



## 西太平洋卡罗琳洋底高原俯冲系统的构造特征与钻探建议

董冬冬, 张正一, 范建柯, 李翠琳, 张广旭, 杨 柳

### Tectonic evolution and drilling proposal of the subduction system of the Caroline Ridge – An oceanic plateau in the Western Pacific

DONG Dongdong, ZHANG Zhengyi, FAN Jianke, LI Cuilin, ZHANG Guangxu, and YANG Liu

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16562/j.cnki.0256-1492.2022062905>

---

#### 您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

董冬冬, 张正一, 范建柯, 等. 西太平洋卡罗琳洋底高原俯冲系统的构造特征与钻探建议[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2022, 42(5): 178-186.  
DONG Dongdong, ZHANG Zhengyi, FAN Jianke, et al. Tectonic evolution and drilling proposal of the subduction system of the Caroline Ridge – An oceanic plateau in the Western Pacific[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2022, 42(5): 178-186.

# 西太平洋卡罗琳洋底高原俯冲系统的构造特征与钻探建议

董冬冬<sup>1,2,3</sup>, 张正一<sup>1,2,3</sup>, 范建柯<sup>1,2,3</sup>, 李翠琳<sup>1,2,3</sup>, 张广旭<sup>1,2,4</sup>, 杨柳<sup>1,5</sup>

1. 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
2. 中国科学院海洋大科学研究中心, 青岛 266071
3. 青岛海洋科学与技术试点国家实验室海洋地质过程与环境功能实验室, 青岛 266237
4. 青岛海洋科学与技术试点国家实验室海洋矿床资源评价与探测技术功能实验室, 青岛 266237
5. 中国科学院大学, 北京 100049

**摘要:** 洋底高原的形成与演化过程是近年来海洋地质学关注的重点科学问题之一。卡罗琳洋底高原位于西太平洋雅浦海域, 其构造演化独具特色, 经历了热点火山作用、俯冲碰撞和裂解等多个地质事件, 为洋底高原的研究提供了关键案例。目前对卡罗琳洋底高原演化过程的认识尚未完全明晰, 未来研究可聚焦 4 个方面: ①卡罗琳洋底高原北部正常洋壳年龄的厘定, 揭示卡罗琳板块-太平洋板块边界的位置与形态; ②结合钻井、地震地层学研究, 建立地层年代框架, 识别区域构造事件的发生时间与影响范围; ③揭示索罗尔海槽岩石圈的张裂阶段及新洋壳是否形成; ④阐明卡罗琳洋底高原俯冲前缘挠曲断裂带地壳的性质与年龄。近年来, 我国十分重视卡罗琳海域的地质和地球物理调查研究, 并有望开展大洋钻探计划。本文在前期工作的基础上提出了雅浦海域大洋钻探站位选取建议, 希望可以解决以上关键科学问题, 为全球洋底高原的形成演化研究贡献中国智慧。

**关键词:** 洋底高原; 板块边界; 大洋钻探; 地球物理; 索罗尔海槽; 雅浦海沟

中图分类号: P736 文献标识码: A DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2022062905

## Tectonic evolution and drilling proposal of the subduction system of the Caroline Ridge – An oceanic plateau in the Western Pacific

DONG Dongdong<sup>1,2,3</sup>, ZHANG Zhengyi<sup>1,2,3</sup>, FAN Jianke<sup>1,2,3</sup>, LI Cuilin<sup>1,2,3</sup>, ZHANG Guangxu<sup>1,2,4</sup>, YANG Liu<sup>1,5</sup>

1. Key Laboratory of Marine Geology and Environment, Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China
2. Center for Ocean Mega-Science, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China
3. Laboratory for Marine Geology, Pilot National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao 266237, China
4. Laboratory for Marine Mineral Resources, Pilot National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao 266237, China
5. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

**Abstract:** The formation and evolution of oceanic plateaus have been the focus of marine geology in recent years. The Caroline Plateau, also known as Caroline Ridge, near the Yap Trench in the western Pacific, is unique in tectonic evolution. It experienced from hotspot volcanism, subduction, collision, to rifting, and provided a key case for the study of oceanic plateaus. At present, the understanding of the evolutionary process of the Caroline Plateau is not completely clear. Future research shall focus on: (1) determining the age of the normal oceanic crust in the northern Caroline Plateau, and revealing the location and shape of the Caroline-Pacific plate boundary; (2) establishing stratigraphic time frame based on seismic stratigraphy in combination with drilling, and identifying the occurrence time and influence scope of regional events; (3) revealing the rifting stage and the possibility of oceanic crust formation in the Sorol Trough; (4) clarifying the nature and age of the crust in the bending-related fault zone in the incoming Caroline Plateau front. In recent years, geological and geophysical features of the Caroline plate

**资助项目:** 中国科学院战略性先导科技专项(B类)(XDB42000000); 青岛海洋科学与技术试点国家实验室山东省专项经费(2022QNLM05032); 国家自然科学基金项目“马里亚纳-雅浦俯冲带壳幔横波速度结构与方位各向异性研究”(41976052), “极慢速汇聚板块边缘雅浦俯冲带俯冲侵蚀动力学的数值模拟研究”(42106064), “索罗尔海槽的地壳结构、演化及对加罗林洋底高原裂解的构造指示”(41976051); 中国科学院海洋大科学研究中心重点部署项目(COMS2019Q10)

**作者简介:** 董冬冬(1982—), 男, 博士, 研究员, 主要从事海底构造与地球物理研究, E-mail: dongdongdong@qdio.ac.cn

**收稿日期:** 2022-06-29; **改回日期:** 2022-08-28. 周立君编辑

are highly focused in China, and it is expected to carry out an ocean drilling program. On the basis of previous works, we proposed ocean drilling sites in the Caroline sea.

**Key words:** oceanic plateau; plate boundary; ocean drilling; geophysics; Sorol Trough; Yap Trench

自 20 世纪 70 年代以来, 随着海底探测技术的不断发展, 科学家在海底发现了一些面积广大 ( $>10^5 \text{ km}^2$ ) 且洋壳巨厚 (20~30 km) 的区域<sup>[1-4]</sup>(图 1), 并将其称之为洋底高原 (oceanic plateau)。洋底高原最初起源于地幔柱上升过程中其头部对上覆大洋岩石圈的熔融作用<sup>[5]</sup>。地幔柱热效应会导致洋底高原岩石圈强度变弱, 在拉张应力作用下相对容易发生裂解<sup>[6]</sup>, 因此洋底高原的裂解是发生海底扩张的重要方式之一<sup>[7-8]</sup>。

卡罗琳 (Caroline, 又译加罗林或卡洛琳) 洋底高原位于卡罗琳板块北部, 翁通爪哇 (Ontong Java) 洋底高原以西, 也称为卡罗琳脊 (Caroline Ridge) (图 1—2), 普遍被认为形成于晚渐新世热点火山活动<sup>[9-10]</sup>。随着卡罗琳板块的运动, 卡罗琳洋底高原以 NWW 向与雅浦海沟发生碰撞, 正在发生极慢的板块汇聚作用<sup>[11]</sup>。卡罗琳洋底高原裂解过程导致索罗尔海槽 (Sorol Trough) (图 2) 在其中部位置发育, 海槽形成年代尚存有争议<sup>[12-14]</sup>, 但其发育规模较小, 完好保存了洋底高原早期的裂解形态。因此, 卡罗琳洋底高原经历了热点火山作用及碰撞、裂解和俯冲等多个地质事件, 其结构特征为研究洋底高原的构造演

化模式提供了难得的天然实验室。

目前, 学者们对于卡罗琳洋底高原的研究多局限于 20 世纪 60 年代末的深海钻探计划 (DSDP), 主要依托卡罗琳洋底高原北部获取的 4 个钻探井位, 以及 20 世纪 70—80 年代美国及日本在此区域开展的少量地球物理调查<sup>[12,15-16]</sup>。总体来看, 该区的地球物理调查较少且数据质量不高。近年来, 随着我国远洋探测能力的不断发展和对卡罗琳板块研究意义的认识不断提高, 加强了对卡罗琳海域的地质和地球物理调查研究。2015—2021 年, 中国科学院海洋研究所的“科学”号考察船对卡罗琳海域开展了 4 次综合地质与地球物理调查, 获得了大量的地球物理数据和岩石样品并开展了区域构造演化的相关研究<sup>[13,17]</sup>; 与此同时, 我国的蛟龙号载人潜水器也在雅浦海沟进行过数次下潜, 获得了大量的岩石样品<sup>[18-19]</sup>。这些工作说明我国越来越重视卡罗琳板块的地质与地球物理学研究, 并助推了相关研究成为前沿热点。本文调研了国内外的研究成果, 特别是近年来我国科学家的相关工作, 对卡罗琳洋底高原的构造演化特征进行了总结, 并提出该领域目前存在的一些关键科学问题, 希望未来能为大洋钻探

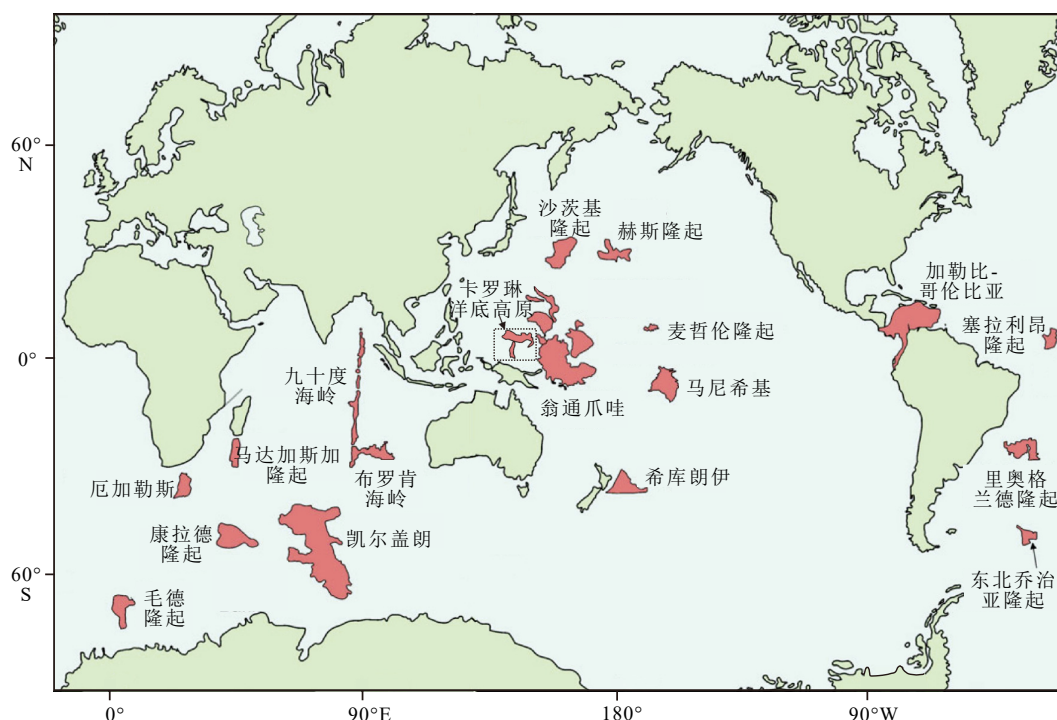


图 1 白垩纪以来主要洋底高原 (红色区域) 的分布<sup>[1]</sup>

Fig.1 Distribution of major oceanic plateaus since the Cretaceous (in red)<sup>[1]</sup>

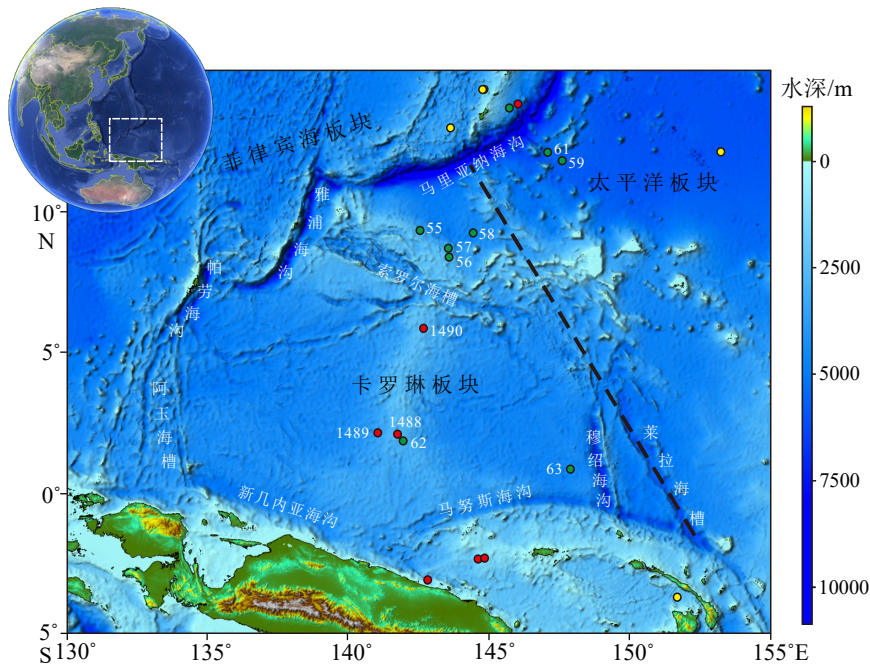


图2 卡罗琳洋底高原及周边构造单元图

位置见左上插图内白色虚线框。图中绿点、黄点和红点分别为 DSDP、ODP 和 IODP 井位, 数字为井位号; 黑色虚线为莱拉海槽 NW 向延长线。

Fig.2 Tectonic map of the Caroline Ridge and the surrounding area

Location is shown in the white square in the upper-left insert. DSDP, ODP, and IODP sites are marked with green, yellow, and red dots, respectively.

Black dashed line represents the NW extension of the Lyra Trough.

的站位选取提供思路。

## 1 卡罗琳洋底高原的形成

位于北卡罗琳洋底高原的 DSDP 57 站位在沉积物底部钻遇了玄武岩基底<sup>[20]</sup>, K-Ar 定年显示玄武岩的年龄为 23.5 Ma<sup>[21]</sup>, 进而推测洋底高原的形成年代是晚渐新世。研究发现, 北卡罗琳洋底高原东部发育明显的海山链<sup>[9, 22-23]</sup>, 火山岩向东有变年轻的趋势。地化和地震数据都证实了现今海山链的最东部存在地幔柱和相关的热点<sup>[24-25]</sup>。虽然热点活动目前位于卡罗琳板块东侧的太平洋板块之上, 但是该热点岩浆作用控制着晚渐新世卡罗琳洋底高原的形成过程<sup>[9-10]</sup>。“科学”号考察船对卡罗琳高原进行了基岩采样, 精细的年代学、岩石学、矿物学和地球化学研究证实卡罗琳洋底高原是一个中等尺度的洋底高原, 拉斑玄武岩形成于 15~24 Ma, 明显老于东部的海山链(1~12 Ma), 且两者很可能来自同一个源区<sup>[26]</sup>。热点形成卡罗琳洋底高原主体后, 随着卡罗琳板块的运动逐渐形成了东部的海山链, 这符合地幔柱假说的基本条件。但 Rehman 等<sup>[27]</sup>发现虽然海山链的年龄整体向东变年轻, 但也有很多相

距几百千米的火山具有相同的年龄, 认为卡罗琳海山链的形成不仅仅是热点作用导致的, 可能同时存在一条板块俯冲诱发形成的断裂带, 岩浆沿断裂带喷出, 从而在很远的距离外发现相同年龄的火山岩。因此, 目前对卡罗琳洋底高原演化过程的认识尚未完全明晰。

地球物理资料可以为洋底高原的形成提供更多区域性的证据。“科学”号考察船对雅浦海域开展了综合地质与地球物理调查, 获得了丰富的地震剖面, 进而开展了区域构造演化的相关研究<sup>[26]</sup>。横跨索罗尔海槽的地震剖面揭示卡罗琳洋底高原沉积层自上而下分别广泛发育两条强反射界面: R1 和 R2。R2 为沉积物的基底顶面反射(图 3), 其下部识别出清晰的壳内反射信号, 推测为洋底高原形成时期的水平层状玄武岩流。这些地球物理资料为洋底高原的形成过程提供了更多的细节。

## 2 卡罗琳洋底高原与雅浦海沟的俯冲碰撞

雅浦岛弧被认为是源自原始 Yap-IBM 俯冲系统<sup>[28]</sup>, 以变质岩为主, 但是沟弧间距异常短, 是一个

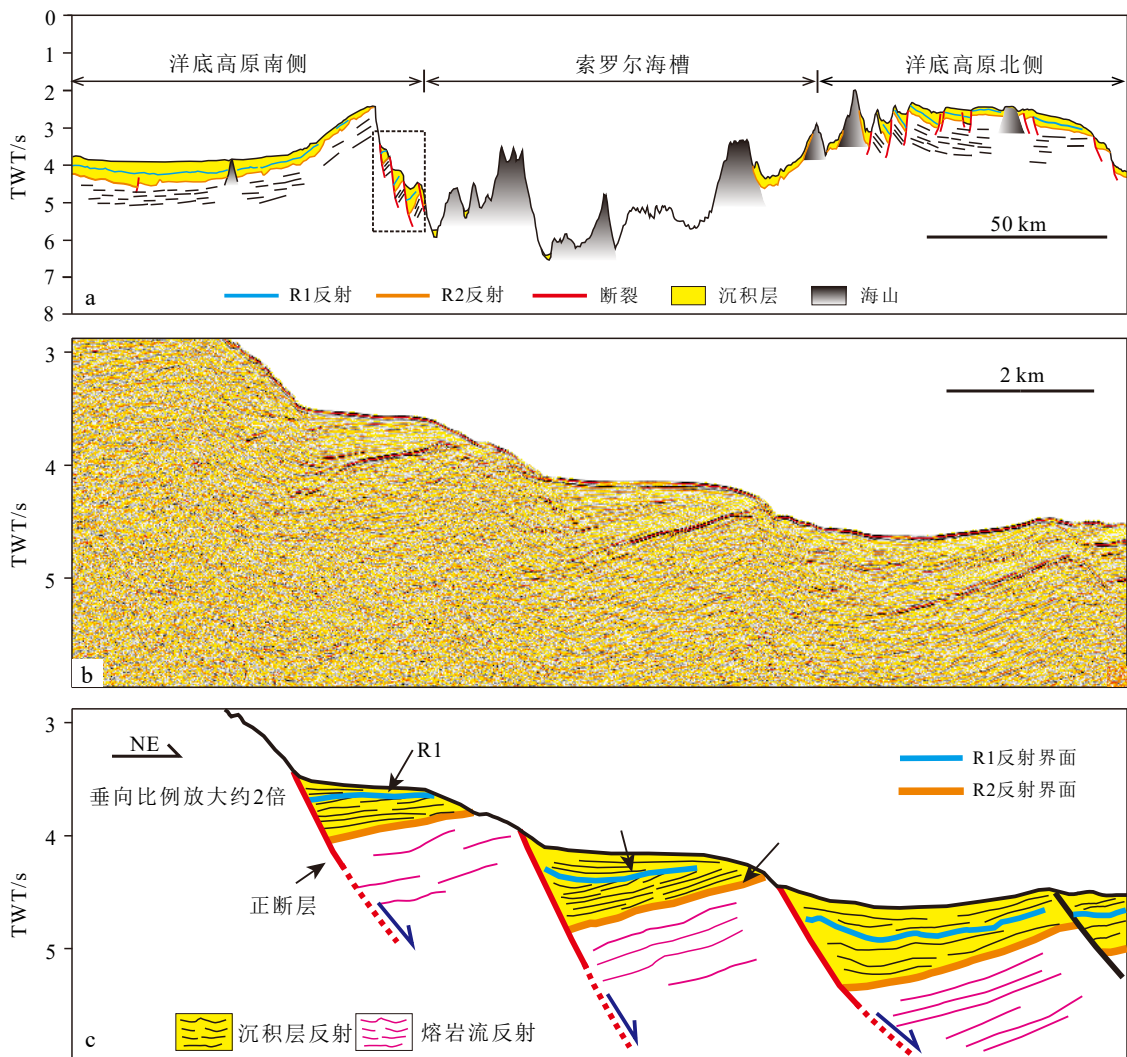


图 3 卡罗琳洋底高原地震剖面及解释图

a. 地震解释剖面, 位置见图 4 过 CS2-2 和 2-3 的地震剖面; b. 地震剖面细节图; c. 剖面细节解释图, 位置见图 3a 虚线框。

Fig.3 Seismic profile across the Caroline Ridge

a. Entire interpretation profile, crossing CS2-2 and CS2-3 in Fig.4; b. detailed profile; c. the corresponding interpretation, see dotted box in Fig.3a for the location.

罕见的受控于洋底高原俯冲碰撞过程的岛弧。McCabe 和 Uyeda<sup>[28]</sup> 提出卡罗琳洋底高原与雅浦海沟在早中新世发生碰撞; Fujiwara 等<sup>[29]</sup> 基于对雅浦岛弧岩浆岩停止时间和帕里西维拉海盆扩张方向转变时间的分析, 认为碰撞发生在 25 Ma。最新研究通过对雅浦岛弧变质基岩(角闪岩)的放射性定年、全岩主微量元素和 Sr-Nd-Pb-Hf 同位素分析, 认为卡罗琳高原与原始雅浦岛弧碰撞发生于 21 Ma, 受控于碰撞作用, 雅浦俯冲带的构造演化可分为 3 个演化序列: 早期板块俯冲形成古雅浦岛弧; 早中新世卡罗琳洋底高原-雅浦海沟碰撞导致俯冲活动停止, 中新世俯冲过程重新开始并伴随少量的岛弧岩浆活动<sup>[30]</sup>。

卡罗琳洋底高原与雅浦海沟的俯冲碰撞过程

导致复杂断裂系统的发育, 地震剖面研究表明, 洋底高原形成以来该区主要发育两组断裂: 近海沟的约 N30°E 向挠曲断裂以及洋底高原内约 N65°W 向的裂谷断裂(图 3)。先存的裂谷断裂形成于洋底高原张裂时期, 其发育导致卡罗琳洋底高原屈服强度的减弱, 而洋底高原北部发育的断裂比南部更加密集, 因此北部更容易在进入俯冲带时发育挠曲断裂作用, 最终形成了北宽南窄的挠曲断裂带<sup>[31]</sup>(图 4 中的地垒地堑断裂带)。虽然南北部的俯冲板块输入的地形地貌不同, 但是多波束数据和地震剖面显示雅浦海沟从北到南上覆板片均发生了强烈的俯冲侵蚀, 北部侵蚀过程主要由断裂带的俯冲导致, 南部侵蚀过程主要由海山俯冲导致<sup>[26]</sup>。此外, 在雅浦弧的向海沟一侧清晰识别出了晚期活动的大型滑

塌体<sup>[13]</sup>,推测可能与俯冲侵蚀作用有关。

### 3 卡罗琳洋底高原的裂解

卡罗琳洋底高原在中部发生裂解形成了索罗尔海槽,本身裂解为南北两部分,有研究认为这一过程尚未发育成熟的海底扩张中心<sup>[14,32]</sup>。Altis<sup>[14]</sup>认为太平洋板块沿马里亚纳海沟俯冲导致的板片拖曳力在洋底高原形成南北向的张应力,从而导致高原发生裂解;此外,地幔柱导致的热隆升效应同样可以使上覆岩石圈裂解<sup>[8]</sup>。因此远场张应力和地幔柱热效应都有可能对卡罗琳高原的裂解有贡献。

雅浦俯冲系统的南北两侧在地貌和地球物理特征上具有典型的差异<sup>[33-34]</sup>。震源机制解显示,以索罗尔海槽为界,俯冲带北部处于伸展状态,而南部处于挤压状态<sup>[35]</sup>。裂解的卡罗琳洋底高原俯冲是造成雅浦沟弧系统南北段差异明显的主要原因之一。Fan等<sup>[33]</sup>首次利用被动源OBS数据对雅浦俯冲带进行了地震层析成像和接收函数分析,结果表明俯冲的卡罗琳板块分别沿雅浦海沟南段和北段发生断裂和回转。在海沟南部,洋底高原-海沟的碰撞过程导致早期俯冲板片发生拉张断裂,而残余板片回弹在弧后形成低布格重力异常;而在海沟北部,菲律宾海板块和卡罗琳板块同时向NW方向快速运动,二者之间的汇聚速率很小,因此已俯冲

的卡罗琳板块受到地幔的强烈阻挡,造成俯冲板片在深部发生极性反转,在浅部的海沟处形成地垒地堑断裂带(图4),并且在弧后形成高布格重力异常<sup>[33]</sup>。

地震剖面揭示,卡罗琳洋底高原的上覆沉积物内部发育区域性强反射面R1,并在裂谷肩部区域与下伏地层呈明显的角度不整合接触<sup>[36]</sup>(图3),可追踪至海槽内最老的沉积地层内,分析认为该反射指示了洋底高原的张裂过程。根据地震地层学的方法估算卡罗琳洋底高原初始裂解发生于早—中中新世,远场应力与地幔柱热效应等多种因素共同控制了其张裂过程<sup>[36]</sup>。

### 4 有待解决的关键科学问题及大洋钻探建议

卡罗琳洋底高原俯冲系统是全球俯冲带研究领域独具特色的区域,研究起步较早,DSDP最早期的航次计划就将该海域作为钻探区域。1969年DSDP第6航次在该洋底高原北部的55—58四个站位开展了钻探(图2),但因为构造复杂等多种原因,后期一直未再开展新的大洋钻探计划,因此,目前在卡罗琳洋底高原的构造演化方面还存在很多问题尚未解决。本文在前期研究的基础上提出4个有待解决的关键科学问题,并结合海区已有的地震剖面资料提出大洋钻探井位的建议,希望能为

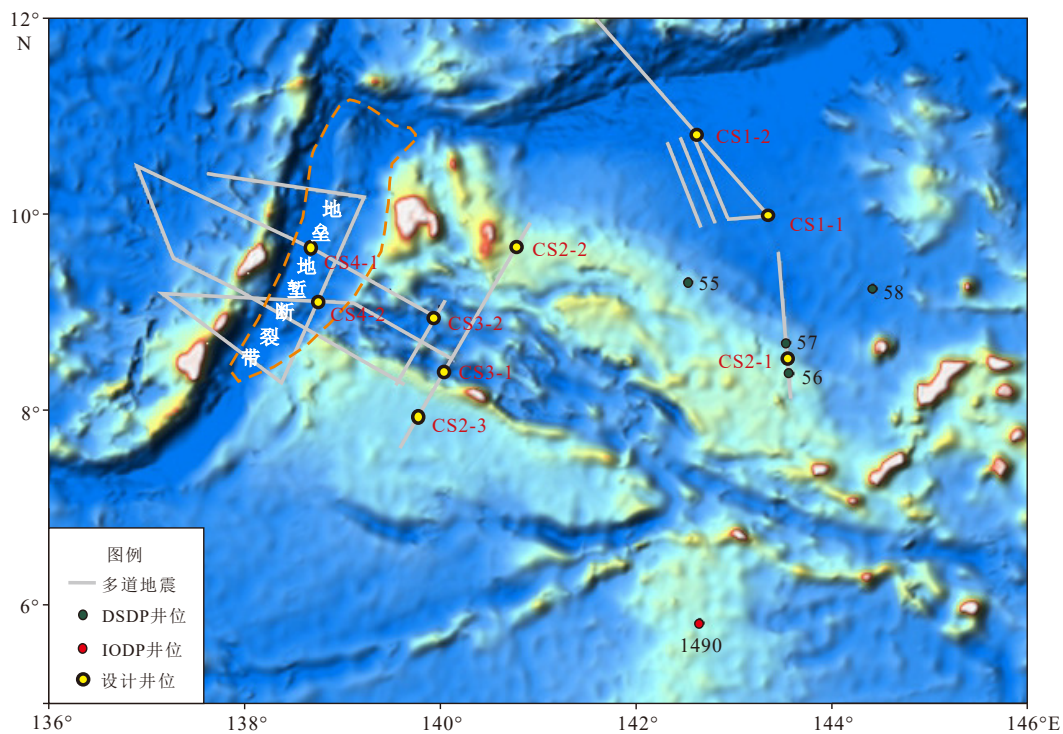


图4 大洋钻探建议站位图

Fig.4 Distribution of the proposed drilling sites

该区域未来的研究方向提供思路。表 1 列出了建议站点的主要信息, 井位的平面分布见图 4 所示, 图 5 展示了过建议井位的地震剖面图。

### 4.1 太平洋板块和卡罗琳板块的边界

太平洋板块和卡罗琳板块边界的确定是理解卡罗琳洋底高原的形成过程及成因机制的关键。

表 1 大洋钻探建议站点主要信息

Table 1 Specifications of the proposed drilling sites

站点号	纬度	经度	水深/m	钻探深度/m
CS1-1	9°59'14"N	143°20'51"E	4 725	400
CS1-2	10°49'28"N	142°36'02"E	5 175	200
CS2-1	8°39'45"N	143°32'00"E	3 190	450
CS2-2	9°41'58"N	140°47'25"E	1 970	400
CS2-3	7°50'13"N	139°42'12"E	2 920	400
CS3-1	8°22'53"N	140°01'13"E	4 225	100
CS3-2	8°55'37"N	139°56'22"E	4 565	150
CS4-1	9°42'05"N	138°36'11"E	7 060	150
CS4-2	9°04'30"N	138°46'46"E	4 690	200

按照板块边界的分类原则, 现今卡罗琳板块的边界普遍认为由帕劳海沟、雅浦海沟、索罗尔海槽、穆绍海沟(及其北向延伸)、马努斯海沟、新几内亚海沟和阿玉海槽构成<sup>[9, 16, 37-39]</sup>。但是, 卡罗琳板块形成于渐新世, 后期经历了卡罗琳洋底高原的形成与裂解、板内的挤压变形等过程, 真正地质学意义上渐新世卡罗琳板块的边界不等同于现今的边界。Hegarty 和 Weissel<sup>[9]</sup>认为渐新世时卡罗琳板块的东部边界对应于现在的莱拉海槽(Lyra Trough)和其 NNW 向延长线(图 6a 虚线), 莱拉海槽作为板块边界的证据包括磁异常和地震反射数据。同时, DSDP59 和 61 站位揭示的最老沉积物年龄是白垩纪, 而 55—58 站位的最老沉积物年龄仅为晚渐新世—中新世, 因此在 58 和 59 站位之间应该存在一条构造边界, 而这条边界最可能对应于莱拉海槽的 NNW 向延长线; 居里面深度在这条构造边界的两侧也存在很大的不同, 支持东西两侧分属太平洋板块和卡罗琳板块的观点(图 6a)。这种观点得到一定的认可(如 Lee<sup>[35]</sup>), 表明整个卡罗琳洋底高原均位于渐新世的卡罗琳板块之上, 其形成演化是板内热点火山作用与变形过程的结果。

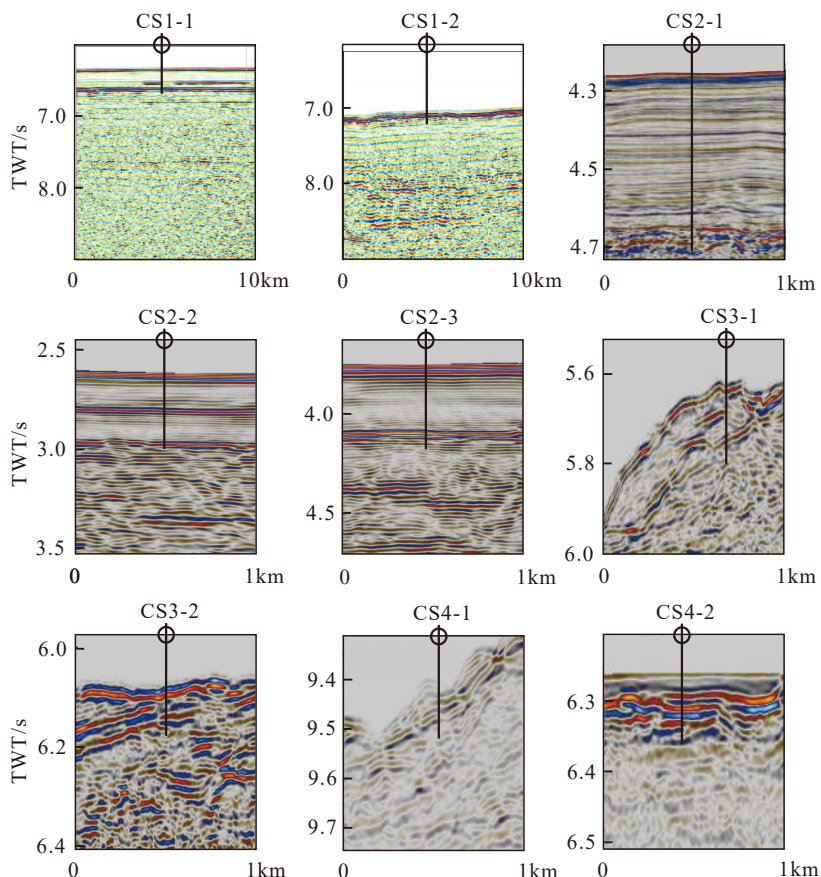


图 5 大洋钻探建议站点地震剖面图

Fig.5 Seismic profiles across the proposed drilling sites

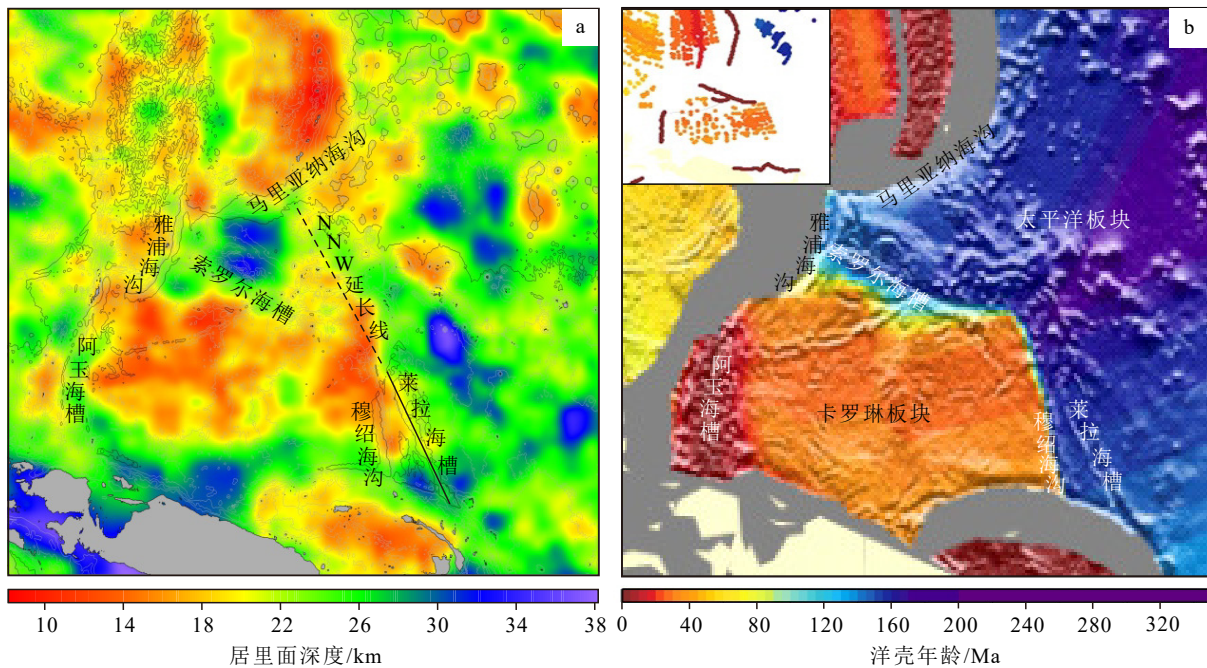


图6 卡罗琳板块的居里面深度及洋壳年龄分布图

a. 居里面深度图(据文献[40]修改),等值线为水深线; b. 洋壳年龄分布图(据文献[41]修改),左上插图为磁异常条带的拾取年龄数据,作为洋壳年龄的约束。

Fig.6 The Curie depth and oceanic crust age of the Caroline plate

a. The Curie depth map (revised from reference [40]) and water depths in contours; b. Age of the oceanic crust (revised from reference[41]) in the constraint of magnetic lineation shown in the upper-left insert.

但是,基于磁异常识别和板块重建工作编制的最新洋壳年龄数据显示,卡罗琳洋底高原之下的洋壳年龄老于 60 Ma,属于太平洋板块的一部分,暗示卡罗琳板块的北部边界位于洋底高原的南部(图 6b,据文献[41])。莱拉海槽和穆绍海沟之间的洋壳年龄大于 140 Ma,也属于太平洋板块,因此穆绍海沟是卡罗琳板块的东部边界,而非莱拉海槽,不同于 Hegarty 和 Weissel<sup>[9]</sup> 等的板块边界划分。值得注意的是,Seton 等<sup>[41]</sup> 的洋壳年龄数据在卡罗琳洋底高原北部是缺少磁异常条带约束的(图 6b)。因此,卡罗琳洋底高原北部正常洋壳年龄的厘定是揭示卡罗琳板块和太平洋板块边界的重要依据,该项工作可以为全球板块重建提供关键的地球物理约束,具有重要的全球意义。

建议在卡罗琳洋底高原北侧开展两个井位的钻探: CS1-1 和 CS1-2(图 4—5),重点关注基底洋壳的性质和年龄。

#### 4.2 卡罗琳洋底高原的地层年代框架

卡罗琳洋底高原经历了热点作用、俯冲碰撞和拉张裂解等多期重要的区域构造事件,查明构造事件的发生时代对于深入了解区域构造演化特征具

有重要意义。区域重要的构造事件往往在地震剖面上有清晰的显示,基于此,结合钻井的地震地层学研究可以确定地震反射界面的年代,建立地层年代框架,从而识别区域构造事件的发生时间与影响范围。卡罗琳洋底高原现有的 DSDP 钻井很少,并且年代学工作非常薄弱。其中,只有 57 站位钻遇到了基底玄武岩, K-Ar 测年年龄为 23.5 Ma。基底玄武岩和上覆沉积物之间是沉积接触关系,未发生接触变质作用,说明玄武岩是以熔岩流的形式形成的,但是冷凝壳的缺失又使得这一解释不是很合理。因此卡罗琳洋底高原形成年代和机制仍然需要大量的岩心测试工作加以敲定。此外,浅部的取样只有零星几个岩心段做了古生物定年,精度和连续性比较差,无法形成连续的年龄剖面,导致区域地层年代框架至今没有很好的建立。前期工作揭示,地震剖面上识别的 R1 不整合面很可能对应卡罗琳洋底高原的裂解事件<sup>[13,36]</sup>,但是没有钻井年龄的约束,无法确定该事件的发生时代。

建议在卡罗琳洋底高原的南北两侧设置 3 个井位以开展钻探及年代学工作: CS2-1, CS2-2 和 CS2-3(图 4—5)。其中 CS2-1 位于 DSDP56 和 57 井位的中间, CS2-2 和 CS2-3 分别位于洋底高原北侧和南



侧, 3 个井位可通过地震剖面开展地震地层的对比研究。

### 4.3 索罗尔海槽是否出现新的洋壳

卡罗琳洋底高原的裂解形成了索罗尔海槽, 但是其下的岩石圈是否已经被拉开形成新的洋壳, 是否如同翁通爪哇洋底高原一样发生了裂离, 这个问题由于缺乏足够的岩石地化证据仍然未能解决。Weissel 和 Anderson<sup>[16]</sup> 发现目前海槽仍存在少量地震活动, 推测海槽仍在扩张; Altis<sup>[14]</sup> 认为索罗尔海槽的裂陷持续时间约为 10 Ma (17~7 Ma), 时间很短还不足以发育成熟的扩张中心; 依据地震剖面和重力数据开展的重-震联合解释发现, 索罗尔海槽下方的地壳厚度平均约为 6 km, 接近正常洋壳的厚度<sup>[31]</sup>; Fornari 等<sup>[32]</sup> 通过分析索罗尔海槽岩石样品的高度变质特征, 证明剪切应力导致索罗尔海槽发生地壳增生 (crustal accretion) 过程, 但是该过程并没有产生典型的扩张中心。因此, 索罗尔海槽是否出现了新的洋壳还需要钻探的证实。该问题的解决可以为洋底高原裂解产生的初始洋壳或过渡性地壳性质的分析提供难得的样品, 有望取得创新性成果。

建议在索罗尔海槽开展 2 个站位的钻探: CS3-1 和 CS3-2, 分别位于海槽的南部边缘和中部 (图 4—5), 有望分别获得最老和最年轻的火山岩, 以便限定索罗尔海槽的年龄和地壳性质。

### 4.4 挠曲断裂带的地壳年龄和性质

卡罗琳洋底高原俯冲前缘地壳性质的厘定对于认识洋底高原初始俯冲模式具有重要的意义。中新世以来, 卡罗琳洋底高原的俯冲活动重新进行, 俯冲板片前缘发生明显的地势降低现象, 形成挠曲断裂带。该断裂带对向发育一系列断裂, 大致形成地垒和地堑相间分布的构造样式, 因此学者也称其为地垒地堑断裂带 (horst and graben)<sup>[29]</sup>。目前, 断裂带的性质主要有两种解释: ①布格重力异常与地壳厚度反演结果表明挠曲断裂带具有与正常洋壳相似的较薄的地壳厚度<sup>[26, 29, 34-35]</sup>, 可能指示了洋底高原前缘保留了雅浦俯冲系统晚渐新世之前的俯冲洋壳结构; ②多道地震剖面揭示, 卡罗琳洋底高原内部同样发育平行于雅浦海沟走向的断裂, 挠曲断裂带内发育滑塌体结构与卡罗琳洋底高原沉积物的厚度、地震反射结构相似<sup>[36]</sup>, 这指示了挠曲断裂带形成于卡罗琳洋底高原前缘的挠曲减薄过程。总之, 卡罗琳洋底高原俯冲前缘地壳的性质存在一定的争议, 该问题的解决需要对挠曲断裂带开展岩心钻探与年代学分析。

建议在俯冲前缘的断裂带开展 2 个井位的钻探: CS4-1 和 CS4-2 (图 4—5)。从地形地貌来看, CS4-1 站位更接近正常洋壳, 而 CS4-2 站位似乎具有高原裂解的特征, 从而阐明挠曲断裂带的地壳年龄和性质。

## 5 结论

西太平洋卡罗琳洋底高原的构造位置极其特殊, 经历了热点火山作用、碰撞、裂解和俯冲等多个地质事件, 在研究地幔柱及板块相互作用领域具有得天独厚的优势。目前该区存在几个关键科学问题需要大洋钻探的支持, 研究方向可聚焦在以下 4 个方面:

- (1) 揭示卡罗琳洋底高原北部正常洋壳年龄, 分析卡罗琳板块-太平洋板块边界的位置与形态;
- (2) 建立卡罗琳洋底高原的地层年代框架, 揭示区域构造事件的发生时间与影响范围;
- (3) 分析卡罗琳洋底高原岩石圈的张裂阶段及是否存在新洋壳的形成;
- (4) 阐明卡罗琳洋底高原俯冲前缘地壳的性质与年龄。

**致谢:** 本研究所用数据由“科学”号考察船采集, 感谢执行 2015—2021 年度雅浦海域综合地球物理航次的全体船员及科学家, 感谢中国科学院南海海洋研究所徐敏研究员提供部分地震剖面。

## 参考文献 (References)

- [1] Kerr A C, Mahoney J J. Oceanic plateaus: Problematic plumes, potential paradigms [J]. *Chemical Geology*, 2007, 241 (3-4): 332-353.
- [2] Kronke L W. Origin of continents through development and coalescence of oceanic flood basalt plateaus [J]. *Eos, Transactions of the American Geophysical Union*, 1974, 55: 443.
- [3] Arndt N, Weis D. Oceanic plateaus as windows to the earth's interior: An ODP success story [J]. *JOIDES Journal*, 2002, 28 (1): 79-84.
- [4] Saunders A D, Tarney J, Kerr A C, et al. The formation and fate of large oceanic igneous provinces [J]. *Lithos*, 1996, 37 (2-3): 81-95.
- [5] Ryberg T, Haberland C, Haberau T, et al. Crustal structure of northwest Namibia: Evidence for plume-rift-continent interaction [J]. *Geology*, 2015, 43 (8): 739-742.
- [6] Barckhausen U, Ranero C R, Cande S C, et al. Birth of an intraoceanic spreading center [J]. *Geology*, 2008, 36 (10): 767-770.
- [7] Taylor B. The single largest oceanic plateau: Ontong Java-Manihiki-Hikurangi [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2006, 241 (3-4): 372-380.
- [8] Campbell I H. Testing the plume theory [J]. *Chemical Geology*, 2007,

- 241 (3-4): 153-176.
- [9] Hegarty K A, Weissel J K. Complexities in the development of the Caroline Plate region, Western Equatorial Pacific [M]//Nairn A E M, Stehli F G, Uyeda S. The Ocean Basins and Margins. New York: Springer, 1988: 277-301.
- [10] Gaina C, Müller D. Cenozoic tectonic and depth/age evolution of the Indonesian gateway and associated back-arc basins [J]. *Earth-Science Reviews*, 2007, 83 (3-4): 177-203.
- [11] Seno T, Stein S, Gripp A E. A model for the motion of the Philippine Sea Plate consistent with NUVEL - 1 and geological data [J]. *Journal of Geophysical Research:Solid Earth*, 1993, 98 (B10): 17941-17948.
- [12] Bracey D R, Andrews J E. Western Caroline Ridge: Relic island arc? [J]. *Marine Geophysical Researches*, 1974, 2 (2): 111-125.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] Nagihara S, Kinoshita M, Fujimoto H, et al. Geophysical observations around the northern Yap Trench: seismicity, gravity and heat flow [J]. *Tectonophysics*, 1989, 163 (1-2): 93-104.
- [16] WeisselJK, Anderson R N. Is there a Caroline plate? [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1978, 41 (2): 143-158.
- [17] Zhang G L, Zhang J, Wang S, et al. Geochemical and chronological constraints on the mantle plume origin of the Caroline Plateau [J]. *Chemical Geology*, 2020, 540: 119566.
- [18] Chen L, Tang L M, Li X H, et al. Geochemistry of peridotites from the Yap Trench, Western Pacific: implications for subduction zone mantle evolution [J]. *International Geology Review*, 2019, 61 (9): 1037-1051.
- [19] Yang A, Fu Y T. Estimates of effective elastic thickness at subduction zones [J]. *Journal of Geodynamics*, 2018, 117: 75-87.
- [20] Heezen B C, FischerA G, BoyceRE, et al. Initial reports of the Deep Sea Drilling Project [J]. Washington, DC:US Government Printing Office, 1971, 6: 389-537.
- [21] Ridley W I, Rhodes J M, Reid A M, et al. Basalts from leg 6 of the deep-sea drilling project [J]. *Journal of Petrology*, 1974, 15 (1): 140-159.
- [22] Keating B H, Matthey D P, Helsley C E, et al. Evidence for a hot spot origin of the Caroline Islands [J]. *Journal of Geophysical Research:Solid Earth*, 1984, 89 (B12): 9937-9948.
- [23] LarsonR L, Schlanger S O. Geological evolution of the Nauru Basin, and regionalimplications[R]. Initial Reports ofthe Deep Sea Drilling Project, Washington, D. C. : U. S. Government Printing Office, 1981, 61: 841-862.
- [24] Courtillot V, Davaille A, Besse J, et al. Three distinct types of hotspots in the Earth's mantle [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2003, 205 (3-4): 295-308.
- [25] French S W, Romanowicz B. Broad plumes rooted at the base of the Earth's mantle beneath major hotspots [J]. *Nature*, 2015, 525 (7567): 95-99.
- [26] 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.
- [27] Rehman H U, Nakaya H, Kawai K. Geological origin of the volcanic islands of the caroline group in the federated states of Micronesia, Western Pacific [J]. *South Pacific Studies*, 2013, 33 (2): 101-118.
- [28] McCabe R, Uyeda S. Hypothetical model for the bending of the Mariana Arc [M]//Hayes D E. The Tectonic and Geologic Evolution of Southeast Asian Seas and Islands: Part 2. Washington, DC: American Geophysical Union, 1983, 27: 281-293.
- [29] Fujiwara T, Tamura C, Nishizawa A, et al. Morphology and tectonics of the Yap Trench [J]. *Marine Geophysical Researches*, 2000, 21 (1-2): 69-86.
- [30] Zhang J, Zhang G L. Geochemical and chronological evidence for collision of proto-Yap arc/Caroline plateau and rejuvenated plate subduction at Yap trench [J]. *Lithos*, 2020, 370-371: 105616.
- [31] Zhang Z Y, Dong D D, Sun W D, et al. The Caroline Ridge fault system and implications for the bending-related faulting of incoming oceanic plateaus [J]. *Gondwana Research*, 2021, 92: 133-148.
- [32] Fornari D J, Weissel J K, Perfit M R, et al. Petrochemistry of the Sorol and Ayu Troughs: implications for crustal accretion at the northern and western boundaries of the Caroline plate [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1979, 45 (1): 1-15.
- [33] Fan J K, Zheng H, Zhao D P, et al. Seismic structure of the caroline Plateau - Yap trench collision zone [J]. *Geophysical Research Letters*, 2022, 49 (6): e2022GL098017.
- [34] 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.
- [35] 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.
- [36] 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*, 2021, 63 (2): 193-207.
- [37] 董冬冬, 张广旭, 钱进, 等. 西太平洋雅浦俯冲带的地貌及地层结构特征 [J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2017, 37 (1): 23-29. [DONG Dongdong, ZHANG Guangxu, QIAN Jin, et al. Geomorphology and stratigraphic framework of the Yap subduction zone, western Pacific [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2017, 37 (1): 23-29.]
- [38] 李春峰, 李刚, 厉子龙, 等. 卡罗琳海板块实验: 初始俯冲、初始扩张与流固耦合 [J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2019, 39 (5): 87-97. [LI Chunfeng, LI Gang, LI Zilong, et al. Study of the Caroline plate: Initial subduction, initial spreading and fluid-solid interaction [J]. *Marine Geology and Quaternary Geology*, 2019, 39 (5): 87-97.]
- [39] 栾振东, 董冬冬. 西太平洋典型海域地球物理调查图集 [M]. 北京: 科学出版社, 2019: 1-124. [LUAN Zhendong, DONG Dongdong. Geophysical Atlas of the Typical Regions in Western Pacific [M]. Beijing: Science Press, 2019: 1-124.]
- [40] Li C F, Lu Y, Wang J. A global reference model of Curie-point depths based on EMAG2 [J]. *Scientific Reports*, 2017, 7 (1): 45129.
- [41] Seton M, Müller R D, Zahirovic S, et al. A global data set of present - day oceanic crustal age and seafloor spreading parameters [J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2020, 21 (10): e2020GC009214.