆盖，证明在热带与亚热带地区，海山基底之上浅水生物礁的生长现象十分普遍。在 M4 海山东北山脊水深 1 500 m 以浅观察到了出露的巨型块状礁灰岩，其上还发育有海蚀地貌。由于这些特征的形成环境位于海平面附近，它们在深水出现是海山发生过大规模沉降的迹象，

表明 M4 海山的火山基底可能至少沉降了 1 500 m。前人的沉积学研究结果表明, 平顶海山在最终被淹没之前, 可能还会在百万年尺度内因海平面振荡(幅度可达 100 m 以上)经历多次暴露, 并使碳酸盐台地在雨水的岩溶作用下形成凸起的溶蚀边缘与被包围的溶蚀凹陷(Purdy *et al.*, 2001; Schlager *et al.*, 2013)。随后冰消期海平面上升, 喀斯特地形的平台被再次淹没, 珊瑚优先生长于外部边缘并相对潟湖保持较高的生长速率(Droxler *et al.*, 2021)。因此, M4 海山顶部的环礁是建立在岩溶地貌之上的生物礁, 潟湖由古碳酸盐台地的溶蚀凹陷演化形成, 礁坪边缘的坑洞可能也具有喀斯特性质。

M4 海山残留环礁的潟湖地貌一定程度上反映了环礁被淹没前潟湖的形态, 其相对面积与相对水深较现今太平洋典型环礁的潟湖偏大。虽然我国南海(Wu *et al.*, 2020)与马尔代夫(Betzler *et al.*, 2015)的部分环礁在“漏桶效应”影响下, 潟湖沉积物被不断输入到外海, 使潟湖充填速率降低, 也会造成潟湖保持较大面积与水深。然而 M4 海山残留环礁的礁体形态整体来看较为连续, 并不符合“漏桶”模型。在经典模型中, 随着环礁的生长, 潟湖内生产的碳酸盐沉积物或边缘礁碎屑会不断充填潟湖, 使潟湖逐渐被填平(Purdy *et al.*, 2005; O'Leary *et al.*, 2010)。推测 M4 海山的大型潟湖地貌可能表明残留环礁具有较低的发育程度, 即在环礁发育的早期, 生物造礁作用被抑制, 使碳酸盐工厂的生产速率降低, 从而无法对潟湖进行有效填充, 指示了最后一次暴露期后异常快速的淹没过程。

已有研究表明, 现代珊瑚礁的增长潜能远大于洋壳下沉与海平面上升的最大速率, 因此, 海洋环境的变化才是造成碳酸盐台地淹没的主要因素(Schlager, 1999)。由于丰富的营养物质不仅会刺激浮游生物繁殖, 造成底栖环境的光照受到限制, 还会使藻类生长迅速并抢占珊瑚的生长空间(Mutti *et al.*, 2003), 因此, 珊瑚礁一般在寡营养水体中生长, 富营养环境很少发育大型碳酸盐台地(颜佳新等, 2019)。在受陆源输入影响较小的区域, 风场(Cabioch *et al.*, 2008)、火山活动(Vogt, 1989)以及热对流循环(Rougerie *et al.*, 1993)等驱动的上升流可以通过将深海的营养盐输送到台地顶部, 控制生物礁的生长环境。现今 M4 海山山顶

附近生源要素(如溶解无机态氮磷)浓度远高于周围海区的现象, 也被认为是北赤道流与海山地形相互作用形成上升流引起的(Ma *et al.*, 2021)。结合晚中新世索罗尔海槽扩张的地质历史背景, 本研究对 M4 海山生物礁的淹没机制提出以下假设: M4 海山在随太平洋板块向西北移动的过程中, 由于逐渐靠近北赤道流的中心通道, 北赤道流与海山地形的相互作用得到加强, 进而形成更强烈的海山上升流并输入更多营养物质至上层水体, 使 M4 海山顶部生物造礁作用被抑制, 最终造成碳酸盐台地的淹没。

5 结论

本研究利用多波束数据与水下影像资料对卡罗琳 M4 平顶海山的地形地貌进行了分析, 得到了以下结论:

(1) M4 海山的斜坡具有分段性, 坡度随水深增大迅速减小, 整体呈指数函数形态。斜坡上段为出露的陡峭巨型礁灰岩, 中段生物碎屑沙地-礁灰岩碎石滩-大块礁灰岩交替出现。

(2) M4 海山的火山地貌包括火山锥与线性喷发中心。NWW 向的火山构造表明火山喷发活动可能沿该方向的裂隙进行。

(3) M4 海山山顶平台边缘的“C”字型弯曲形态与陡崖指示了崩塌破坏事件, 块体与碎屑向下搬运并在中下段斜坡形成浊流, 发育冲沟与水道。

(4) M4 海山顶部保留了较为完整的残留环礁形态, 可以识别礁坪、潟湖和点礁等地貌。环礁的淹没机制可能是由于上升流输入的营养物质抑制了珊瑚生长。

参 考 文 献

- 马本俊, 秦志亮, 吴时国, 等, 2018. 深水斜坡类型与沉积过程及其产物研究进展[J]. 沉积学报, 36(6): 1075-1090.
- 赵焕庭, 1996. 南沙群岛自然地理[M]. 北京: 科学出版社.
- 原齐泽, 秦志亮, 马本俊, 等, 2021. 珊瑚型环礁斜坡地形水下声传播特性分析[J]. 声学技术, 40(6): 768-774.
- 颜佳新, 孟琦, 王夏, 等, 2019. 碳酸盐工厂与浅水碳酸盐岩台地: 研究进展与展望[J]. 古地理学报, 21(2): 232-253.
- ADAMS E W, KENTER J A M, 2014. So different, yet so similar: comparing and contrasting siliciclastic and carbonate slopes [M] // VERWER K, PLAYTON T E, HARRIS P M. Deposits, Architecture, and Controls of Carbonate Margin, Slope and Basinal Settings. Tulsa, USA: SEPM Special Publication: 14-25.

- ALTIS S, 1999. Origin and tectonic evolution of the Caroline Ridge and the Sorol Trough, western tropical Pacific, from admittance and a tectonic modeling analysis [J]. *Tectonophysics*, 313(3): 271-292.
- ANDREW R E B, GUDMUNDSSON A, 2007. Distribution, structure, and formation of Holocene lava shields in Iceland [J]. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 168(1/2/3/4): 137-154.
- BAUDIN F, ARNAUD H, SAGER W, *et al*, 1993. Northwestern Pacific atolls and Guyots-Odp leg 143 preliminary-results [J]. *Comptes Rendus de L Academie des Sciences Serie II*, 316(4): 505-511.
- BETZLER C, LINDHORST S, LÜDMANN T, *et al*, 2015. The leaking bucket of a Maldives atoll: implications for the understanding of carbonate platform drowning [J]. *Marine Geology*, 366: 16-33.
- CABIOCH G, MONTAGGIONI L, FRANK N, *et al*, 2008. Successive reef depositional events along the Marquesas foreslopes (French Polynesia) since 26 ka [J]. *Marine Geology*, 254(1/2): 18-34.
- CASALBORE D, 2018. Volcanic islands and seamounts [M] // MICALLEF A, KRSTEL S, SAVINI A. *Submarine Geomorphology*. Cham, Switzerland: Springer: 333-347.
- CASALBORE D, ROMAGNOLI C, PIMENTEL A, *et al*, 2015. Volcanic, tectonic and mass-wasting processes offshore Terceira Island (Azores) revealed by high-resolution seafloor mapping [J]. *Bulletin of Volcanology*, 77(3): 24.
- CHOI H, KIM S S, PARK S H, *et al*, 2021. Geomorphological and spatial characteristics of underwater volcanoes in the easternmost Australian-Antarctic ridge [J]. *Remote Sensing*, 13(5): 997.
- CLARE M A, LE BAS T, PRICE D M, *et al*, 2018. Complex and cascading triggering of submarine landslides and turbidity currents at volcanic islands revealed from integration of high-resolution onshore and offshore surveys [J]. *Frontiers in Earth Science*, 6: 223.
- COHEN A L, HART S R, 2004. Deglacial sea surface temperatures of the western tropical Pacific: a new look at old coral [J]. *Paleoceanography*, 19(4): PA4031.
- DONG D D, ZHANG Z Y, BAI Y L, *et al*, 2018. Topographic and sedimentary features in the Yap subduction zone and their implications for the Caroline Ridge subduction [J]. *Tectonophysics*, 722: 410-421.
- DROXLER A W, JORRY S J, 2021. The origin of modern atolls: challenging Darwin's deeply ingrained theory [J]. *Annual Review of Marine Science*, 13: 537-573.
- ETIENNE S, LE ROY P, TOURNADOUR E, *et al*, 2021. Large-scale margin collapses along a partly drowned, isolated carbonate platform (Lansdowne Bank, SW Pacific Ocean) [J]. *Marine Geology*, 436: 106477.
- FORNARI D J, PERFIT M R, ALLAN J F, *et al*, 1988. Geochemical and structural studies of the Lamont seamounts: seamounts as indicators of mantle processes [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 89(1): 63-83.
- FROST III E L, KERANS C, 2009. Platform-margin trajectory as a control on syndepositional fracture patterns, Canning Basin, Western Australia [J]. *Journal of Sedimentary Research*, 79(2): 44-55.
- FUJIWARA T, TAMURA C, NISHIZAWA A, *et al*, 2000. Morphology and tectonics of the Yap Trench [J]. *Marine Geophysical Researches*, 21(1/2): 69-86.
- GAINA C, MÜLLER D, 2007. Cenozoic tectonic and depth/age evolution of the Indonesian gateway and associated back-arc basins [J]. *Earth-Science Reviews*, 83(3/4): 177-203.
- GAN Y, MA X C, LUAN Z D, *et al*, 2021. Morphology and multifractal features of a Guyot in specific topographic vicinity in the Caroline Ridge, West Pacific [J]. *Journal of Oceanology and Limnology*, 39(5): 1591-1604.
- HEAD III J W, WILSON L, SMITH D K, 1996. Mid-ocean ridge eruptive vent morphology and substructure: evidence for dike widths, eruption rates, and evolution of eruptions and axial volcanic ridges [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 101(B12): 28265-28280.
- HOWE J A, STOKER M S, MASSON D G, *et al*, 2006. Seabed morphology and the bottom-current pathways around Rosemary bank seamount, northern Rockall Trough, north Atlantic [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 23(2): 165-181.
- HU D X, WU L X, CAI W J, *et al*, 2015. Pacific western boundary currents and their roles in climate [J]. *Nature*, 522(7556): 299-308.
- IDÁRRAGA-GARCÍA J, LEÓN H, 2019. Unraveling the underwater morphological features of Roncador bank, Archipelago of San Andres, Providencia and Santa Catalina (Colombian Caribbean) [J]. *Frontiers in Marine Science*, 6: 77.
- KEATING B H, 1998. Side-scan sonar images of submarine landslides on the flanks of atolls and Guyots [J]. *Marine Geodesy*, 21(2): 129-145.
- KIM S S, WESSEL P, 2011. New global seamount census from altimetry-derived gravity data [J]. *Geophysical Journal International*, 186(2): 615-631.
- LEON J, WOODROFFE C D, 2011. Improving the synoptic mapping of coral reef geomorphology using object-based image analysis [J]. *International Journal of Geographical Information Science*, 25(6): 949-969.
- MA J, SONG J M, LI X G, *et al*, 2021. Seawater stratification vs. plankton for oligotrophic mechanism: a case study of M4 seamount area in the western Pacific Ocean [J]. *Marine Environmental Research*, 169: 105400.
- MITCHELL N C, TIVEY M A, GENTE P, 2000. Seafloor slopes at mid-ocean ridges from submersible observations and implications for interpreting geology from seafloor topography [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 183(3/4): 543-555.
- MOORE J G, INGRAM B L, LUDWIG K R, *et al*, 1996. Coral ages and island subsidence, Hilo drill hole [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 101(B5): 11599-11605.
- MUTTI M, HALLOCK P, 2003. Carbonate systems along nutrient and temperature gradients: some sedimentological and geochemical constraints [J]. *International Journal of*

- Earth Sciences, 92(4): 465-475.
- NOLTING A, ZAHM C K, KERANS C, *et al*, 2018. Effect of carbonate platform morphology on syndepositional deformation: insights from numerical modeling [J]. *Journal of Structural Geology*, 115: 91-102.
- O'LEARY M J, PERRY C T, 2010. Holocene reef accretion on the Rodrigues carbonate platform: an alternative to the classic "bucket-fill" model [J]. *Geology*, 38(9): 855-858.
- PASSARO S, MILANO G, D'ISANTO C, *et al*, 2010. DTM-based morphometry of the Palinuro seamount (Eastern Tyrrhenian Sea): geomorphological and volcanological implications [J]. *Geomorphology*, 115(1/2): 129-140.
- PHINN S R, ROELFSEMA C M, MUMBY P J, 2012. Multi-scale, object-based image analysis for mapping geomorphic and ecological zones on coral reefs [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 33(12): 3768-3797.
- PUGA-BERNABÉU Á, BEAMAN R J, WEBSTER J M, *et al*, 2017. Gloria knolls slide: a prominent submarine landslide complex on the great barrier reef margin of north-eastern Australia [J]. *Marine Geology*, 385: 68-83.
- PURDY E G, GISCHLER E, 2005. The transient nature of the empty bucket model of reef sedimentation [J]. *Sedimentary Geology*, 175(1/2/3/4): 35-47.
- PURDY E G, WINTERER E L, 2001. Origin of atoll lagoons [J]. *GSA Bulletin*, 113(7): 837-854.
- ROUGERIE F, WAUTHY B, 1993. The endo-upwelling concept: from geothermal convection to reef construction [J]. *Coral Reefs*, 12(1): 19-30.
- SCHLAGER W, 1999. Scaling of sedimentation rates and drowning of reefs and carbonate platforms [J]. *Geology*, 27(2): 183-186.
- SCHLAGER W, PURKIS S J, 2013. Bucket structure in carbonate accumulations of the Maldives, Chagos and Laccadive Archipelagos [J]. *International Journal of Earth Sciences*, 102(8): 2225-2238.
- SCHWARTZ D M, SOULE S, WANLESS V D, *et al*, 2018. Identification of erosional terraces on seamounts: implications for interisland connectivity and subsidence in the Galápagos Archipelago [J]. *Frontiers in Earth Science*, 6: 88.
- SEARLE R C, MURTON B J, ACHENBACH K, *et al*, 2010. Structure and development of an axial volcanic ridge: mid-Atlantic ridge, 45°N [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 299(1/2): 228-241.
- SHANMUGAM G, 2000. 50 years of the turbidite paradigm (1950s—1990s): deep-water processes and facies models—a critical perspective [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 17(2): 285-342.
- SHI X Y, WANG Z Y, HUANG H J, 2021. Physical oceanography of the Caroline M4 seamount in the tropical western Pacific Ocean in summer 2017 [J]. *Journal of Oceanology and Limnology*, 39(5): 1-17.
- SMART P L, PALMER R J, WHITAKER F, *et al*, 1988. Neptunian dikes and fissure fills: an overview and account of some modern examples [M] // JAMES N P, CHOQUETTE P W. *Paleokarst*. New York, USA: Springer: 149-162.
- STAUDIGEL H, CLAGUE D, 2010. The geological history of deep-sea volcanoes: biosphere, hydrosphere, and lithosphere interactions [J]. *Oceanography*, 23(1): 58-71.
- TEMPERA F, HIPOLITO A, MADEIRA J, *et al*, 2013. Condor seamount (Azores, NE Atlantic): a morpho-tectonic interpretation [J]. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 98: 7-23.
- TERRY J P, GOFF J, 2013. One hundred and thirty years since Darwin: 'reshaping' the theory of atoll formation [J]. *The Holocene*, 23(4): 615-619.
- TURNEWITSCH R, FALAHAT S, NYCANDER J, *et al*, 2013. Deep-sea fluid and sediment dynamics—influence of hill- to seamount-scale seafloor topography [J]. *Earth-Science Reviews*, 127: 203-241.
- VOGT P R, 1989. Volcanogenic upwelling of anoxic, nutrient-rich water: a possible factor in carbonate-bank/reef demise and benthic faunal extinctions? [J]. *Geological Society of America Bulletin*, 101(10): 1225-1245.
- WATSON S J, WHITTAKER J M, LUCIEER V, *et al*, 2017. Erosional and depositional processes on the submarine flanks of Ontong Java and Nukumanu atolls, western equatorial Pacific Ocean [J]. *Marine Geology*, 392: 122-139.
- WINTERER E L, METZLER C V, 1984. Origin and subsidence of Guyots in mid-Pacific mountains [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 89(B12): 9969-9979.
- WU S G, CHEN W L, HUANG X X, *et al*, 2020. Facies model on the modern isolated carbonate platform in the Xisha Archipelago, South China Sea [J]. *Marine Geology*, 425: 106203.
- XIA C L, ZHENG Y P, LIU B H, *et al*, 2020. Geological and geophysical differences between the north and south sections of the Yap trench-arc system and their relationship with Caroline Ridge subduction [J]. *Geological Journal*, 55(12): 7775-7789.
- XU K D, 2021. Exploring seamount ecosystems and biodiversity in the tropical western Pacific Ocean [J]. *Journal of Oceanology and Limnology*, 39(5): 1585-1590.
- ZANON V, PIMENTEL A, 2015. Spatio-temporal constraints on magma storage and ascent conditions in a transtensional tectonic setting: the case of the Terceira Island (Azores) [J]. *American Mineralogist*, 100(4): 795-805.
- ZHANG G L, ZHANG J, WANG S, *et al*, 2020. Geochemical and chronological constraints on the mantle plume origin of the Caroline Plateau [J]. *Chemical Geology*, 540: 119566.
- ZHAO Y C, ZHAO Y, ZHENG S, *et al*, 2020. Virioplankton distribution in the tropical western Pacific Ocean in the vicinity of a seamount [J]. *MicrobiologyOpen*, 9(6): 1207-1224.

GEOMORPHOLOGICAL CHARACTERISTICS AND GEOLOGICAL PROCESSES OF CAROLINE M4 GUYOT

LIU Zhe-Hao^{1,2}, ZHANG Jian-Xing^{1,3}, WANG Bing⁴, LIU Yu-Bin^{1,2},
DU Meng-Di^{1,2}, LUAN Zhen-Dong^{1,2,3}

(1. CAS Key Laboratory of Marine Geology and Environment, Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Center for Ocean Mega-Science, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China; 4. College of Oil and Gas Engineering, Shandong Institute of Petroleum and Chemical Technology, Dongying 257061, China)

Abstract The Caroline M4 guyot lies on the junction of the Caroline Ridge and the Mariana Trench. It is an isolated and submerged carbonate platform in minimum water depth of only 28 m below sea surface. Using high-resolution multi-beam bathymetric data collected by R/V “Kexue”, and near-bottom observation video data obtained by ROV “Faxian”, the topographic and geomorphological features of the Caroline M4 guyot were described and the main geological processes affecting the evolution of the guyot were analyzed. Volcanic landforms such as linear eruption centers indicate fissure eruption activities along linear vents occurred in the study area. The C-shaped curvature forms and slump scarps indicate collapse of the margin atop the guyot. The mass transport complexes (MTCs) composed of failure scars and fallen blocks or debris transformed into turbidity currents and formed gullies and channels in the middle-lower slope. The guyot top displays a relatively complete morphology of an atoll. The mechanism of its inundation may be that the rich nutrients input by the upwelling affect the illumination of the benthic environment and inhibit the growth of corals.

Key words seamount; seafloor topography and geomorphology; carbonate slope; margin collapse; drowning of reef