

DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2020073101

# 西太平洋雅浦-卡罗琳海区海山多尺度地形特征

甘雨, 马小川, 栾振东, 宋永东, 徐涛, 张建兴, 阎军

中国科学院海洋研究所, 海洋地质与环境重点实验室, 青岛 266071

**摘要:** 海山地形的多尺度特征研究, 有助于理解海山形成与演化过程中的地貌过程, 并为深入认识俯冲带地球动力过程提供新的线索。本文基于中国科学院海洋研究所“科学”号科考船近年来在雅浦-卡罗琳海区采集的高分辨率海底地形数据, 利用统计学及频谱分析等方法, 分析了研究区 42 座海山的形态及地形粗糙度特征, 并对海山地形多尺度特征及其成因开展研究。结果表明, 雅浦-卡罗琳海区不同构造环境下形成的海山群, 在海山的形态参数和多尺度地形特征等方面存在显著差异。相比于索罗尔海槽, 帕里西维拉海盆中的海山具有更大的宽高比与更小的平坦度。两区域内海山形态参数具有不同的线性相关关系, 表明区域内海山存在不同的形态演化过程。对帕里西维拉海盆中海山地形的频谱分析显示, 其大尺度特征信号不显著, 意味着该区域内海山地形受小尺度地貌过程的影响更大。索罗尔海槽中海山的粗糙度与海山体积具有线性相关性, 可能与不同海山形成过程的差异有关, 较早形成的海山受到了更多构造活动及小尺度地貌过程的影响, 进而形成了更加粗糙的表面特征。

**关键词:** 海山; 多尺度分析; 雅浦; 卡罗琳海脊

中图分类号: P737.2 文献标识码: A

## Multiscale topographic features of the seamounts in the Yap-Caroline area of West Pacific

GAN Yu, MA Xiaochuan, LUAN Zhendong, SONG Yongdong, XU Tao, ZHANG Jianxing, YAN Jun

CAS Key Laboratory of Marine Geology and Environment, Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China

**Abstract:** Multiscale topography of seamounts is helpful for understanding the geomorphic processes on different scales in the formation and evolution of seamounts and may provide clues for the study on geodynamic processes relating to plate subduction. Based on the high-resolution bathymetric data of Yap-Caroline area collected by R/V “Kexue” of the Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, the morphologic features and surface roughness of 42 seamounts in the study area have been analyzed by statistical methods, with focuses on the phenomenon and genesis of multiscale features of seamounts. The result demonstrates that the morphologic parameters and multiscale features of seamounts in different tectonic environments vary significantly. Seamounts in the Parece Vela Basin have larger height-to-basal-radius ratio and smaller flatness than those in the Sorol Trough. Different linear relationships between morphologic parameters imply that seamounts in the two regions have undergone different morphologic evolution processes. Multiscale analysis results suggest that the amplitudes of large characteristic scale (6~14 km) of seamounts in the Parece Vela Basin is not significant, and small-scale geomorphological processes have greater influence on the modification of seamount landscapes in this region. The linear relationship between roughness and volume of seamounts in the Sorol Trough might result from the discrepancy in formation times. Seamounts formed earlier have gone through more tectonic activities and small-scale geomorphologic processes, which resulted in rougher surface characteristics.

**Key words:** seamount; multiscale analysis; Yap; Caroline Ridge

作为广泛且不规则地分布于海底的一类地貌, 自第一座海山于 1946 年被发现以来<sup>[1]</sup>, 其形态及分布规律的研究便受到了地质学家的关注。传统上,

海山被定义为从基准面到顶点高度大于 1000 m 的水下孤立火山建造<sup>[2]</sup>, 其中具有平缓山顶的一类被称作平顶海山或桌山<sup>[3]</sup>。海山的分布广泛, 从洋中

**资助项目:** “科学”号高端用户项目“西太平洋雅浦俯冲区海底地形小尺度粗糙度特征及其与地震活动的关系”(KEXUE2019G02); 中国科学院战略性先导科技专项“印太交汇区俯冲带浅表层结构及构造指示”(XDB42020101); 科技部科技基础资源调查专项子课题“海山区地形地貌与地质环境”(2017FY100801)

**作者简介:** 甘雨(1995—), 男, 硕士, 从事海洋沉积动力及海底地貌过程研究, E-mail: 779119638@qq.com

**通讯作者:** 马小川(1985—), 男, 副研究员, 硕导, 主要从事海底地形地貌及海洋沉积动力学研究, E-mail: mxch@qdio.ac.cn

**收稿日期:** 2020-07-31; **改回日期:** 2021-01-13. 周立君编辑

脊到地幔柱活跃的板块内部,再到板块俯冲边界的岛弧体系中均有发现<sup>[4]</sup>。基于全球卫星测高数据, Kim 和 Wessel<sup>[5]</sup> 识别出了约 25 000 座高度大于 100 m 的潜在海山构造。在对海山的形态研究中, Batiza 和 Vanko<sup>[6]</sup> 指出,海山形态的主控因素包括海山基岩的年龄、上覆沉积物厚度、岩浆活动以及岩石圈结构。Smith<sup>[7]</sup> 分析了太平洋中 85 座海山的剖面形态,并选择使用底面宽度、顶面宽度、最大高差、平坦度、坡度和宽高比 6 个参数来描述海山形态。近年来的研究更多地关注海山地形和火山、构造及沉积-侵蚀作用之间的复杂关系。例如,基于高分辨率 DEM 数据, Passaro 等<sup>[8]</sup> 对意大利第勒尼安海中的 Palinuro 海山进行了研究,分析了如环状火山口、崩塌等小尺度火山构造的产生原因; Palomino 等<sup>[9]</sup> 利用多波束数据与单道地震数据,分析了加那利海山群的火山过程与滑坡作用对地貌形态的影响; Bijesh 等<sup>[10]</sup> 利用高分辨率水深地形图研究了印度西南大陆边缘的海山形态及其与热点火山作用的联系; 针对地中海 Graham 浅滩上的现代火山喷发过程, Spatola 等<sup>[11]</sup> 综合测深数据与地震数据分析了其地貌学特征。

由于海底地形地貌在发育和演化过程中,受到了不同的时间-空间尺度中构造活动、沉积作用、海水运动和生物过程的影响,多尺度分析方法成为了研究海底地形地貌特征的有效工具<sup>[12]</sup>。其中,以频谱分析为代表的多尺度地形分析方法业已广泛应用于地貌学的研究之中。Hubbard 等<sup>[13]</sup> 提出,通过计算傅里叶变换功率谱密度函数的定积分,可以定量分析不同尺度区间内地形剖面的粗糙度。Lyons 等<sup>[14]</sup> 利用二维傅里叶变换得到了二维功率谱,并分析了海底底床形态的多尺度空间特征。在此基础上, Perron 等<sup>[15]</sup> 将二维傅里叶变换方法引入 DEM 数据分析领域,并用该方法分析了准周期性丘陵地貌的演化过程。在前人对地形地貌多尺度特征的研究中,常常将地形数据功率谱的形态变化,以及不同尺度下地形粗糙度的突变,归因为不同尺度下塑造地貌形态的主控过程的改变<sup>[16]</sup>。如 Shepard 和 Campbell<sup>[17]</sup> 在对夏威夷岛熔岩流地貌的研究中指出,厘米级尺度的粗糙度变化主要受控于风化与侵蚀作用,而米级尺度的粗糙度变化则受流体侵位作用的控制; Perron 等<sup>[15]</sup> 将 DEM 数据标准化功率谱中大、小尺度间振幅的相对强弱变化归因于小尺度侵蚀作用强度的改变;通过对美国西部地形和地壳应变速率数据的多尺度分析, Bomberger 等<sup>[18]</sup> 指出,造成大、小尺度地形起伏的原因分别为岩石圈深部的粘性

过程以及地壳表层的弹性断裂。

雅浦-卡罗琳海区位于西太平洋,地处太平洋板块、菲律宾海板块和卡罗琳板块的交界处,前人对此海域的地球物理特征、岩石学特征以及构造演化背景进行了广泛的研究<sup>[19-21]</sup>。然而,由于缺乏高分辨率的海底地形数据,前人研究未对区域内海山地貌的形态学及多尺度特征进行定量分析。近年来,中国科学院海洋研究所依托“科学”号科学考察船,对雅浦-卡罗琳海区的地形地貌、地球物理特征、水文及生态系统进行了系统的数据采集及科学研究<sup>[22-26]</sup>。借助于“科学”号搭载的全水深多波束测深系统采集的高分辨率海底地形数据,本文对雅浦-卡罗琳海区 42 座海山的形态参数进行了统计,并利用频谱分析方法对其地形的多尺度参数进行了计算,在此基础上对该海区海山形态特征、演化过程以及多尺度地形特征进行了定量分析与讨论。

## 1 研究区域

研究区域位于太平洋板块、菲律宾海板块和卡罗琳板块交汇处(图 1)。此区域内构造活动活跃,形成了诸如海沟、岛弧、海脊和海槽等特殊的板块边缘地貌,具有重要的地貌学研究价值。区域最深处位于马里亚纳海沟南部的挑战者深渊(11 034 m),雅浦岛弧及卡罗琳海脊处较浅,有多个出露于海面的岛屿及礁盘,如雅浦岛、法斯岛、恩古鲁环礁和乌利西环礁等。宫士奇<sup>[26]</sup> 结合高分辨率水深地形数据,对区域内的地貌特征进行了详细描述。其中,雅浦海沟西侧的帕里西维拉海盆地势较为平坦,其上分布着许多孤立的海山,且大部分海山集中在南部。雅浦海沟西侧和马里亚纳海沟南侧为卡罗琳海脊,索罗尔海槽将卡罗琳海脊分割为南北两部分,其中北部被称作卡罗琳群岛海脊,南部被称作西卡罗琳海隆。卡罗琳群岛海脊由众多海山组成,地形变化复杂;而西卡罗琳海隆地势平坦,其上仅存零星的地形突起。中部的索罗尔海槽水深较大,且分布有众多海山。

区域内太平洋板块、菲律宾海板块和卡罗琳板块间相互作用复杂。其中,作为太平洋板块和菲律宾海板块的边界,马里亚纳海沟西南部长约 150 km 的区域可能表现出走滑断层性质<sup>[19]</sup>。卡罗琳海脊正在向雅浦海沟之下俯冲,雅浦海沟近似南北走向,在 8°N 以北形态笔直,而在最南端发生弯曲,类似“J”字形,长度约为 700 km,最深点(8 964 m)位于海沟北部。卡罗琳海脊被索罗尔海槽分隔为南北

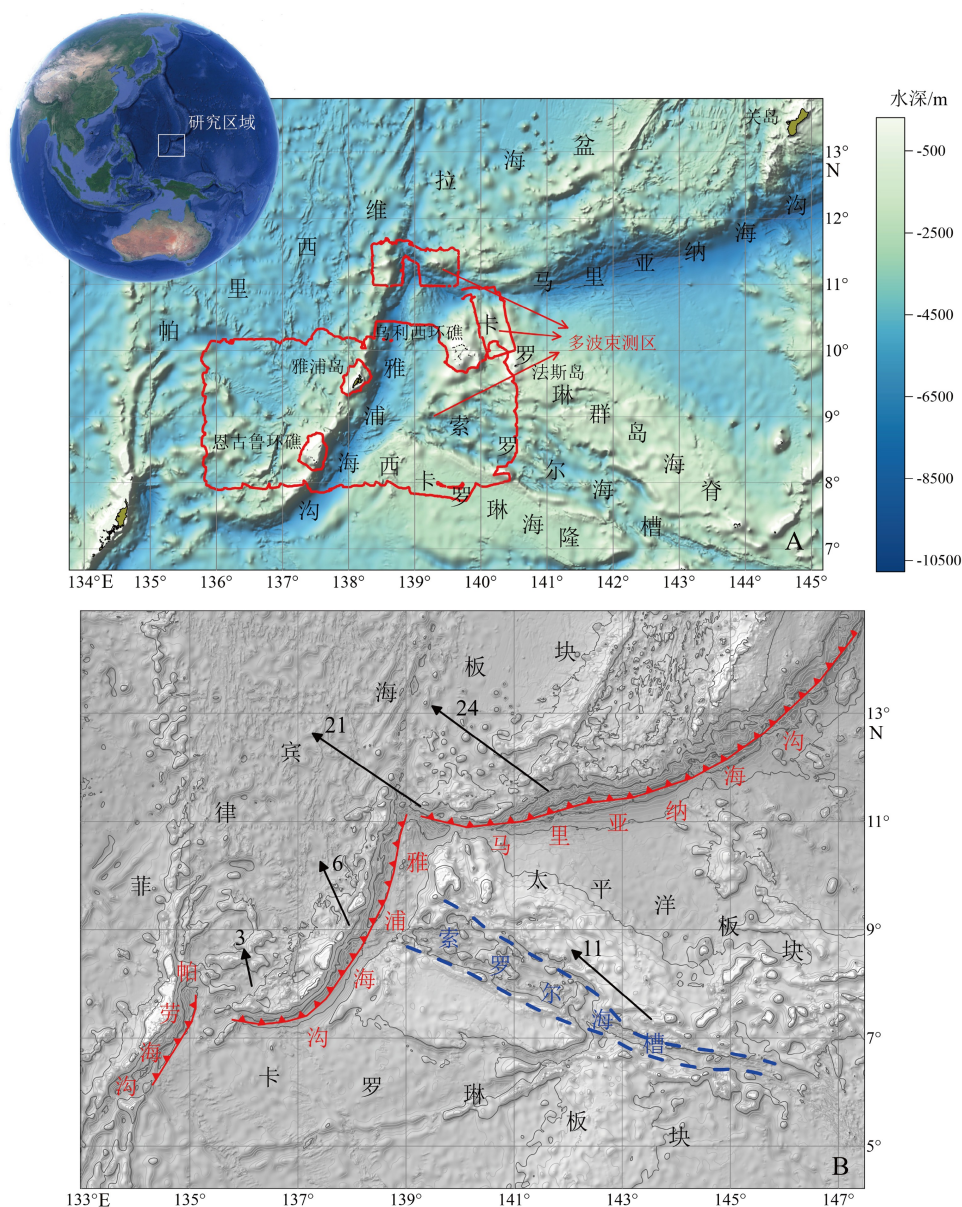


图 1 研究区域位置和水深地形图 (A) 及研究区域构造纲要图<sup>[25]</sup> (B)

其中, 地形图数据来源: GEBCO, [https://www.gebco.net/data\\_and\\_products/gridded\\_bathymetry\\_data/](https://www.gebco.net/data_and_products/gridded_bathymetry_data/); 红色实线为板块边界, 红色三角形指向上覆板块, 蓝色虚线为扩张中心, 黑色矢量指示板块运动方向和速率(mm/yr)。

Fig.1 The location and bathymetry map of the study area(data from GEBCO)(A), the structural map of the study area<sup>[25]</sup>(B)

Red lines refer to plate boundaries; Red triangles direct to the overlying plates; Black dotted lines refer to spreading centers; And black vectors show the direction and velocity(mm/yr) of plate motion.

两部分, 导致雅浦海沟南北的俯冲特征不同: 北部表现出扩张边界的特征; 而南部俯冲板块与岛弧受到挤压应力的影响<sup>[20]</sup>。整体而言, 雅浦海沟具有极慢的俯冲速率, 以及较小的岛弧-海沟间距<sup>[25]</sup>。索罗尔海槽作为太平洋板块与卡罗琳板块的边界, 大致呈北西-南东走向, 西部宽约 150 km, 向东南逐渐变窄, 整体表现出走滑-扩张的板块运动特征<sup>[21]</sup>。

前人对该区域的构造演化历史进行了详细的研究及分析, Dong 等<sup>[22]</sup> 结合前人研究及近年的观

测数据, 认为太平洋板块向菲律宾海板块下的俯冲发生于早始新世, 并导致了古伊豆-小笠原-马里亚纳-雅浦 (IBM-Yap) 俯冲体系的形成以及帕里西维拉海盆的裂解。在约 30 Ma 时, 由于帕里西维拉海盆中的弧后扩张作用, 俯冲带北部向东发生位移, 并导致了古雅浦海沟的断裂。在晚渐新世, 卡罗琳板块上的热点作用导致在卡罗琳海的渐新世洋盆基底上形成了卡罗琳海脊。卡罗琳海脊与雅浦海沟的碰撞始于晚渐新世至中中新世期间, 这一碰撞

事件大大减慢了板块的俯冲速度,并且导致了雅浦岛弧火山活动的终止。此外,该碰撞事件也极有可能影响到了帕里西维拉海盆中弧后扩张的方向,使其在约 20 Ma 时由原本的东西向扩张转为北东-南西向。在晚中新世,由于走滑-扩张环境的影响,卡罗琳海脊裂解为南北两部分,并导致了索罗尔海槽的形成。与此同时,年轻的索罗尔海槽的俯冲可能导致了雅浦岛弧中岛弧玄武岩的产生,而卡罗琳海脊的突出地形和脆弱的流变学特征则导致了俯冲区大量地垒地堑和正断层构造的产生。

## 2 研究数据及方法

本研究采用的高分辨率水深地形数据均由“科学”号搭载的 SeaBeam 3012 全水深多波束测深系统采集,包括:① 2014—2015 年采集的雅浦海沟两侧约  $1.1 \times 10^5 \text{ km}^2$  水深地形数据,② 2016 年采集的玛丽亚纳海沟北侧约  $7 \times 10^3 \text{ km}^2$  水深地形数据,以及③ 2017 及 2019 年采集的玛丽亚纳海沟南侧约  $5 \times 10^3 \text{ km}^2$  水深地形数据。数据在 CARIS HIPS&SIPS 软件软件中进行处理,主要处理步骤包括潮位校正、声速校正、船体吃水与倾角校正和异常值剔除等,处理后的结果经空间插值得到了网格分辨率分别为 200 m(数据①)及 100 m(数据②、③)的 DEM 栅格数据。本研究提取并分析了其中 42 座海山的 DEM 数据,其分布如图 2 所示。在玛丽亚纳海沟南北两侧分布有两座海山(M2 和 M4),雅浦岛弧上一

座(Y3),索罗尔海槽内 12 座(S1—S12),西卡罗琳海隆上 3 座(W1—W3),帕里西维拉海盆中 24 座(P1—P24)。

海山的基本形态参数包括了底面宽度(或底面半径  $r_b$ )、顶面宽度(或顶面半径  $r_s$ )、高度  $h$  和山坡倾角 dip 等(图 3)。由这些参数可计算得到海山的宽高比  $R = h / r_b$ 、平坦度  $f = r_s / r_d$ 、平均坡度  $\text{slope} = \arctan(2h / (r_b - r_s))$  和体积  $v = \pi h (r_b^2 + r_s^2 - r_b r_s) / 3$ <sup>[7]</sup>。海山的形态参数可以区分不同形态特征的海山,而不同形态参数间的相关关系则可以揭示海山的演化模式<sup>[27]</sup>。因此,本研究对不同构造环境中海山的形态参数进行了统计学分析:利用未知方差  $t$  检验,对来自不同构造环境海山的形态参数均值是否相等进行了判断;通过线性回归方法,对海山不同形态参数间的相关关系进行了研究。本研究中选取  $P$  值  $< 0.05$  作为判断结果显著性水平的标准。

本研究采用频谱分析方法对海山的 DEM 数据进行多尺度分析(图 3)。对于每一组 DEM 数据,首先对原始数据进行去趋势处理,并在此基础上应用二维离散傅里叶变换(2DDFT)算法获取其二维功率谱<sup>[15]</sup>。通过计算二维频谱中每一振幅值所对应的径向频率,可以将二维功率谱进行降维,并得到功率谱振幅值  $A$  关于径向频率  $f$  变化的一维功率谱。一维功率谱的斜率绝对值  $\beta$  与地形数据的赫斯特指数  $H$  之间的关系:  $H = \beta / 2 - 1$ 。  $H$  是一个被广泛应用的多尺度参数,常被用来表征地表粗糙度

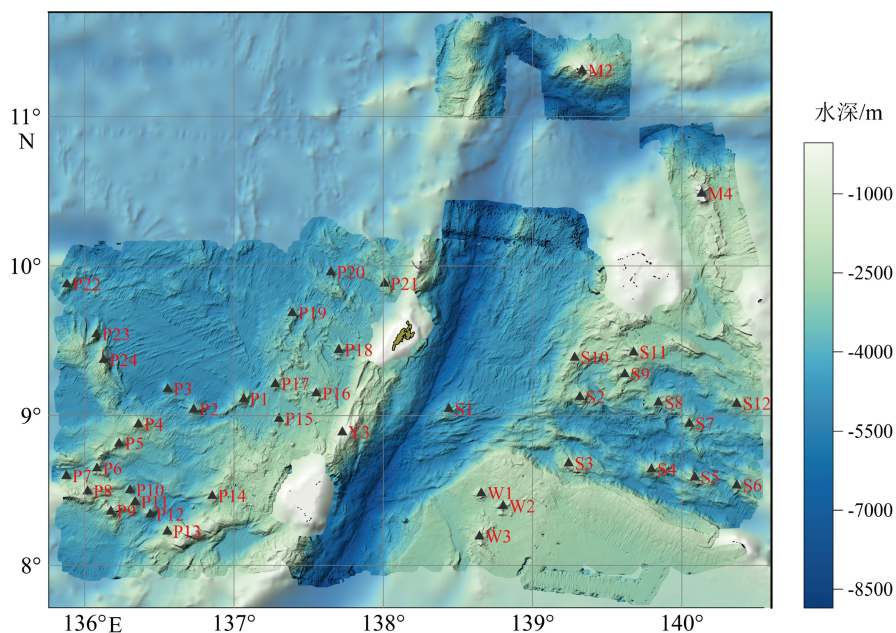


图 2 本研究中 42 座海山位置

Fig.2 Locations of 42 seamounts in this study

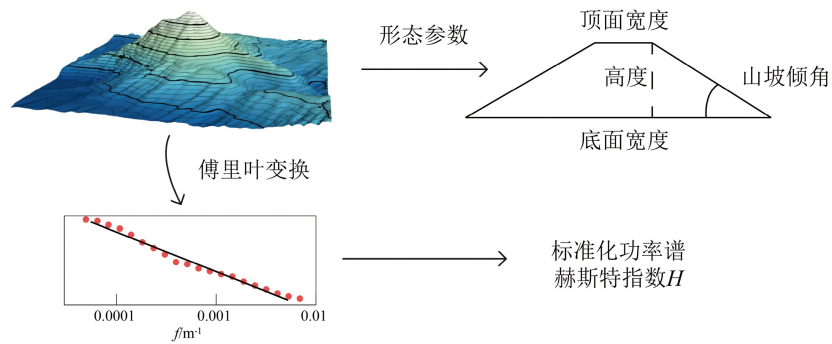


图 3 研究方法示意图

Fig.3 Schematic diagram of the methodology applied in this study

的大小,并反映了大、小尺度地形起伏间的相对强弱<sup>[16, 28-29]</sup>。对于自然界的真实地形数据而言,其一维功率谱形态往往符合指数衰减趋势,并体现出“红噪声”的特性,因此,需要在原始的一维功率谱中消除具有指数衰减趋势的背景功率谱,并得到标准化一维功率谱(即标准化功率谱)。Bomberger 等<sup>[18]</sup>指出,背景功率谱可以用原始一维功率谱的滑动平均值代替。在标准化功率谱中,可以通过显著性检验验证功率谱波动的非随机性。一般选取  $1.96\sigma$  ( $\sigma$  为标准化功率谱标准差) 作为显著性水平 95% 的界限,即有足够的把握认为超过该数值的功率谱波动并非随机扰动。功率谱非随机波动所对应的尺度范围是该 DEM 数据的“特征尺度”,而 DEM 数据中多个不同的特征尺度则反映了影响地形演化的物理过程的转变<sup>[18, 30]</sup>。

### 3 结果

#### 3.1 雅浦-卡罗琳海区海山的形态特征

本文对研究区域内 42 座海山的底面半径  $r_b$ , 顶面半径  $r_s$ , 高度  $h$ , 山坡倾角  $dip$  以及顶面水深进行了测量,并计算了其宽高比  $R$ , 平坦度  $f$ , 平均坡度  $slope$  和体积  $v$ , 结果如表 1 所示。海山的个体间形态参数差别较大,且在不同构造环境下形成的海山,形态参数的统计特征亦有明显差别。整体而言,研究区域内海山的平均高度为 1768 m, 顶面平均深度为 1969 m。其中以海沟附近的 M2、M4 和 Y3 三座海山的高度最大,顶面深度最浅。M2 的最浅处仅有 41 m, 而其高度则达到了 5187 m。高度最小的海山 W1 位于西卡罗琳海隆上, 仅有 761 m; 顶面最深的海山是位于索罗尔海槽内, 接近雅浦海沟的 S1, 深达 3304 m。42 座海山的平均体积为 289 km<sup>3</sup>, 体积最大的 M2 达到了 3641 km<sup>3</sup>, 而最小的 P7 仅有

29 km<sup>3</sup>。研究区域内海山的宽高比为  $0.21 \pm 0.06$ , 与 Smith<sup>[7]</sup> 统计的西太平洋海山宽高比为  $0.21 \pm 0.08$ , 以及宫士奇<sup>[26]</sup> 统计的雅浦海山区海山宽高比  $R = 0.19$  类似。研究区域内海山的平坦度为  $0.16 \pm 0.12$ , 略小于 Smith<sup>[7]</sup> 的统计结果  $0.31 \pm 0.18$ , 但不同构造环境中的海山, 平坦度差别十分显著, 如对于帕里西维拉海盆内的海山而言, 平坦度的均值为 0.07, 表现为尖顶海山的特征; 但西卡罗琳海隆上海山 W1—W3 的平坦度平均为 0.41, 表现出明显的平顶海山特征(图 4A, B, E)。

由于帕里西维拉海盆 ( $N_1 = 24$ ) 和索罗尔海槽 ( $N_2 = 12$ ) 中的海山样本量较大, 因此, 本研究对两区域中海山的宽高比、平坦度和平均坡度进行了对比, 并利用方差不等  $t$  检验的结果判断两组海山间的形态差异是否显著(图 5)。结果表明, 两者的宽高比 ( $P < 0.01$ )、平坦度 ( $P < 0.05$ ) 和平均坡度 ( $P < 0.01$ ) 均有显著的统计学差异。帕里西维拉海盆中的海山具有较大的宽高比和平均坡度(平均值分别为 0.25 和  $15^\circ$ ), 而位于索罗尔海槽的海山则具有较高的平坦度(平均值 0.17)。因此, 索罗尔海槽中的海山具有平顶海山的性质, 同时海山的坡度较缓(图 4C, D); 而帕里西维拉海盆中的海山则具有尖顶海山的性质, 且具有较陡的坡度(图 4A, B)。

#### 3.2 雅浦-卡罗琳海区海山的多尺度地形特征

本研究通过频谱方法分别获取了帕里西维拉海盆、索罗尔海槽、西卡罗琳海隆和海沟附近海山群的平均标准化功率谱(图 6), 并对不同地貌单元中海山多尺度特征的差异及其成因进行了分析和讨论。从标准化功率谱可以看出, 除帕里西维拉海盆内的海山只有小特征尺度信号更为显著之外, 其他区域的海山地貌均具有大、小两个显著的特征尺度信号。不同地貌单元内海山的小特征尺度范围大致类似, 为 400~4000 m。不同地貌单元的大特

表1 研究区域内海山的形态参数  
Table 1 Shape parameters of seamounts in the study area

| 海山编号 | 高度/km | 底面半径/km | 顶面半径/km | 体积/km <sup>3</sup> | 山坡倾角/(°) | 宽高比  | 平坦度  | 平均坡度/(°) |
|------|-------|---------|---------|--------------------|----------|------|------|----------|
| M2   | 5.2   | 25.3    | 1.2     | 3 642.0            | 13.2     | 0.20 | 0.05 | 12.13    |
| M4   | 2.6   | 12.3    | 3.8     | 583.6              | 24.5     | 0.21 | 0.31 | 17.24    |
| W1   | 0.8   | 5.7     | 3.2     | 48.2               | 19.1     | 0.13 | 0.56 | 16.80    |
| W2   | 0.9   | 4.9     | 2.0     | 34.4               | 18.2     | 0.18 | 0.41 | 17.16    |
| W3   | 1.3   | 7.1     | 1.8     | 89.1               | 10.2     | 0.18 | 0.25 | 13.73    |
| S1   | 2.3   | 14.9    | 2.3     | 627.8              | 11.8     | 0.15 | 0.15 | 10.25    |
| S2   | 2.2   | 9.2     | 1.8     | 240.2              | 15.7     | 0.24 | 0.19 | 16.31    |
| S3   | 1.7   | 12.8    | 2.1     | 349.8              | 8.5      | 0.13 | 0.16 | 9.14     |
| S4   | 2.4   | 10.4    | 1.1     | 298.8              | 15.9     | 0.23 | 0.11 | 14.44    |
| S5   | 1.9   | 10.0    | 3.6     | 298.2              | 19.2     | 0.19 | 0.36 | 16.75    |
| S6   | 1.6   | 7.6     | 0.8     | 106.2              | 9.3      | 0.20 | 0.10 | 12.81    |
| S7   | 2.0   | 11.3    | 1.2     | 298.5              | 11.8     | 0.18 | 0.10 | 11.20    |
| S8   | 1.6   | 12.2    | 5.1     | 402.3              | 11.1     | 0.13 | 0.42 | 12.90    |
| S9   | 1.2   | 12.1    | 2.2     | 215.8              | 10.2     | 0.10 | 0.18 | 6.69     |
| S10  | 2.0   | 11.7    | 2.1     | 344.7              | 9.2      | 0.17 | 0.18 | 11.78    |
| S11  | 1.2   | 10.0    | 1.4     | 144.3              | 6.0      | 0.12 | 0.14 | 7.96     |
| S12  | 1.5   | 11.0    | 2.4     | 233.2              | 6.7      | 0.13 | 0.22 | 9.67     |
| Y3   | 3.8   | 19.7    | 3.5     | 1851.8             | 9.2      | 0.19 | 0.18 | 13.03    |
| P1   | 2.3   | 8.4     | 0.4     | 182.3              | 15.5     | 0.28 | 0.04 | 16.21    |
| P2   | 1.8   | 8.3     | 0.4     | 138.7              | 18.3     | 0.22 | 0.05 | 13.06    |
| P3   | 2.2   | 6.5     | 0.3     | 103.4              | 18.9     | 0.35 | 0.05 | 20.01    |
| P4   | 1.9   | 8.7     | 1.5     | 179.3              | 12.2     | 0.22 | 0.18 | 14.70    |
| P5   | 1.7   | 6.7     | 0.3     | 83.7               | 18.2     | 0.26 | 0.04 | 15.08    |
| P6   | 2.5   | 7.9     | 2.6     | 234.8              | 15.2     | 0.32 | 0.33 | 25.37    |
| P7   | 1.4   | 4.2     | 0.3     | 28.6               | 20.6     | 0.34 | 0.07 | 20.39    |
| P8   | 1.1   | 3.9     | 0.6     | 20.7               | 19.0     | 0.28 | 0.15 | 18.49    |
| P9   | 1.7   | 8.5     | 2.9     | 191.9              | 13.2     | 0.20 | 0.34 | 17.31    |
| P10  | 1.5   | 4.2     | 0.2     | 29.0               | 20.0     | 0.35 | 0.04 | 19.92    |
| P11  | 1.5   | 5.3     | 0.3     | 46.6               | 17.8     | 0.29 | 0.05 | 16.67    |
| P12  | 1.5   | 5.9     | 1.3     | 67.4               | 16.9     | 0.25 | 0.22 | 17.67    |
| P13  | 1.5   | 4.6     | 0.2     | 36.0               | 17.8     | 0.32 | 0.05 | 18.94    |
| P14  | 1.5   | 8.7     | 1.0     | 128.8              | 9.8      | 0.17 | 0.11 | 10.61    |
| P15  | 1.0   | 5.0     | 0.6     | 29.6               | 13.3     | 0.21 | 0.11 | 13.15    |
| P16  | 1.2   | 5.6     | 0.4     | 43.8               | 13.0     | 0.22 | 0.08 | 13.65    |
| P17  | 1.0   | 6.9     | 0.9     | 57.3               | 10.2     | 0.15 | 0.12 | 9.56     |
| P18  | 1.2   | 7.3     | 1.2     | 78.7               | 13.9     | 0.16 | 0.16 | 10.99    |

续表 1

| 海山编号 | 高度/km | 底面半径/km | 顶面半径/km | 体积/km <sup>3</sup> | 山坡倾角/ (°) | 宽高比  | 平坦度  | 平均坡度/ (°) |
|------|-------|---------|---------|--------------------|-----------|------|------|-----------|
| P19  | 1.2   | 6.6     | 0.7     | 60.8               | 9.4       | 0.18 | 0.10 | 11.31     |
| P20  | 1.3   | 5.0     | 0.3     | 36.2               | 13.7      | 0.26 | 0.06 | 15.41     |
| P21  | 1.6   | 6.1     | 0.4     | 68.4               | 12.0      | 0.26 | 0.06 | 15.73     |
| P22  | 1.5   | 8.3     | 0.5     | 112.0              | 11.0      | 0.18 | 0.06 | 10.65     |
| P23  | 1.8   | 7.1     | 0.3     | 100.8              | 15.7      | 0.25 | 0.04 | 14.90     |
| P24  | 2.2   | 10.4    | 0.4     | 257.4              | 14.6      | 0.21 | 0.04 | 12.30     |

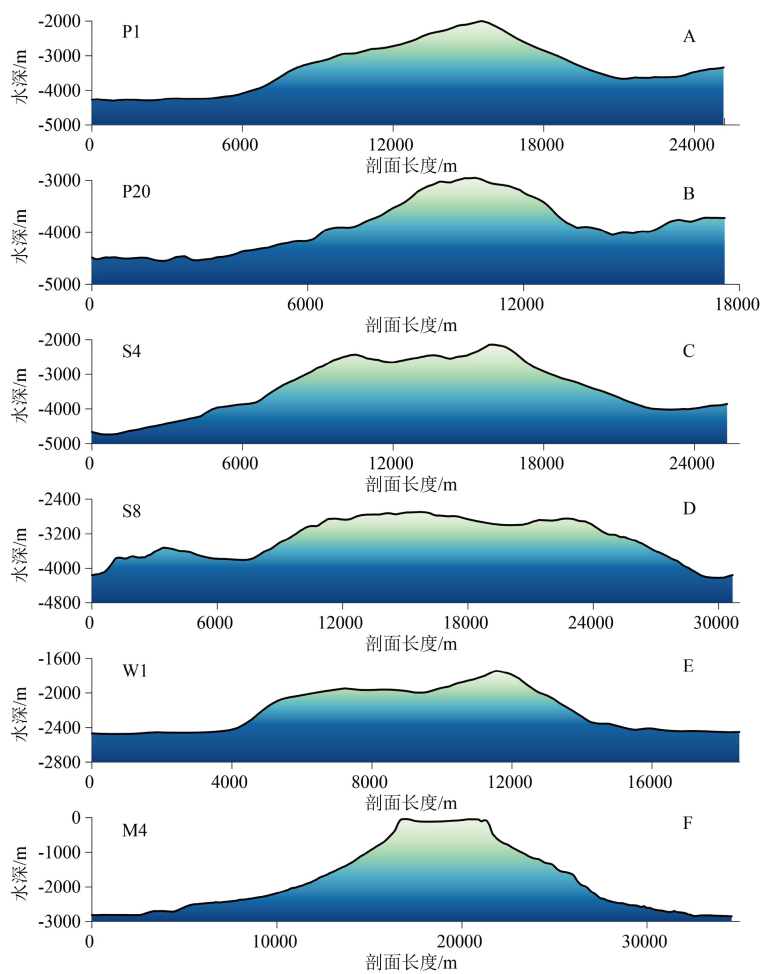


图 4 海山 P1, P20, S4, S8, W1 和 M4 的典型水深剖面图

Fig.4 Typical bathymetric profiles of Seamount P1, P20, S4, S8, W1 and M4

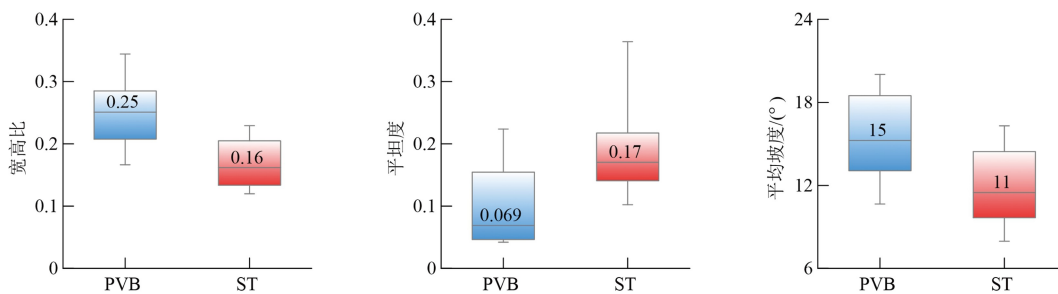


图 5 帕里西维拉海盆 (PVB) 及索罗尔海槽 (ST) 中海山宽高比、平坦度和平均坡度的箱线图

Fig.5 Box plots of R, f and slope of seamounts in the Parece Vela Basin (PVB) and the Sorol Trough (ST)

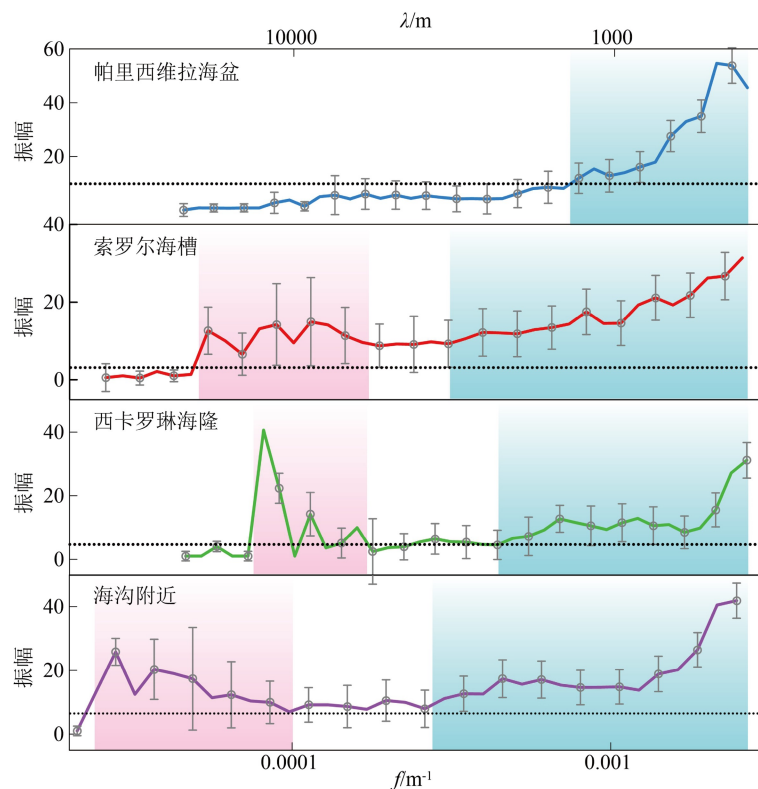


图6 不同构造环境下海山地形的标准化功率谱

灰色虚线表示显著性水平95%的区间,粉色和青色区域分别为大、小特征尺度。

Fig.6 Normalized power spectra of seamount landforms in different tectonic environments

Gray dotted lines represent for the significance level of 95%, pink and cyan blocks refer to large and small characteristic scales respectively.

征尺度范围不尽相同,其中,索罗尔海槽与西卡罗琳海隆的大特征尺度范围大约为6000~11000 m,而海沟附近海山的范围可达10000~14000 m。由于大特征尺度约为海山 $r_b$ 的2~3倍,显然大特征尺度表征了海山山峰的空间尺度大小。此外,前人研究表明地形数据小特征尺度的产生与小尺度的动力过程有关,如河谷系统的发育<sup>[31]</sup>,与冰川、海洋或生物作用有关的沉积-侵蚀过程<sup>[13-14, 32]</sup>,以及小尺度的构造活动<sup>[30]</sup>等。结合本研究数据(图4)和前人对海山环境中形成的小尺度地貌的报导,在400~4000 m的尺度范围内,既存在由重力流和滑坡作用造成的侵蚀地貌<sup>[8-9]</sup>,又有火山活动形成的诸如破火山口、次级火山锥和熔岩流等火山成因地貌<sup>[11-12]</sup>。因此,本研究中海山的小特征尺度是在火山过程与外源侵蚀过程的共同作用下形成的。

## 4 讨论

### 4.1 海山形态的演化过程

海山形态特征的演化同时受到内源的火山建

造作用与外源的侵蚀破坏作用影响<sup>[33]</sup>。由于海洋环境下侵蚀作用的强度相对较弱,影响范围有限<sup>[34-35]</sup>,海山的大尺度形态特征主要受到了火山建造作用的塑造。因此,前人常采用海山群的形态特征变化规律来分析区域内海山的演化模式<sup>[27, 36-37]</sup>。在火山建造的形态参数中,高度 $h$ 与底面半径 $r_b$ 往往具有线性关系,且不同构造环境下形成的火山建造具有不同的 $h-r_b$ 关系<sup>[7, 26, 37]</sup>。研究区域内海山的 $h-r_b$ 关系表明(图7c),位于西卡罗琳海隆、海沟附近以及帕里西维拉海盆的海山的 $h-r_b$ 具有较好的线性正相关关系,而位于索罗尔海槽中的海山的线性相关性则较差( $R^2 = 0.02$ )。帕里西维拉海盆和索罗尔海槽两区域内海山的宽高比也有显著差异(帕里西维拉海盆宽高比 $R = 0.25$ ,索罗尔海槽宽高比 $R = 0.16$ )。

Castruccio等<sup>[38]</sup>的数值模拟结果表明,地球内部岩浆系统的结构是火山形态特征的决定性因素,在地表观测到的火山底面宽度与高度的变化,揭示了深部岩浆系统的基本属性,尤其是岩浆房的大小与深度。同时,研究区域位于太平洋板块、菲律宾海板块和卡罗琳板块交汇处,复杂的构造环境同样会对海山的形成及演化过程产生影响。前人研究表



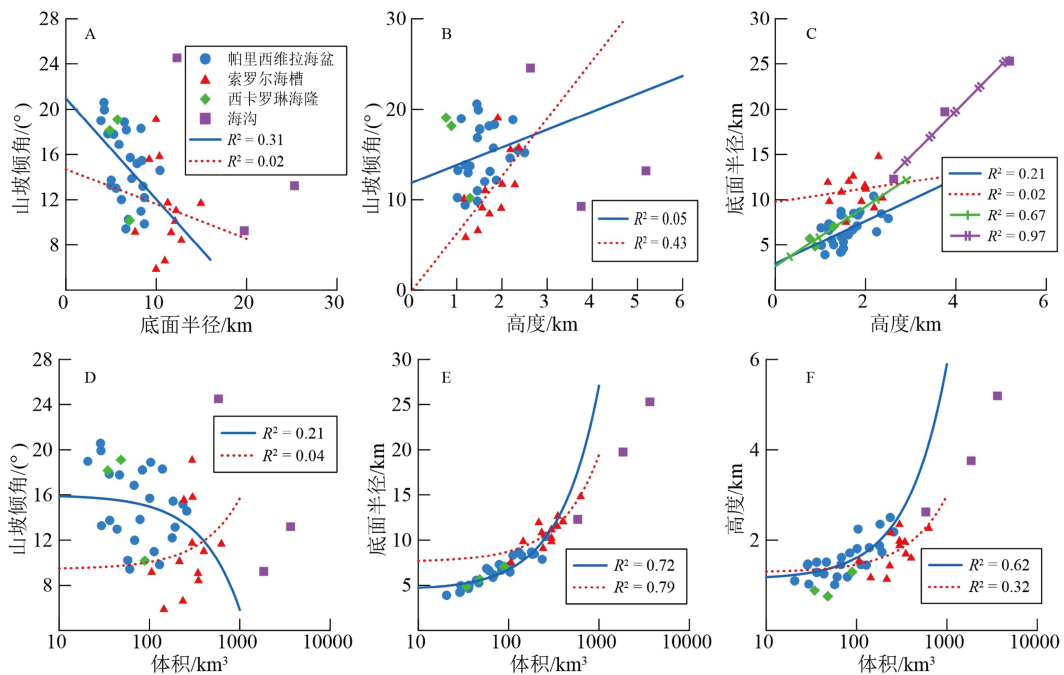


图 7 海山的形态参数关系

Fig.7 Relationships between morphologic parameters of seamounts

明, 索罗尔海槽形成于晚中新世, 表现出走滑-扩张的应力特征并导致了卡罗琳海脊的裂解<sup>[22]</sup>。对索罗尔海槽中岩石样品的地球化学分析表明, 海槽中岩石为形成于约  $7.0 \pm 1.0 \text{ Ma}$  的大洋中脊玄武岩<sup>[39]</sup>。索罗尔海槽的多道地震剖面显示, 海槽内的海山包含有大量碟状反射层, 且可见侵入体对原有沉积层的破坏现象<sup>[40]</sup>。由此可见, 在走滑-扩张的应力背景下, 岩浆的多期次喷发导致了索罗尔海槽内海山的形成。由于洋中脊岩浆黏度较低易于扩散, 该区域海山表现出了较大的底面宽度和较低的宽高比, 而多期次的岩浆喷发以及岩浆侵入体对原有地形的破坏, 则可能是索罗尔海槽内海山  $h-r_b$  相关性交叉的原因。

相较于索罗尔海槽, 帕里西维拉海盆内海山的成因尚不明确。本研究中所选海山主要位于海盆南部, 即索罗尔海槽轴线以南区域。该区域具有俯冲挤压的应力背景, 且与海盆北部地貌差异较大, 主要表现为海盆南部海山数量更多, 而缺失了海盆北部大量存在的北东向和北东-南西向断裂带<sup>[41]</sup>。据前人研究推测, 帕里西维拉海盆的扩张发生于约 30 Ma 前, 而卡罗琳海脊与雅浦俯冲带的碰撞导致了帕里西维拉海盆洋壳向雅浦海沟上的逆冲活动, 这使得在研究区域内, 原帕里西维拉海盆扩张中心西侧的海盆消失, 仅残留了东侧部分<sup>[41]</sup>。岩石学证据表明, 雅浦岛弧区域以亏损型岛弧玄武岩为主可能是弧后地幔作用所致, 且经历了一定的变质作

用<sup>[42]</sup>。由此可见, 帕里西维拉海盆中海山形成的应力背景、岩浆类型和构造机制均与索罗尔海槽内海山截然不同, 这导致了两组海山在宽高比和  $h-r_b$  关系上的显著差异。然而, 对帕里西维拉海盆内海山成因的深入研究, 仍需要更多地球物理及岩石学证据的进一步支撑。

前人研究表明, 火山的形态演化有 4 种不同模式: (1) 火山的高度与底面宽度同时成比例增大, 而坡度保持不变, 即  $r_b-v$  和  $h-v$  均为正相关, 而  $\text{dip}-v$  不相关; (2) 以顶部堆积为主, 火山的高度与坡度增大, 底面宽度保持不变, 即  $\text{dip}-h$  为正相关关系, 而  $\text{dip}-r_b$  不相关; (3) 以侧向堆积为主, 火山的底面宽度增大, 坡度变小, 高度保持不变, 即  $\text{dip}-r_b$  负相关, 而  $\text{dip}-h$  不相关; (4) 顶部堆积与侧向堆积过程交替发生<sup>[36, 43]</sup>。

研究区域内的海山主要分布于帕里西维拉海盆与索罗尔海槽中, 为分析它们的形态特征演化规律, 本研究首先对它们的  $\text{dip}-v$ 、 $r_b-v$  和  $h-v$  关系进行了线性回归(图 7D, E, F), 结果显示, 索罗尔海槽内海山的  $\text{dip}-v$  不具有明显的线性关系 ( $R^2 = 0.04$ ), 而尽管帕里西维拉海盆中海山的  $\text{dip}-v$  关系具有较弱的线性相关性 ( $R^2 = 0.21$ ), 但该线性关系  $P > 0.05$ , 不能排除该线性关系的随机性。此外, 两个地貌单元中海山的  $r_b-v$  和  $h-v$  关系有着较强的线性正相关性, 这说明帕里西维拉海盆与索罗尔海槽中海山的形态演化类似于模式(1), 即在火山活动活跃时期, 两地貌单元内的海山经历了多期次的间隔式喷发,

同时导致了海山顶部与侧翼火山碎屑或岩浆堆积体的发育<sup>[44]</sup>。然而,两个地貌单元内海山的演化过程也存在一定的差异(图 7A, B)。对位于帕里西维拉海盆的海山而言,其  $\text{dip}-r_b$  有一定的线性相关性( $R^2 = 0.31$ ),但其  $\text{dip}-h$  的线性相关性很差( $R^2 = 0.05$ ),即该地貌单元内海山的  $\text{dip}$  大小与  $r_b$  呈负相关,而与  $h$  不相关。这意味着帕里西维拉海盆内的海山演化过程有模式(3)的特征,其发育以侧向堆积过程为主。而位于索罗尔海槽的海山则具有  $\text{dip}-h$  间的线性相关性( $R^2 = 0.43$ ),  $\text{dip}-r_b$  没有线性相关关系( $R^2 = 0.02$ )。因此,索罗尔海槽的海山形态演化更倾向于模式(2),即火山建造的发育以顶部堆积为主,  $\text{dip}-h$  呈正相关,而与  $r_b$  不相关。由此可以看出,尽管帕里西维拉海盆与索罗尔海槽中的海山形态演化中均存在侧向与顶部的堆积增生过程,但前者以侧向堆积过程为主,而后者则以顶部堆积过程为主。

#### 4.2 小尺度地貌过程对海山地形的塑造作用

大、小特征尺度间功率谱振幅  $A$  的相对大小表征了对应的地貌过程对地形塑造作用的强弱<sup>[45]</sup>,因此可以通过地形数据的标准化功率谱图像研究小尺度地貌过程对海山地形的塑造能力。在图 6 中,帕里西维拉海盆中海山的大特征尺度不明显,而小特征尺度的振幅较大,可能有两个原因导致这个现象的产生:首先,由于帕里西维拉海盆中海山的样本量较大( $N_1 = 24$ ),且海山的形态参数离散型较大(图 6),海山的平均标准化功率谱中,大特征尺度对应的振幅因平均效应而被削弱了,因此,本研究仅将其结果与索罗尔海槽海山( $N_2 = 12$ )的平均标准化功率谱进行了比较。此外,这一现象揭示了相较于其他区域,该区域的海山地形受小尺度地貌过程的影响更为剧烈。帕里西维拉海盆中的海山群可能形成于 15~30 Ma 前的海盆扩张阶段及雅浦海沟形成时期,而索罗尔海槽内的海山则形成于 7~17 Ma 的卡罗琳海脊裂解事件中<sup>[49]</sup>。帕里西维拉海盆中的海山形成时间更早,经受小尺度侵蚀过程影响的时间更长。在海山形成之后,由于卡罗琳海脊的碰撞与雅浦俯冲带形成,帕里西维拉海盆的构造环境发生改变,形成了多组不同走向的断裂带<sup>[41]</sup>,因此该区域内海山的小尺度地形特征受到了多期次构造活动的影响。此外,帕里西维拉海盆中,海山表现出尖顶、坡度较陡的形态特征,相比于索罗尔海槽中坡度较缓的海山,该区域内海山形态更不稳定,易发生重力作用引起的滑坡、崩塌等小尺度地貌过程<sup>[45]</sup>。

赫斯特指数  $H$  常被用来表征地形数据的多尺度特性。 $H$  的取值介于  $[0, 1]$ ,  $H$  越大,大尺度的地形起伏越明显,地表更为光滑; $H$  越小,小尺度的地形起伏越剧烈,地表不规则性增大<sup>[16]</sup>。 $H$  的计算结果表明,相比于索罗尔海槽( $H_1 = 0.82 \pm 0.08$ ),帕里西维拉海盆的海山( $H_2 = 0.79 \pm 0.07$ )具有更精细的小尺度结构,即地形更为粗糙,这与标准化功率谱的结果一致。实际应用中, $H$  往往与其他表征地表粗糙度的参数具有相关性,如地形的标准差、坡度和不规则度等<sup>[46-47]</sup>。为了揭示  $H$  在研究区域内的地貌学意义,本研究计算了  $H$  与海山形态参数间的线性相关性。结果显示,对索罗尔海槽内的海山而言, $H$  与海山体积  $v$  具有一定的线性正相关性( $R^2 = 0.36, P < 0.05$ )(图 8A)。然而, $H-v$  之间的线性规律仅在索罗尔海槽的海山中存在,在帕里西维拉海盆中两者没有明显的线性关系( $R^2 = 0.01$ )。此外,由于地形数据功率谱的“红噪声”特性, $H$  的大小更易受到小尺度振幅变化的影响。因此, $H$  与  $v$  之间的线性相关性不能推知为因果性,海山体积的大小不是  $H$  大小的决定性因素。值得注意的是,索罗尔海槽中海山的体积与其所在位置有较强的相关性( $R^2 = 0.51$ )(图 8B)。海山在近东西走向的索罗尔海槽中随机分布,但海山的体积和海山所在位置的经度有着明显的线性负相关关系。近年来对热点岩浆作用形成的海山链的研究指出,此类海山链中海山的形态参数具有空间变化规律<sup>[10]</sup>。此外,海山链中海山体积的大小指示了热点活动强弱以及板块运动速度的变化<sup>[48-49]</sup>。在对卡罗琳海脊裂解过程的研究中,Altis<sup>[19]</sup>指出,卡罗琳海脊与雅浦海沟的碰撞导致在卡罗琳海脊处形成了拉张应力场,并引发了海沟处洋壳的破裂,最终形成索罗尔海槽。同时,地貌学证据<sup>[21]</sup>表明,索罗尔海槽由西北向东南逐渐变窄(图 1B)。由此可以推知,索罗尔海槽内海山是自西北向东南随卡罗琳海脊的不断裂解所形成的,西北侧的海山形成时间更早,受小尺度地貌过程改造的时间更久、强度更大,具有更为粗糙的地形。因而  $H$  与海山体积间的线性关系,极有可能反映了海山形成时间与海山地形粗糙度之间的变化关系。由于帕里西维拉海盆中海山的形成时间较早,且在形成后可能经历了新的构造及火山作用,因此,其  $H$  与海山形成时间之间的相关性较弱,在  $H-v$  图中未表现出明显的线性相关性。

索罗尔海槽中海山的赫斯特指数与海山体积具有线性相关性,可能反映了海山形成时间与海山地形粗糙度之间的变化关系。两个区域内海山地

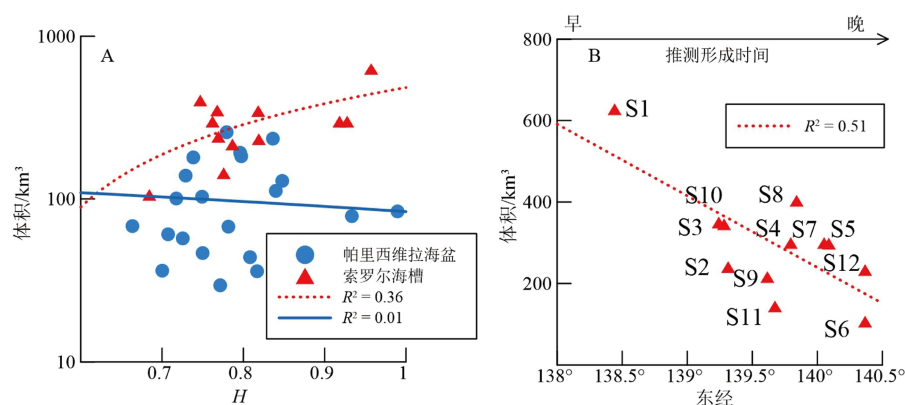


图 8 海山的赫斯特指数  $H$  与体积之间的关系 (A) 及索罗尔海槽内海山体积与所在位置经度的关系 (B)

Fig.8 (A) Relationship between Hurst exponents  $H$  and volumes of seamounts; (B) Relationship between longitudes and volumes of seamounts in the Sorol Trough

形多尺度特征差异产生的原因可能有: (1) 帕里西维拉海盆中的海山形成时间更早, 经受侵蚀过程影响的时间更长; (2) 在海山形成之后, 由于卡罗琳海脊的碰撞与雅浦俯冲带形成, 帕里西维拉海盆的构造环境发生改变, 造成该区域内海山的小尺度地形特征受到了多期次构造活动的影响; (3) 帕里西维拉海盆中海山的宽高比较大、平坦度较低的形态特征, 表明该区域内海山形态不稳定性高, 易发生重力作用引起的滑坡、崩塌等小尺度地貌过程。

## 5 结论

(1) 雅浦-卡罗琳海区内海山平均高度 1768 m, 平均体积  $289 \text{ km}^3$ , 宽高比为  $0.21 \pm 0.08$ 。不同构造环境下形成的海山群, 形态特征有着显著不同。相比于索罗尔海槽, 帕里西维拉海盆中的海山具有更大的宽高比与更小的平坦度。

(2) 两区域内海山形态亦具有不同的演化过程: 帕里西维拉海盆内海山的底面半径与山坡倾角线性相关, 指示该区域内海山的形态演化以侧向堆积过程为主; 索罗尔海槽中海山的高度与山坡倾角线性相关, 指示该区域内顶部堆积过程在海山形态演化中更为常见。

(3) 海山地形的多尺度分析结果显示, 研究区域内海山的大特征尺度 ( $6000 \sim 14000 \text{ m}$ ) 与海山的底面宽度大致吻合, 小特征尺度 ( $400 \sim 4000 \text{ m}$ ) 对应的地形起伏是在火山过程与外源侵蚀过程的共同作用下形成的。帕里西维拉海盆中的海山地形频谱分析结果缺失大特征尺度信号, 揭示了该区域内海山地形受小尺度地貌过程的影响更大。

(4) 索罗尔海槽中海山的赫斯特指数与海山体积具有线性相关性, 可能反映了海山形成时间与海

山地形粗糙度之间的变化关系, 即较早形成的海山受到了更多构造活动及小尺度地貌过程的影响, 进而形成了更加粗糙的表面特征。

**致谢:** 感谢中国科学院海洋研究所“科学”号科考船团队在出海工作及数据采集过程中给予本文作者的帮助和支持。

## 参考文献 (References)

- [1] Hess H H. Drowned ancient islands of the Pacific Basin [J]. *American Journal of Science*, 1946, 244 (11): 772-791.
- [2] Menard G. *Marine Geology of the Pacific* [M]. New York: McGraw-Hill, 1964.
- [3] IHO. Standardization of Undersea Feature Names: Guidelines Proposal form Terminology [M]. 4th ed. Monaco: International Hydrographic Organisation and Intergovernmental Oceanographic Commission, 2008.
- [4] Staudigel H, Clague D A. The geological history of deep-sea volcanoes: Biosphere, hydrosphere, and lithosphere interactions [J]. *Oceanography*, 2010, 23 (1): 58-71.
- [5] Kim S S, Wessel P. New global seamount census from altimetry-derived gravity data [J]. *Geophysical Journal International*, 2011, 186 (2): 615-631.
- [6] Batiza R, Vanko D. Volcanic development of small oceanic central volcanoes on the flanks of the East Pacific Rise inferred from narrow-beam echo-sounder surveys [J]. *Marine Geology*, 1983, 54 (1-2): 53-90.
- [7] Smith D K. Shape analysis of Pacific seamounts [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1988, 90 (4): 457-466.
- [8] Passaro S, Milano G, D'Isanto C, et al. DTM-based morphometry of the Palinuro seamount (Eastern Tyrrhenian Sea): Geomorphological and volcanological implications [J]. *Geomorphology*, 2010, 115 (1-2): 129-140.
- [9] Palomino D, Vázquez J T, Somoza L, et al. Geomorphological features

- in the southern Canary Island Volcanic Province: The importance of volcanic processes and massive slope instabilities associated with seamounts [J]. *Geomorphology*, 2016, 255: 125-139.
- [10] Bijesh C M, Kurian P J, Yatheesh V, et al. Morphotectonic characteristics, distribution and probable genesis of bathymetric highs off southwest coast of India [J]. *Geomorphology*, 2018, 315: 33-44.
- [11] Spatola D, Micallef A, Sulli A, et al. The Graham Bank (Sicily Channel, central Mediterranean Sea): Seafloor signatures of volcanic and tectonic controls [J]. *Geomorphology*, 2018, 318: 375-389.
- [12] Micallef A, Krastel S, Savini A. *Submarine Geomorphology*[M]. Cham: Springer, 2018.
- [13] Hubbard B, Siegert M J, Mccarroll D. Spectral roughness of glaciated bedrock geomorphic surfaces: Implications for glacier sliding [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2000, 105 (B9): 21295-21304.
- [14] Lyons A P, Fox W L J, Hasiotis T, et al. Characterization of the two-dimensional roughness of wave-rippled sea floors using digital photogrammetry [J]. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2002, 27(3): 515-524.
- [15] Perron J T, Kirchner J W, Dietrich W E. Spectral signatures of characteristic spatial scales and nonfractal structure in landscapes [J]. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 2008, 113 (F4).
- [16] Smith M W. Roughness in the Earth Sciences [J]. *Earth-Science Reviews*, 2014, 136: 202-225.
- [17] Shepard M K, Campbell B A. Radar scattering from a self-affine fractal surface: Near-nadir regime [J]. *Icarus*, 1999, 141 (1): 156-171.
- [18] Bomberger C, Bendick R, Flesch L, et al. Spatial scales in topography and strain rate magnitude in the western United States [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2018, 123 (7): 6086-6097.
- [19] Altis S. Origin and tectonic evolution of the Caroline Ridge and the Sorol Trough, western tropical Pacific, from admittance and a tectonic modeling analysis [J]. *Tectonophysics*, 1999, 313 (3): 271-292.
- [20] Lee S M. Deformation from the convergence of oceanic lithosphere into Yap trench and its implications for early-stage subduction [J]. *Journal of Geodynamics*, 2004, 37 (1): 83-102.
- [21] Weissel J K, Anderson R N. Is there a Caroline plate? [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1978, 41 (2): 143-158.
- [22] Dong D D, Zhang Z Y, Bai Y L, et al. Topographic and sedimentary features in the Yap subduction zone and their implications for the Caroline Ridge subduction [J]. *Tectonophysics*, 2018, 722: 410-421.
- [23] Hu D X, Wu L X, Cai W J, et al. Pacific western boundary currents and their roles in climate [J]. *Nature*, 2015, 522 (7556): 299-308.
- [24] Wang Q, Liu F, Zhang D C. *Pelagihabitans pacificus* gen. nov., sp. nov., a member of the family *Flavobacteriaceae* isolated from a deep-sea seamount [J]. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology*, 2020, 70 (8): 4569-4575.
- [25] Zhang Z Y, Dong D D, Sun W D, et al. Subduction erosion, crustal structure, and an evolutionary model of the northern yap subduction zone: new observations from the latest geophysical survey [J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2019, 20 (1): 166-182.
- [26] 宫士奇. 雅浦海山区海底地形及海山形态特征研究与分析[D]. 中国科学院研究生院(海洋研究所)硕士学位论文, 2016. [GONG Shiqi. Topographic and geomorphologic features and analysis of seafloor and seamounts in the Yap seamounts area[D]. Master Dissertation of University of Chinese Academy of Sciences (Institute of Oceanology), 2016.]
- [27] Magee C, Hunt-Stewart E, Jackson C A L. Volcano growth mechanisms and the role of sub-volcanic intrusions: Insights from 2D seismic reflection data [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2013, 373: 41-53.
- [28] Shepard M K, Campbell B A, Bulmer M H, et al. The roughness of natural terrain: A planetary and remote sensing perspective [J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2001, 106 (E12): 32777-32795.
- [29] Xu T B, Moore I D, Gallant J C. Fractals, fractal dimensions and landscapes-a review [J]. *Geomorphology*, 1993, 8 (4): 245-262.
- [30] Liucci L, Melelli L. The fractal properties of topography as controlled by the interactions of tectonic, lithological, and geomorphological processes [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2017, 42 (15): 2585-2598.
- [31] Black B A, Perron J T, Hemingway D, et al. Global drainage patterns and the origins of topographic relief on Earth, Mars, and Titan [J]. *Science*, 2017, 356 (6339): 727-731.
- [32] Leon J X, Roelfsema C M, Saunders M I, et al. Measuring coral reef terrain roughness using 'Structure-from-Motion' close-range photogrammetry [J]. *Geomorphology*, 2015, 242: 21-28.
- [33] Annen C, Lénat J F, Provost A. The long-term growth of volcanic edifices: numerical modelling of the role of dyke intrusion and lava-flow emplacement [J]. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 2001, 105 (4): 263-289.
- [34] Dobbs S C, Mchargue T, Malkowski M A, et al. Are submarine and subaerial drainages morphologically distinct? [J]. *Geology*, 2019, 47 (11): 1093-1097.
- [35] Smith M E, Finnegan N J, Mueller E R, et al. Durable terrestrial bedrock predicts submarine canyon formation [J]. *Geophysical Research Letters*, 2017, 44 (20): 10332-10340.
- [36] Sun Q J, Magee C, Jackson C A L, et al. How do deep-water volcanoes grow? [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2020, 542: 116320.
- [37] Smith D K. Comparison of the shapes and sizes of seafloor volcanoes on Earth and "pancake" domes on Venus [J]. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 1996, 73 (1-2): 47-64.
- [38] Castruccio A, Diez M, Gho R. The influence of plumbing system structure on volcano dimensions and topography [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2017, 122 (11): 8839-8859.
- [39] Beccaluva L, Serri G, Dostal J. Geochemistry of volcanic rocks from the mariana, yap and palau trenches bearing on the tectono-magmatic evolution of the mariana trench-arc-backarc system [J]. *Developments in Geotectonics*, 1986, 21: 481-508.
- [40] Zhang Z Y, Dong D D, Sun W D, et al. Investigation of an oceanic plateau formation and rifting initiation model implied by the Caroline Ridge on the Caroline Plate, western Pacific [J]. *International Geology Review*, 2020, 63 (2): 193-207.
- [41] Xia C L, Zheng Y P, Liu B H, et al. 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*, 2020, 55 (12): 7775-7789.
- [42] Crawford A J, Beccaluva L, Serri G, et al. Petrology, geochemistry and tectonic implications of volcanics dredged from the intersection of the Yap and Mariana trenches [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1986, 80 (3-4): 265-280.
- [43] Calves G, Schwab A M, Huuse M, et al. Seismic volcano stratigraphy of the western Indian rifted margin: The pre - deccan igneous province [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2011, 116 (B1): B01101.
- [44] Rossi M J. Morphology and mechanism of eruption of postglacial shield volcanoes in Iceland [J]. *Bulletin of Volcanology*, 1996, 57 (7): 530-540.
- [45] McGuire W J. Volcano instability: A review of contemporary themes [J]. *Geological Society, London, Special Publications*, 1996, 110 (1): 1-23.
- [46] Duvall M S, Hench J L, Rosman J H. Collapsing complexity: quantifying multiscale properties of reef topography [J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2019, 124 (7): 5021-5038.
- [47] Grohmann C H, Smith M J, Riccomini C. Multiscale analysis of topographic surface roughness in the midland valley, scotland [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2011, 49 (4): 1200-1213.
- [48] Crossingham T J, Vasconcelos P M, Cunningham T, et al. <sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar geochronology and volume estimates of the Tasmantid Seamounts: Support for a change in the motion of the Australian plate [J]. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 2017, 343: 95-108.
- [49] Knesel K M, Cohen B E, Vasconcelos P M, et al. Rapid change in drift of the Australian plate records collision with Ontong Java plateau [J]. *Nature*, 2008, 454 (7205): 754-757.