



菲律宾海板块东南边界地质过程与研究展望

鄢全树, 袁 龙, 闫施帅, 刘振轩, 吴 增, 石学法

Geological evolution and research prospect in southeast boundary of Philippine Sea Plate

YAN Quanshu, YUAN Long, YAN Shishuai, LIU Zhenxuan, WU Zeng, and SHI Xuefa

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16562/j.cnki.0256-1492.2023040701>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

卡罗琳海板块实验：初始俯冲、初始扩张与流固耦合

Study of the Caroline plate: Initial subduction, initial spreading and fluid–solid interaction

海洋地质与第四纪地质. 2019, 39(5): 87

西太平洋雅浦–卡罗琳海区海山多尺度地形特征

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

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(1): 125

板块俯冲变形过程二维离散元模拟—对东海陆架盆地成因启示

Two-dimensional discrete element simulation of plate subduction deformation process: An insight into the genesis of East China Sea Shelf Basin

海洋地质与第四纪地质. 2019, 39(5): 163

新几内亚–所罗门弧俯冲体系动力过程：板块起始俯冲的制约

Subduction dynamics of the New–Guinea–Solomon arc system: Constraints from the subduction initiation of the plate

海洋地质与第四纪地质. 2019, 39(5): 115

中国东部–朝鲜半岛中生代板块结合带划分——对嵌入模式的新认识

Mesozoic plate boundary in East China–Korean Peninsula: a revised model of plate indentation

海洋地质与第四纪地质. 2018, 38(2): 79

菲律宾海盆磁条带特征及61 Ma以来的海底扩张过程重建

CHARACTERISTICS OF MAGNETIC LINEATIONS AND RECONSTRUCTION OF SEAFLOOR SPREADING PROCESSES OF THE PHILIPPINE SEA BASIN SINCE 61 MA

海洋地质与第四纪地质. 2017, 37(1): 30



关注微信公众号，获得更多资讯信息

鄢全树, 袁龙, 闫施帅, 等. 菲律宾海板块东南边界地质过程与研究展望 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 2023, 43(5): 50-63.

YAN Quanshu, YUAN Long, YAN Shishuai, et al. Geological evolution and research prospect in southeast boundary of Philippine Sea Plate[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2023, 43(5): 50-63.

菲律宾海板块东南边界地质过程与研究展望

鄢全树^{1,2,3}, 袁龙¹, 闫施帅¹, 刘振轩¹, 吴增¹, 石学法^{1,2,3}

1. 自然资源部第一海洋研究所海洋地质与成矿作用重点实验室, 青岛 266061

2. 崂山实验室海洋地质过程与环境功能实验室, 青岛 266237

3. 山东省深海矿产资源开发重点实验室, 青岛 266061

摘要: 晚中生代期间, 由于古太平洋俯冲板片俯冲于欧亚板块之下, 从而在欧亚大陆东缘存在一条巨型的类似于现今太平洋东侧的安第斯型俯冲带。岩浆活动记录显示, 70 Ma 左右, 可能由于外来的正地形地体拼贴上该俯冲带, 从而导致这条巨型安第斯型俯冲带逐渐消失, 欧亚大陆东缘逐渐从主动大陆边缘变为被动大陆边缘。然而, 新生代早期以来, 伴随着菲律宾海板块从赤道北移, 该被动大陆边缘又重新活化, 变为主动大陆边缘, 并逐渐形成了巨型的沟-弧-盆系统, 期间西太平洋地区大致经历了三期的弧后扩张, 即始新世-渐新世—中新世、上新世以来, 且菲律宾海板块正好包括了这 3 个扩张期的弧后扩张盆地: 西菲律宾海盆、四国海盆-帕里西维拉海盆以及马里亚纳海槽。本文详细总结了太平洋板块与次级的板块——菲律宾海板块及卡罗琳板块的地质演化历史, 且详细探讨了以上 3 个主要板块之间相互作用的典型区域 (菲律宾海板块东南侧) 的地质学和岩石学特征以及尚存在的重要科学问题, 并展望了未来该区域的研究方向。

关键词: 岩浆活动; 地质过程; 太平洋板块; 卡罗琳板块; 菲律宾海板块

中图分类号: P736.1

文献标识码: A

DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2023040701

Geological evolution and research prospect in southeast boundary of Philippine Sea Plate

YAN Quanshu^{1,2,3}, YUAN Long¹, YAN Shishuai¹, LIU Zhenxuan¹, WU Zeng¹, SHI Xuefa^{1,2,3}

1. Key Laboratory of Marine Geology and Metallogeny, First Institute of Oceanography, Ministry of Natural Resources, Qingdao 266061, China

2. Laboratory for Marine Geology, Laoshan Laboratory, Qingdao 266237, China

3. Key Laboratory of Deep Sea Mineral Resources Development, Shandong (preparatory), Qingdao 266061, China

Abstract: During the Mesozoic Era, due to continuous subduction of the plaeo-Pacific slab beneath the Eurasian plate, a huge Andean-type subduction zone was gradually formed, being similar to that in modern eastern Pacific margin. Evidence from magmatic activity shows that the subduction processes of the Mesozoic Andean-type subduction zone had gradually ceased due to possible collaging of exotic positive topography terrane (s) into the subduction zone, and the eastern margin of the Eurasian plate has changed from active to passive continental margins. However, since early Cenozoic, accompanied by northward migration of the Philippine plate from south of the Equator (original place), the passive margin was reactivated and became an active margin and gradually formed a huge trench-arc-(back-arc) basin system in the western Pacific region after experienced three-epoch spreading evolution (i.e., Eocene, Oligocene-Miocene, Pliocene-Present). The Philippine Sea plate (PSP) includes these three-epoch back-arc basins (i.e., West Philippine Basin, Shikoku-Parece Vela Basins, and Mariana Trough). This study summarized in detail the geological evolution history of Pacific plate (first-order large tectonic plate), Philippine Sea plate and Caroline plate (second-order tectonic plate), described the geological and petrological characteristics for typical regions of interaction of the three tectonic plates, proposed some important scientific questions, and finally, pointed out the directions of investigation and research in the near future.

Key words: magmatic activities; geological processes; Pacific plate; Caroline plate; Philippine Sea plate

晚中生代期间, 由于太平洋板块向欧亚板块之下的西北向俯冲作用, 在欧亚大陆东缘形成巨大的

安第斯型大陆弧^[1-3]。伴随着这次俯冲事件以及后来的构造应力反转 (由挤压转变为伸展), 中国东部

资助项目: 崂山实验室“十四五”重大项目“俯冲带动力过程与物质循环”(LSKJ202204103); 国家重点研发计划项目“海洋划界相关自然特征的影响因素分析及其特征提取技术研究”(2017YFC1405502); 国家自然科学基金“海底岩石学”(41322036); 国家海洋局“全球变化与海气相互作用”专项 (GASI-GEOGE-02); 山东省泰山学者建设工程项目

作者简介: 鄢全树 (1976—), 男, 研究员, 海底岩石学专业, E-mail: yanquanshu@163.com

收稿日期: 2023-04-07; **改回日期:** 2023-06-26. 周立君编辑

形成了大规模的燕山期花岗岩^[4]。岩浆活动记录显示, 70 Ma 左右, 可能由于外来的正地形地体拼贴上该俯冲带, 从而导致这条巨型安第斯型俯冲带逐渐消失, 欧亚大陆东缘逐渐从主动大陆边缘变成为被动大陆边缘^[3, 5-6]。然而, 自中生代晚期或者新生代早期以来各种构造事件的综合影响导致了西太平洋区域重新活化成主动大陆边缘, 形成了巨大的沟-弧-盆体系^[4], 这些事件包括: ① 印度板块向欧亚板块的楔入; ② 在大约 50 Ma 太平洋板块运动方向由北北西转变为北西西, 这个运动方向的转变与夏威夷-皇帝海岭的弯曲时间相一致^[7]; ③ 菲律宾海板块的北移以及同期的太平洋板块向东方向的后撤^[8]。该沟-弧-盆体系的形成及演化不仅控制了该区域矿产资源的形成和分布, 而且对此区域的沉积环境、古气候和古环境的演化也起了深远的影响^[4, 9-10]。与沟-弧-盆体系形成和演化有关的重要科学问题一直是国际地质学界的热点研究领域, 内容涉及地球物理学、岩石学、地球化学、热液矿床及热液口附近生物群体等方面的研究, 因此, 在多学科交叉的基础上, 系统、全面地对西太平洋大构造板块交汇处的构造单元开展研究有助于深入认识大陆与大洋板块的相互作用、大陆边缘演化、全球构造及矿产资源形成的动力学背景, 具有重要的科学意义^[4, 9-12]。

作为西太平洋最大的边缘海之一, 菲律宾海板块的构造和演化对邻近区域产生了深远的影响, 包括南海地区、冲绳海槽、日本海、吕宋岛弧等区域^[4, 11, 13-15]。自从 20 世纪 80 年代以来, 有许多国际航次对菲律宾海及其邻近区域进行了详细的研究工作, 包括 DSDP(Deep Sea Drilling Project, 深海钻探计划) 6、31、58、59、60, ODP(Ocean Drilling Program, 大洋钻探计划) 184、195, IODP(Integrated Ocean Drilling Program, 综合大洋钻探计划) 331 以及 2014 年的 IODP(International Ocean Discovery Program, 国际大洋发现计划) 350、351 和 352 航次, 取得了一系列重要成果^[9-10, 14, 16-18]。

总之, 大构造板块交汇处作为大陆和大洋之间复杂的过渡地带, 研究其地质地球物理特征对深入认识大陆与大洋板块的相互作用、大陆边缘演化及全球构造, 均具有深远的科学和实际意义。菲律宾海板块是西太平洋沟-弧-盆俯冲汇聚系统的一个重要组成部分, 其内发育有不同扩张时代的弧后盆地、残余弧以及正在活动的俯冲带, 同时, 作为第二级别的板块, 菲律宾海板块位于第一序构造板块(太平洋板块、欧亚板块与印澳板块)包围之中, 与周围大构造板块发生着复杂的相互作用^[4, 19]。

因此, 揭示西太平洋大构造板块交汇处地质地球物理学特征对于理解西太平洋沟-弧-盆系统的形成和演化可提供重要线索。本文主要阐述了西太平洋板块交汇处地质地球物理学特征的研究进展, 并提出了尚存在的重要科学问题及未来的重点研究方向。

1 50 Ma 以来大构造板块构造演化

1.1 太平洋板块

太平洋板块从约 190 Ma 开始, 在古太平洋(泛大洋)中央形成, 经过近 2 亿年的演化形成了现今的残存状态^[12, 20-21]。太平洋三角形洋底由 3 个方向磁异常组成: 北西向夏威夷磁条带、北东向日本磁条带、东西向菲尼克斯磁条带, 表明洋内三节点的扩张导致太平洋板块从现有大洋板块中分离, 同时形成西北部的伊泽奈崎板块、东北部的法拉隆板块以及南部的菲尼克斯板块^[22](图 1)。

在 190~120 Ma 期间, 伴随着菲尼克斯、法拉隆和依泽奈崎三大板块之间三节点的持续扩张, 太平洋微板块逐渐形成。三大板块分别垂直其相应的洋中脊段运动并向各自相邻陆块俯冲, 而太平洋板块保持相对静止(图 1)。最初沿着太平洋脊的扩张速率较缓慢, 随后扩张速率逐渐增加, 在白垩纪中期达到峰值^[21]。120~75 Ma 期间, 泛大洋内发生超快速洋底扩张, 伴随地幔柱的出现与解体、微板块的分裂与愈合, 菲尼克斯板块裂解成为 4 个板块, 洋中脊合力改变导致太平洋板块受力方向变化转而向西运动并俯冲(图 1)。在此期间, 太平洋板块成为泛大洋中的主板块, 泛大洋转变为太平洋。75~55 Ma 期间, 微陆块的裂离运动导致太平洋板块运动方向变为北北西向。古太平洋板块持续向欧亚大陆俯冲消减, 在大陆东缘形成一条规模巨大的安第斯型大陆边缘^[4]。随着依泽奈崎-太平洋洋中脊斜向俯冲到东亚陆缘之下, 安第斯型大陆边缘逐渐转换为西太平洋型活动大陆边缘(图 1)。55~25 Ma 期间, 太平洋板块运动受阻, 板块转为向西运动, 从而导致伊泽奈崎板块的消亡^[23-24]。自始新世中期开始, 太平洋板块和卡罗琳板块向菲律宾海板块持续俯冲, 并在晚渐新世卡罗琳高原与雅浦海沟碰撞形成雅浦俯冲带(图 1)。25 Ma 以来, 西太平洋地区因弧后扩张、卡罗琳等洋脊形成, 出现大量微板块, 太平洋板块再度碎片化并伴随快速俯冲, 进而形成现今西太平洋地区内巨型的沟-弧-盆

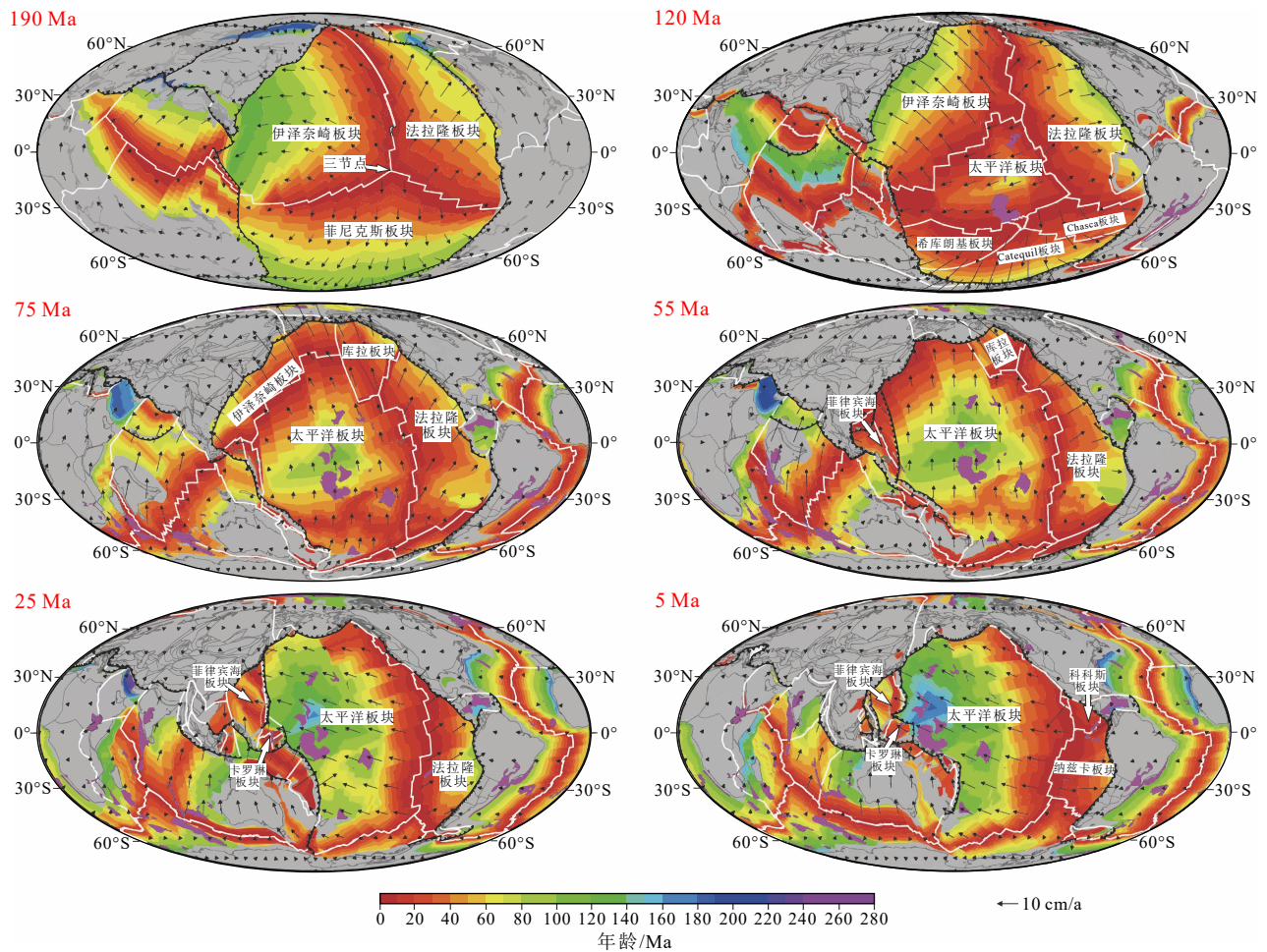


图 1 190~5 Ma 古太平洋的板块构造格局^[21]

Fig.1 Plate tectonic pattern of the Paleo-Pacific during 190~5 Ma^[21]

俯冲体系^[12,20](图 1)。

1.2 菲律宾海板块

菲律宾海是西太平洋上最大的边缘海之一, 菲律宾海板块被一系列俯冲带包围, 包括西部的菲律宾海沟、北部的琉球海沟、东部的伊豆-小笠原-马里亚纳 (Izu-Bonin-Mariana, IBM) 海沟以及南部的雅浦和帕劳海沟(图 2)。菲律宾海板块由一系列弧后盆地和岛弧组成, 自西向东依次为西菲律宾海盆、九州帕劳脊、四国海盆、帕里西维拉海盆、西马里亚纳脊、马里亚纳海槽和伊豆-小笠原-马里亚纳-雅浦-帕劳弧^[4, 11, 13-15, 25]。IBM 弧的启动开始于大约 52 Ma, 由于古老而致密的西太平洋岩石圈的下沉, 导致地幔减压熔融, 形成了弧前玄武岩 (52~51 Ma); 随后由于俯冲沉积物和洋壳产生的流体/熔体加入形成了玻安岩 (49~45 Ma); 45 Ma 之后形成了成熟的弧岩浆体系^[3-4]。

研究表明, 菲律宾海板块的弧后盆地经历了 3 个扩张幕, 分别为始新世 (西菲律宾海盆)、渐新

世至中新世 (四国和帕里西维拉海盆) 和晚中新世至第四纪 (马里亚纳海槽)^[4]。基于构造重建, Hall^[14]讲述了菲律宾海板块自 50 Ma 以来的构造演化。菲律宾海板块最初位于赤道附近, 自新生代早期以来逐渐向北运动, 在运动的过程中依次形成了西菲律宾海盆以及原 IBM 弧的裂解作用。30~15 Ma, 原 IBM 弧的裂解形成了帕里西维拉海盆和四国海盆, 11 Ma, IBM 弧的岩浆活动再次活跃, 5 Ma 左右, 随着 IBM 海沟向海方向的继续后撤, 导致了马里亚纳海槽的打开, 并一直活动至今^[4, 14, 25]。同时, 菲律宾海板块在向北运动的过程中经历了近 90° 的顺时针旋转^[4]。

1.3 卡罗琳板块

卡罗琳板块隶属于太平洋板块, 随太平洋的演化形成于印度洋与太平洋之间的过渡地区, 现今位于太平洋板块、菲律宾海板块、印度-澳大利亚板块之间^[14]。卡罗琳板块是西太平洋边缘一个独立的微板块, 以显著的地震构造特征为界, 相对于周围

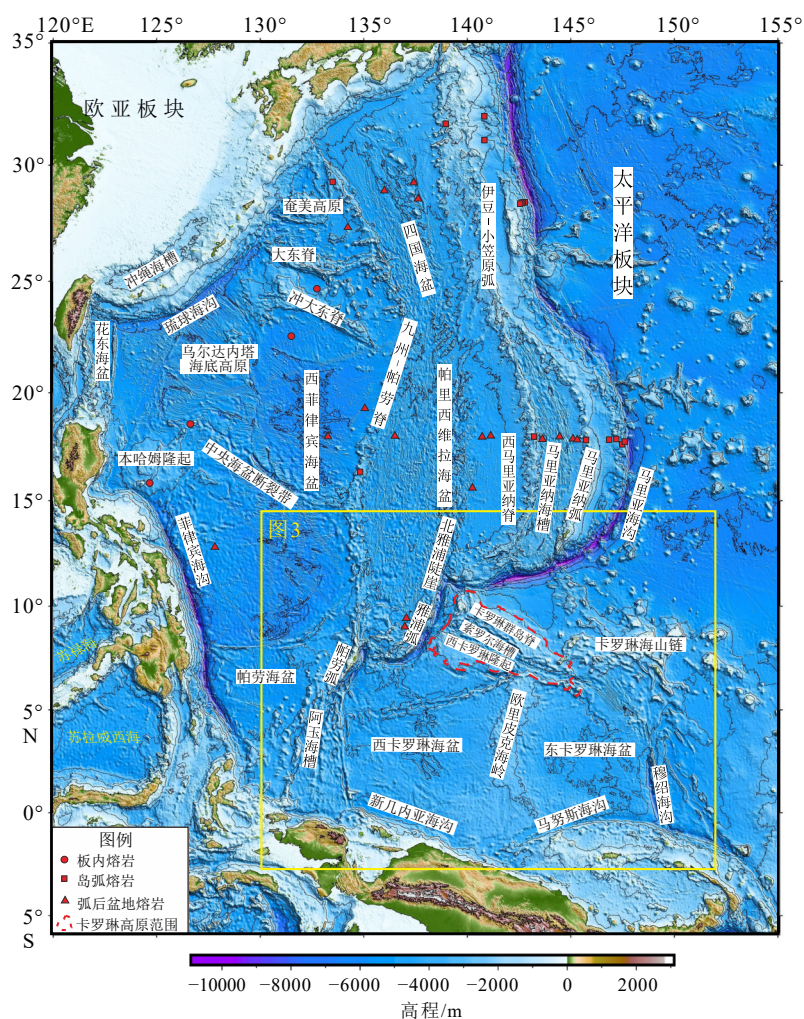


图 2 菲律宾海板块及其邻近区域地质和基底岩石基本类型

Fig.2 Sketch geological map and basement rock types of the Philippine Sea plate and adjacent areas

板块处于相对运动状态^[26]。卡罗琳板块的主要构造单元由卡罗琳高原(西卡罗琳隆起)、索罗尔海槽和卡罗琳海盆构成,索罗尔海槽将卡罗琳高原分割为近于平行的两部分:卡罗琳群岛脊和西卡罗琳隆起,分属于太平洋板块和卡罗琳板块,也是两板块的分界^[27-28](图 3)。卡罗琳板块非常年轻,大约形成于古近纪中期(37~24 Ma)^[29-30],而对于卡罗琳板块的成因,目前仍存在多种解释,其可能是渐新世期间形成的弧后盆地,或是形成于被捕获的洋壳^[28, 31]。渐新世期间,卡罗琳海盆持续扩张并伴有顺时针的旋转,基尔斯加德海槽和西卡罗琳海槽分别是东、西卡罗琳盆地的扩张中心^[32-33]。33~27 Ma 期间,热点火山作用导致大规模玄武岩流的喷出,卡罗琳高原在此间形成,强烈的火山活动也导致海盆内先存沉积物遭到破坏^[28, 34-35]。同时卡罗琳板块北西向持续运移,与菲律宾海板块在雅浦海沟南部、帕劳海沟和阿玉海槽处发生碰撞和俯冲作用^[36-38]。17~7 Ma,

卡罗琳高原由裂解作用形成索罗尔海槽,并伴有强烈的岩浆作用^[27-39]。综上所述,卡罗琳板块虽然较为年轻,但经历了扩张、旋转、俯冲等,并与周缘板块存在复杂的相互作用,形成了现今的构造格局。

1.4 三大板块相互作用过程

始新世以来,三大板块经历了 50 Ma 左右的复杂演化形成现今的构造格局(图 4)。早始新世期间,太平洋板块的运动方向发生改变,由北北西向变为北西西向^[7],向菲律宾海板块持续俯冲。同时,伴随着太平洋板块运动方向的改变,菲律宾海板块在 50~40 Ma 期间顺时针旋转了约 50°。37~24 Ma 期间,卡罗琳板块由海底扩张形成,并伴有顺时针的旋转,此时卡罗琳-太平洋板块的接触带是一个北北西向的转换边界^[31, 33, 40]; 33~27 Ma 期间,热点火山作用强烈,卡罗琳高原由地幔柱作用在卡罗琳板块上形成,并随同太平洋板块向菲律宾海板块运

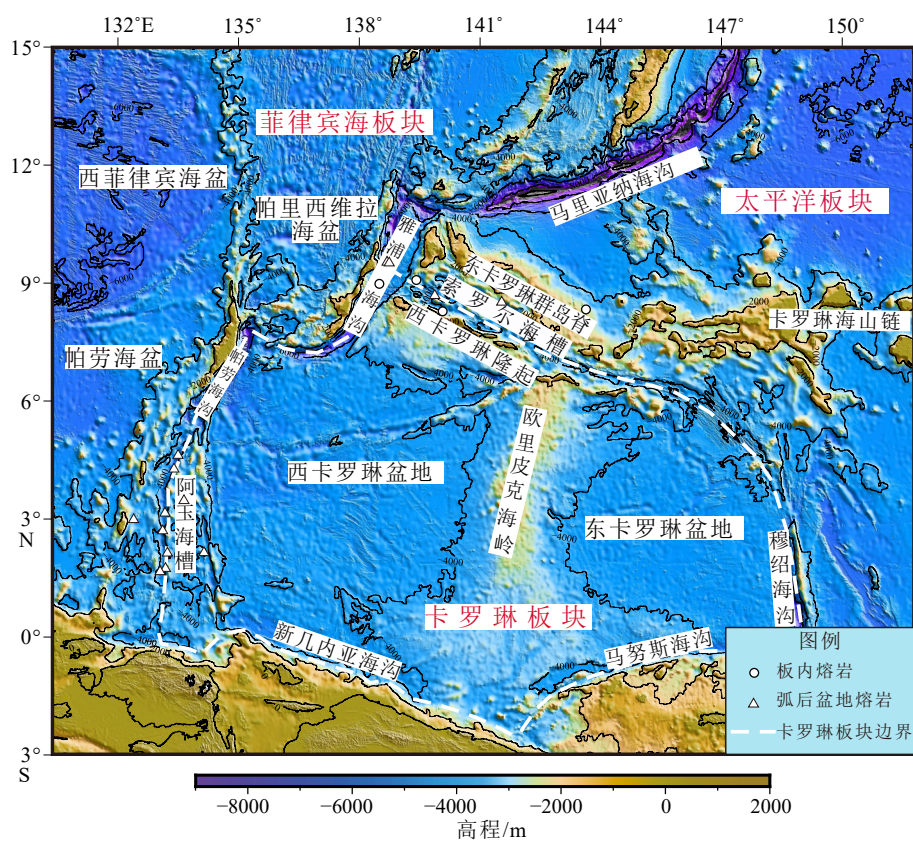


图3 卡罗琳板块及其邻近区域地质和基底岩石基本类型

白色破折线围限的大致区域为卡罗琳板块。

Fig.3 Sketch geological map and basement rock types of the Caroline plate and adjacent areas

The white dotted line represents the boundary of Caroline Plate.

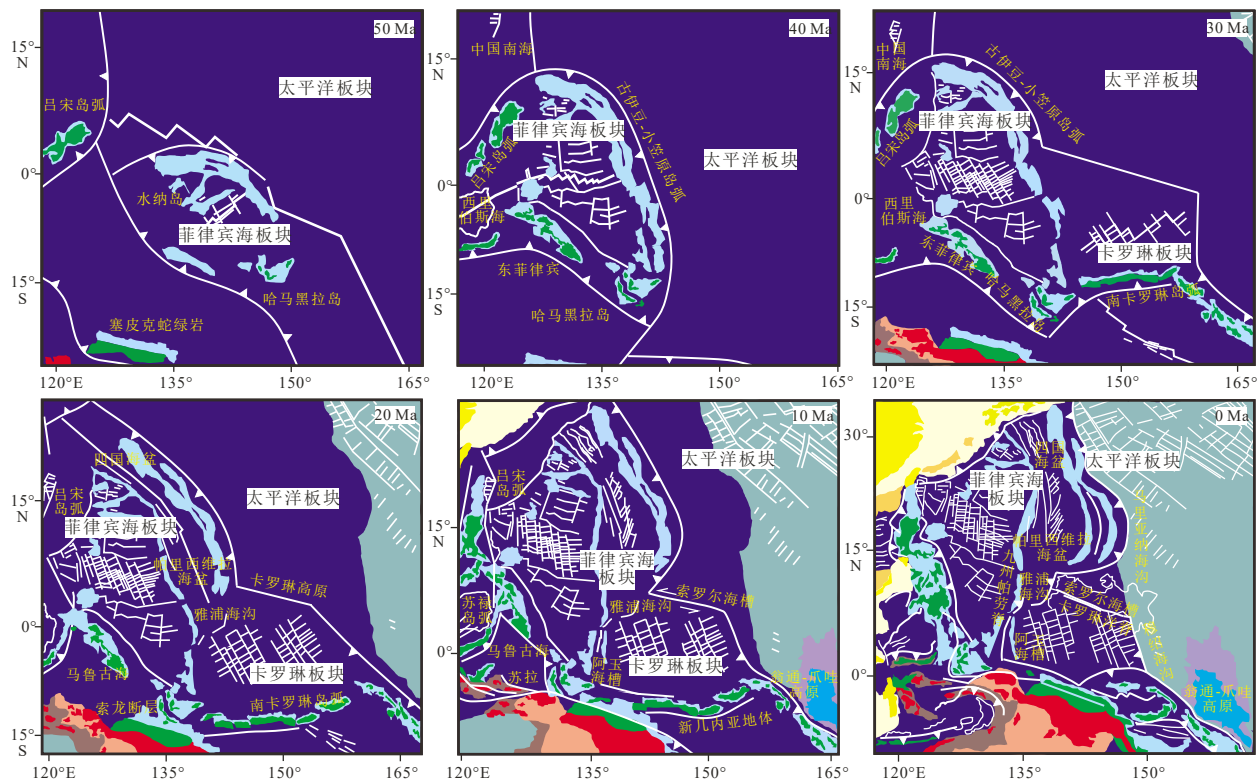


图 4 50 Ma 以来三大板块的构造演化示意图^[14]

Fig.4 Schematic diagram of tectonic evolution of the three plates since 50 Ma^[14]

移^[28, 34, 41]。在此期间, 菲律宾海板块因俯冲后撤导致新的弧后盆地开始扩张发育, 古 IBM 弧发生裂解^[4]。太平洋板块和卡罗琳板块向菲律宾海板块持续俯冲, 形成雅浦海沟-岛弧体系和帕劳海沟-岛弧体系^[37, 42]。晚渐新世卡罗琳高原与雅浦海沟发生碰撞, 形成了现今的雅浦俯冲带^[34]。25 Ma 以来, 西太平洋地区因弧后扩张出现大量微板块而再度碎片化, 并伴随快速俯冲作用。中新世以来, 菲律宾海板块内海盆逐渐停止扩张, 随着板块东缘俯冲带继续后撤马里亚纳海槽发生扩张。17~7 Ma 期间, 卡罗琳高原发生裂解作用形成索罗尔海槽^[27-28]。综上所述, 三大板块经历多期构造旋转和相互作用演化为现今构造格局。

2 太平洋板块、菲律宾海板块及卡罗琳板块相互作用典型区的地质过程

2.1 北雅浦陡崖、雅浦弧、帕劳弧、阿玉海槽一线

2.1.1 雅浦沟-弧系统

(1) 地质概况

雅浦俯冲带位于马里亚纳和帕劳俯冲带之间(图 3), 其轴部水深为 6000~9000 m, 雅浦海沟由轴线至岛弧长约 700 km, 宽约 50 km(表 1), 呈“J”形(北东-南西向)^[38, 43-44]。Fujiwara 等^[37]根据海沟水深和地形特点以 8°26'N 为界将雅浦海沟分为南、北两段, 北段大致呈北偏东 30°方向延伸, 地形地势较低, 逐渐过渡到马里亚纳沟-弧-盆体系, 向南逐渐转变为东-西向。在 11°07'N 附近, 雅浦海沟与马里亚纳海沟垂直相交, 海沟连接处以北构造带内有一条近南-北走向的陡崖, 为北雅浦陡崖(North Yap Escarpment; NYE)^[42]。北雅浦陡崖为细长的条带状, 从 11°45'N 向北延伸至 11°56'N, 全长约为 20 km, 最大水深约为 6400 m(表 1), 陡崖以东区域发育有大量的地垒地堑, 其最北端则是雅浦海沟的最北部, 形成了海沟沟底盆地^[45]。

前人对雅浦俯冲带进行了一定程度的研究, 如在俯冲活动性上, 因其具有高热流值^[46]、地震频发^[47]的特点以及新鲜火山岩^[44]的存在, 部分学者认为雅浦海沟的俯冲活动性并没有因为卡罗琳海底高原的碰撞而停止^[37, 44, 48], 只是俯冲速率变得极为缓慢, 约为 0~6 mm/a^[42](表 1)。然而, 也有部分学者认为它不是一个活跃的俯冲带^[49-50], 因为雅浦弧基底为变质岩, 陆坡侧几乎没有沉积物的发育, 同时缺乏现代火山活动。因此, 雅浦俯冲带的活动性仍

然存在争议。此外, 值得注意的是雅浦俯冲带南、北两段在海底地形地貌、地球物理场、应力场特征等方面表现出显著的差异^[43]。雅浦岛弧方面, 南部火山弧形态为多个较小的火山弧平行发育, 其间发育弧间盆地, 而北部的火山弧截面为典型锥形结构, 揭示了岛弧形成期间南、北部的岩浆供应量存在较大差异, 这可能与雅浦俯冲带在南、北两段的差异有关^[51]。

(2) 活动时代及岩石地球化学特征

北雅浦陡崖的玄武岩和安山岩为典型的钙碱性系列, K-Ar 年龄为 7.8 ± 1.3 Ma 和 10.8 ± 0.4 Ma, 结合单矿物的原位主量、微量元素指示其可能与马里亚纳弧间盆地(海槽)形成早期有关^[48, 52-53](表 1)。此外, 北雅浦陡崖的部分玄武岩具有与俯冲相关火山岩的典型特征, 如富集大离子亲石元素和轻稀土, 亏损高场强元素, 具有更多的放射性成因同位素 Sr, 且 Nd 同位素组成与帕里西维拉海盆几乎相同, 说明岩浆受到了流体的交代作用; 同时, 其玄武岩 K-Ar 年龄 (24.8 ± 1.3 Ma) 指示北雅浦陡崖似乎是帕里西维拉海盆南部扩张时期形成的裂谷^[42](表 1)。

雅浦岛弧的岩石地球化学研究多集中在北部, 对中部和南部的研究相对较少(图 5)。早期研究认为雅浦群岛的基底主要由绿片岩和角闪岩组成^[54-55], 随着研究范围的不断扩展, 发现雅浦岛弧由两个不同的构造单元组成, 上部为逆冲的帕里西维拉海盆(Parece Vela Basin, PVB), 但有少量的弧火山岩存在; 下部为弧岩浆作用的地幔残余物^[43]。少量弧火山岩被认为是 11~7 Ma 期间, 年轻的、热的索罗尔海槽(或卡罗琳海底高原)俯冲导致上地幔浅部熔融形成的^[52-53]。最近, 在雅浦岛弧采集到的多站岩石(角闪岩、橄榄岩和玄武岩)样品, 其角闪岩 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄指示卡罗琳海底高原在 21 Ma 与雅浦岛弧发生碰撞, 且新的 Sr、Pb 同位素比值特征(均位于北半球参考线以上)显示该地区的下伏地幔楔属于印度洋型地幔, 火山岩具有与 EM II 型地幔端元相似的 Sr、Pb 同位素特征^[44, 56]。橄榄岩、辉长岩和玄武岩选择性富集 LILE 和 LREE 以及 HFSE 的亏损也进一步证明了此观点^[42, 44]。总之, 雅浦俯冲带内的岩石来源较为复杂, 揭示雅浦岛弧各岩石类型在成因上的联系, 可为完整理解岛弧形成演化提供地球化学方面的制约。

2.1.2 帕劳沟-弧系统

(1) 地质概况

帕劳群岛位于九州-帕劳脊(Kyushu-Palau Ridge, KPR)的最南端(图 3), 与九州-帕劳脊主体在约

表 1 菲律宾海板块东南边界主要构造单元的地质地球物理特征

Table 1 Geological and geophysical features of the main geological units in the southeast boundary of the Philippine Sea plate

构造单元	大致地理位置	规模	基底岩石年龄/Ma	平均水深/m	地壳厚度/km	地球物理特征	岩石地球化学特征	可能成因	参考文献
雅浦沟-弧系统	马里亚纳和帕劳岛弧之间	长约700 km	7.6~10.9	6000~9000	8~16	具高热流值、浅源地震频发、俯冲速率低以及较短的沟弧间距	主要由变质岩组成，类似于洋中脊玄武岩的特征；橄榄岩和火山岩具有岛弧的相关性	太平洋和卡罗琳板块的俯冲以及卡罗琳高原的“碰撞/俯冲”	[41-42,44,52-53,95]
北雅浦陡崖	马里亚纳与雅浦海沟交汇处以北	长约20 km	24.8	5600~6400	5~10	自由空气重力异常为负值，布格重力异常没有表现出显著特征，为残余结构	具有俯冲相关火山岩的典型特征，具有更多的放射性成因同位素Sr	帕里西维拉海盆南部扩张时期形成	[42,52,54]
帕劳沟-弧系统	九州-帕劳脊主体以南	长约500 km	20.1~37.7	6000~7000	>10	板块汇聚速率为0.3~0 cm/yr，由北向南递减	典型的洋内岛弧火山岩序列，亏损高场强元素，富集Sr、La、Ba、Rb等元素	俯冲后撤+卡罗琳高原“碰撞”	[62-63,98]
帕里西维拉海盆南部	菲律宾海板块东南端，北雅浦陡崖以南至雅浦弧之间	370 km×440 km	13.1~6.1	500~5200	4.8~5.9	无磁异常，缺失东半部分，双层地壳结构，同时存在平板俯冲和俯冲反转	具有类似于弧后盆地玄武岩的地球化学特征	弧后扩张成因	[60,82,95]
阿玉海槽	帕劳海沟以南，卡罗琳板块与菲律宾海板块边界处	长约600 km，宽约20~30 km	19.9~25.2	5000~6000	5~7	扩张速率为1.0~1.5 cm/yr，存在扩张方向的转变，地震多与走滑断层相关	主要由玄武岩组成，具有类似于洋中脊玄武岩或弧后盆地玄武岩的特征	火山弧的初始裂谷阶段之后围绕轴线的扩展	[38,66,70]
卡罗琳高原	雅浦海沟以东，卡罗琳板块和太平洋板块边界处	长约530 km	8.1~23.9	1000~3000	9~15	地壳较厚，具有较低的布格重力异常	主要由玄武岩组成，具有与洋岛玄武岩或洋中脊玄武岩相似的地球化学特征	地幔柱作用	[28,41,85,97]
索罗尔海槽	西宽(150~175 km)，东窄(75 km)，长约530 km 东、西卡罗琳洋脊之间		7.0	1600~5000	5~6	斜向张裂转换系统，兼具走滑和伸展特征	主要由玄武岩组成，具有类似于洋中脊玄武岩或洋岛玄武岩的化学特征	卡罗琳洋底高原裂解	[3,28,32,53,61,64]

9°30'N 处分隔，其地壳厚度普遍大于 10 km^[61]。前人基于古地磁数据认为帕劳群岛形成于近赤道区域，自始新世以来随 KPR 及菲律宾海板块的构造演化向北迁移，并顺时针旋转了约 60°~70°^[66-67]。

帕劳海沟位于帕劳盆地以东，雅浦岛和西卡罗琳盆地以西，南北分别与帕劳脊（九州-帕劳脊南段）及阿玉海槽相接，在 5°~8°N、133°~136°E 的区域内呈近南北向展布，长约 300 km，平均水深为 6000~7000 m，最大深度约 8080 m（帕劳海沟南部）。沿海沟轴线底部的剖面多为尖锐的“V”型沟槽，少有沉积物覆盖，呈北宽南窄的空间格局^[68]。帕劳海沟的轴线与帕劳弧的间距仅约 40 km，是世界上最窄的沟-弧系统。其向陆的斜坡倾角约为 12°，与雅浦沟-弧体系相似，但帕劳沟-弧体系并未发现任何现代地震活动的记录，被认为是不活跃的岛弧，其沿帕劳海沟的板块汇聚速率约为 3 mm/a^[61, 68-69]。

(2)活动时代及岩石地球化学特征

帕劳沟-弧系统的岩石以俯冲带弧火山岩序列为典型代表，其中，帕劳群岛主要记录了自渐新世以来约 12 Ma 的岛弧岩浆活动，其岛弧成因类似于短暂的岩浆“泄露”，而非大规模的岛弧岩浆喷发^[61-62]。Cosca 等^[70]曾报道过帕劳群岛上主要火山单元的年龄约为 30~34 Ma，截至目前，在帕劳群岛所获取的可信度较高的最古老岩石年龄为 37.7 Ma^[66]。Meijer 等^[71]报道了其区域内安山质凝灰岩中角闪石的 K-Ar 年龄为 32.3±1.1 Ma，而其较年轻的年龄数据为 20.1±0.5 Ma，结合古 KPR 的弧火山作用活跃期为始新世中后期至中渐新世，现有资料表明帕劳区域的岩浆活动可能持续至 KPR 主体停止活动之后（表 1）。

前人对帕劳沟-弧系统的岩石演化过程开展了详尽的研究工作，结果表明帕劳区域内火成岩表现为典型的洋内岛弧火山岩序列，由玻安岩-高镁安山岩-玄武岩-玄武质安山岩-安山岩-闪长岩-英安岩组

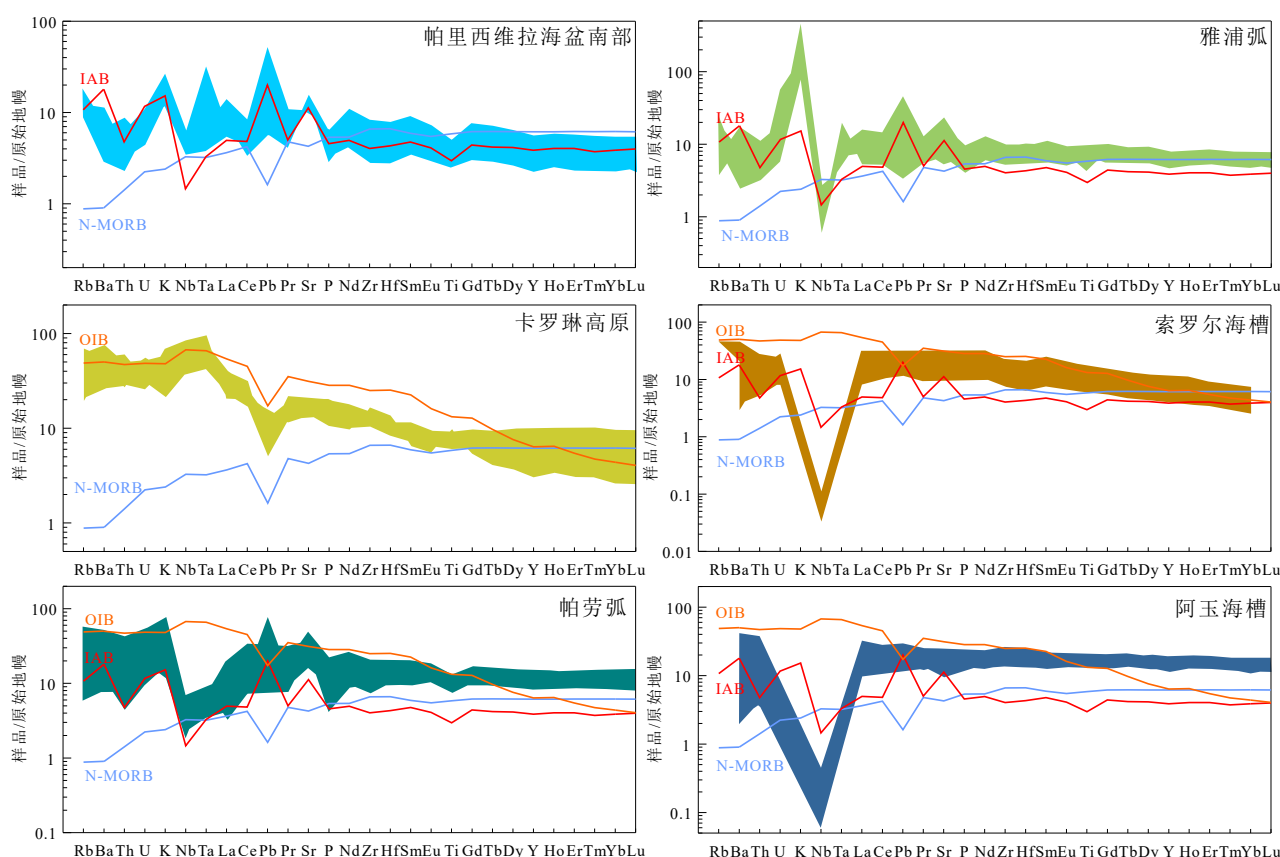


图 5 菲律宾海板块东南边界区域熔岩微量元素蛛网图

图中 IAB 代表岛弧玄武岩, N-MORB 代表正常洋中脊玄武岩, OIB 代表洋岛玄武岩。正常洋中脊玄武岩、洋岛玄武岩和原始地幔数据来自 Sun 和 McDonough^[57], 岛弧玄武岩数据来自 Niu and O'Hara^[58], 帕里西维拉海盆南部数据来自文献^[59], 雅浦弧数据来自文献^[44, 52-53], 卡罗琳高原数据来自文献^[41], 索罗尔海槽数据来自文献^[60], 帕劳弧数据来自文献^[61-62], 阿玉海槽数据来自文献^[63-65]。

Fig.5 Trace element compositions of lavas in the southeastern boundary of the Philippine Sea plate

IAB: island arc basalt; N-MORB: normal mid-ocean ridge basalt; OIB: ocean island basalt. Data for the N-MORB, OIB and primitive mantle are from references^[57]; data for IAB are from references^[58]; data for the southern part of the Parece Vela Basin are from references^[59]; data for the Yap Arc are from references^[44, 52-53]; data for the Caroline Plateau are from references^[41]; data for the Solor Trough are from references^[60]; data for the Palau Arc are from references^[61-62]; data for Ayu Trough are from references^[63-65].

成, 多数岩石样品属于岛弧拉斑玄武岩序列^[62-63, 72]。在帕劳海沟中发现的弧源岩石为高镁玄武岩及硅质火山凝灰岩, 所有帕劳沟-弧系统岩石表现出与 Hahajima 海山相似的特征^[73]。帕劳岩石样品均表现出高场强元素相对亏损, 其 Ti/Zr、Sc/Y 比值与初始的洋内岛弧相似, 其岛弧岩浆起源于一个中度亏损的弧下地幔, 推断较古老的西菲律宾海盆(WPB)海底地壳可能随着帕劳沟-弧系统的发育而裂陷进入地幔中^[62](图 5)。受俯冲作用的影响, 帕劳岩石样品表现为 Sr、La、Ba、Rb 等元素含量升高以及较小的 Ce/Ce*、Eu/Eu*变化范围表明俯冲流体主要源于蚀变的 MORB 洋壳而非源于沉积物或再循环的弧源物质。此外, 在帕劳出现的高镁岩石可能与 IBM 俯冲带中发现的其他玻安岩相似, 这种岩浆作用可能属于低钙玻安岩与岛弧拉斑玄武岩之间的

过渡序列, 其成因可能与强烈亏损的地幔源区以及中等程度的低压熔融有关^[61], 区域内弧火山岩的地球化学特征表明帕劳岛弧演化尚处于洋内岛弧演化的初生阶段。

2.1.3 阿玉海槽

(1) 地质概况

阿玉海槽在平面上呈倒扇形(图 2), 轴线为“V”型的裂谷, 北窄南宽。从 5°11'N 延伸至赤道。海槽的轴向深度范围为 5500~3200 m, 宽 20~30 km^[65](表 1), 剖面显示裂谷轴部沉积物稀少, 远离槽轴沉积物厚度逐渐增加^[74-75]。海槽像倒扇形一样打开, 旋转极位于帕劳岛的南部^[26]。水深测量结果显示阿玉海槽和帕劳海沟南端之间的地形存在明显的区别, 这种差异可能反映了阿玉海槽与帕劳海沟之间不同的构造和动力过程^[37], 但板块边界从

帕劳海沟俯冲转变为阿玉海槽的转换扩张机制仍不清楚。阿玉海槽内地形特征为向内侧坡度陡峭的裂谷山地呈有规律间隔分布^[69]。这种巨大的轴向深度变化,加上复杂、粗糙的海底地形,是慢速和超慢速扩张洋中脊的典型特征^[74-75]。

(2) 活动时代及岩石地球化学特征

由于北部与俯冲带相连接,阿玉海槽成为世界上最独特的扩张中心之一。由于在阿玉海槽很难建立起一个较好的磁异常条带模型^[76],因而前人研究多是通过借助地震剖面数据对比 DSDP 站位的钻孔资料来计算海槽的活动年代。关于阿玉海槽扩张起始年代的研究目前仍存在不同观点,一种观点认为阿玉海槽扩张始于 12~10 Ma^[26];另一种观点认为阿玉海槽的扩张起始年代约为 30~25 Ma,同时根据 DSDP 钻孔资料计算阿玉海槽的扩张终止年代为 16 Ma 左右^[37,69,77]。

阿玉海槽作为菲律宾海板块边界中唯一不是俯冲带的部分,所产生的岩浆和地壳的组成未受俯冲作用的影响,因而是研究菲律宾海板块下地幔性质和组成等问题的绝佳地点^[65]。海槽内玄武岩地球化学特征类似于 MORB 或 BABB,安山岩富集大离子亲石元素,亏损高场强元素,与岛弧火山岩相似^[64]。研究表明阿玉海槽下地幔为类似于西太平洋边缘盆地的印度洋型^[65,78],而该区域未受俯冲作用影响,意味着太平洋和印度洋型地幔域的地球化学边界比阿玉海槽更向东。海槽内玄武岩的熔融深度和可能的熔融程度表现出较大的变化,该地球化学特征也支持了前人地震和地磁调查所表明的阿玉海槽的扩张最近已经放缓或停止的观点^[74,76]。

阿玉海槽只有一小部分地区被调查和绘制,现有大部分数据集中在轴向区域,同时据上述阿玉海槽年代学研究可知,前人对该地区扩张速率和起始年代的研究多是基于卡罗琳板块的沉积物厚度,可能不具有足够的代表性,因此,缺乏可靠的海底年龄数据是理解该地区演化的关键挑战。

2.2 帕里西维拉海盆南部

帕里西维拉海盆位于九州-帕劳脊的东部,其北部为四国海盆,两者的分界线为索夫干断裂,南部为马里亚纳弧和雅浦岛弧,东部为西马里亚纳弧(图3)。帕里西维拉海盆呈狭长型,南北长约1900 km,东西宽700 km,平均水深为4500~5500 m,盆地中部为已经停止活动的中央裂谷,水深最深处超过7000 m,可识别出5D-10磁异常条带^[79-80](表1)。帕里西维拉海盆南部构造特征比较复杂,海山、裂

谷、丘陵等海底结构相间分布^[81]。该区域未受盆地东西向扩张的明显影响,更多的可能是受到东侧俯冲带的影响,形成一条平行于俯冲带的扩张裂谷^[82],同时,九州帕劳脊南端也发生了一系列的裂谷作用,这两个裂谷体系逐渐连接在一起,在盆地南部形成了一系列深槽和裂谷^[82]。帕里西维拉海盆南部水深为5200~500 m,水深从北向南逐渐变浅,未能识别出明显的磁异常条带(表1)。帕里西维拉海盆南部东侧部分的缺失有两种观点,一个是通过转换断层迁移到现今西马里亚纳弧西侧^[79,82],另一个观点认为是由于东侧卡罗琳板块的碰撞,导致了盆地东侧部分仰冲到原雅浦弧地壳之上^[39,42]。

帕里西维拉海盆岩石地球化学研究还较少,KH05-1-D1拖网站位取到了风化的枕状熔岩,但是却有比较新鲜的单斜辉石斑晶,这些辉石属于透辉石和普通辉石,属于亚碱性系列。Nisbet 和 Pearce^[83]通过单斜辉石构造判别图解发现,其所在寄主岩石为岛弧玄武岩或者洋底玄武岩(如 MORB),而不是板内碱性玄武岩,同时,其尖晶石成分表明该岩石可能类似于玻安岩或者岛弧拉斑玄武岩。2019年自然资源部第一海洋研究所执行的 CJ09 航次对帕里西维拉海盆进行了电视抓斗取样,获得了两个站位的玄武岩样品。研究表明,帕里西维拉海盆南部玄武岩具有介于 N-MORB 和 IAB 之间的微量元素特征和类似于印度洋型 MORB 的同位素特征,其地幔源区中具有较高的含水量和氧逸度^[59](图5)。

综上,帕里西维拉海盆南部构造特征比较复杂,基底熔岩样品较少,研究程度较浅,东侧卡罗琳高原的碰撞对帕里西维拉海盆南部的影响还需要进一步研究。

2.3 卡罗琳海底高原及索罗尔海槽

(1) 地质概况

卡罗琳海底高原(东、西卡罗琳海脊)(图3)位于卡罗琳板块北部边缘与太平洋板块边界处^[26]。索罗尔海槽将卡罗琳海脊分为两个近乎平行的两部分:卡罗琳群岛脊和西卡罗琳隆起。两个地质单元的深度都小于3000 m,部分地区的深度小于2000 m^[28]。西卡罗琳隆起之前被认为是一个与卡罗琳板块俯冲有关的残余弧^[32],近年来,卡罗琳海脊玄武岩的地球化学特征和岩石定年结果表明,该脊为一个中等规模的、由起源于下地幔的地幔柱作用形成的海底高原^[41]。

索罗尔海槽是一个略呈楔形、线性、北西向展布的裂谷,海底最深可达5000 m,海槽深度由西向

东逐渐变浅约 750~1000 m, 最大深度由 5000 m 下降到 4000 m(表 1)。索罗尔海槽平面上呈西宽东窄的不对称状, 西侧宽为 150~175 km, 东侧窄至小于 75 km^[41], 这种形态的差别可能是由于东西侧俯冲速率差异的影响^[32]。从剖面上看, 海槽的西部呈明显不对称的半地堑状, 而东部则较为对称, 西部的不对称特征是半地堑上盘块体的伸展和崩塌导致, 同时造成南侧边缘存在较大断距、海槽基底粗糙、弥漫性区域远震活动等特征^[84]。

(2) 活动时代及岩石地球化学特征

卡罗琳海脊在卡罗琳板块形成后不久便出现, DSDP 钻孔的研究结果确定卡罗琳海脊基底的年龄为 24 Ma 左右^[85-86]。最新研究发现, 卡罗琳海脊是一个由地幔柱作用形成的海底高原, 海脊上的拉斑玄武岩(15~24 Ma)和碱性玄武岩(8 Ma)分别具有 E-MORB 和 OIB 的特点, 各自代表火山活动的主要阶段和之后的低程度部分熔融阶段, 地幔源区岩性为尖晶石二辉橄榄岩^[41]。从卡罗琳高原到卡罗琳群岛玄武岩中 Sm/Yb 比值的增加反映了地幔柱随着时间的推移熔融程度变低。

索罗尔海槽是 17~7 Ma 由卡罗琳高原裂解形成^[28]。索罗尔海槽内岩石地球化学特征较为复杂, 槽内基底玄武岩既具有 MORB、E-MORB 特点, 又存在与夏威夷群岛的拉斑玄武岩相似的特征, 而海槽俯冲前缘基底玄武岩是由地幔橄榄岩经过部分熔融形成, 具有类似 OIB 的特征^[60, 63, 87]。因此, 索罗尔海槽基底玄武岩的岩浆生成可能是由于卡罗琳高原裂解形成索罗尔海槽期间被动上涌的地幔岩石经过低程度的部分熔融所致, 也可能与 MORB 和“热点”型岩浆源均有关系。

索罗尔海槽是卡罗琳高原裂解的产物, 但海底高原裂解形成海槽这一过程的动力学机制仍不明确。地幔柱持续的热效应可能导致卡罗琳高原底部岩石圈强度降低发生张裂, 卡罗琳高原与雅浦海沟的碰撞可能产生垂直高原走向的拉张应力, 太平洋板块的俯冲拖曳和卡罗琳板块的构造旋转也可能是张裂的诱因, 具体哪种因素导致海底高原的裂解仍需进一步研究。

3 科学问题与研究展望

自 20 世纪 60 年代末期以来, 对西太平洋地区实施了多次深海和大洋钻探航次, 获得了大量的研究成果, 但是相对于辽阔且复杂的西太平洋大构造板块交汇处来说, 这些调查还是显得非常不足, 使

得我们对于该地区的了解还很肤浅。有“深部过程探针”之称的基底岩石样品的缺乏以及地球物理资料的限制, 直接影响着一些科学问题的最终解决^[4]。因此, 基于我们对西太平洋大构造板块交汇处的现有认识, 总结出了以下几个科学问题:

(1) 太平洋板块和卡罗琳板块的边界在哪里?

卡罗琳板块构造演化相对复杂, Weissel 和 Anderson^[26]认为卡罗琳板块是一个相对于太平洋板块发生过逆时针旋转的独立的微板块(被突出的地震构造特征所包围, 相对于周围的主要板块处于相对运动状态)。卡罗琳板块非常年轻, 大约形成于渐新世(35~30 Ma)^[29-30, 48], 后期经历了卡罗琳海底高原的形成与裂解、板内的挤压变形等过程, 使太平洋板块和卡罗琳板块的边界变得不清晰。主要存在以下 3 种观点: ① Hegarty 和 Weissel^[27]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)和其北北西向延长线, 且卡罗琳板块东部边界的穆绍海沟(Mussau Trench)和莱拉海槽二者之间的块体与东卡罗琳海盆具有相似的声学特征, 暗示该块体与卡罗琳海盆具有一定的亲缘性^[49, 88]。② Weissel 和 Anderson^[26]认为索罗尔海槽是卡罗琳板块的北部边界。此外, Bird^[29]也认为两板块之间是沿着索罗尔海槽左旋走滑运动的转换型板块边界。③ 前人研究认为索罗尔海槽^[29, 74]或者莱拉海槽和其北北西向的延长线^[27]作为卡罗琳板块和太平洋板块之间的边界。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, 卡罗琳海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, 指示卡罗琳板块的北部边界应该位于卡罗琳海底高原的南部^[51, 89]。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^[51, 89]。因此, 太平洋板块和卡罗琳板块的边界仍不明确, 需要新的地球化学和地球物理等资料进一步约束。

(2) 卡罗琳海底高原俯冲的地质效应?

全球广泛分布有大量的海底高原和海山链, 但靠近俯冲带并与俯冲带已经发生相互作用的主要位于太平洋地区, 例如翁通爪哇高原、科科斯脊、夏威夷-皇帝海山链和路易斯维尔海山链等^[90]。海底高原和海山链的成因通常与地幔柱有关, 相比于正常洋壳, 它们具有较厚的地壳、较轻的密度以及特殊的地球化学特征。前人研究表明靠近俯冲带的海底高原和海山链要么是以侧向增生的方式拼贴于大陆弧或成熟岛弧之上, 要么是俯冲到地幔

中^[91]。地球物理和数值模拟研究表明,海底高原和海山链是可以俯冲的,其俯冲不仅会影响俯冲区域的地形和地球物理特征,而且会对岛弧及弧后盆地熔岩的地球化学特征产生影响^[92-93]。卡罗琳海底高原具有较厚的地壳厚度和较轻的密度,其成因与卡罗琳地幔柱有关^[41, 94]。研究表明卡罗琳高原和雅浦弧大约在 21 Ma 发生碰撞,导致了帕里西维拉海盆南部东半部分仰冲到了雅浦弧之上,同时导致了雅浦俯冲带形成了一系列独特的特点,如较短的沟弧间距、雅浦弧火山活动较少、地震活动较少、俯冲速率较低(小于 1 cm/a)^[39, 41-42, 53-54]。最近的地球物理研究表明,卡罗琳高原的一部分已经俯冲到雅浦弧之下的地幔中^[95],但是对于卡罗琳高原俯冲对雅浦弧及其弧后盆地(帕里西维拉海盆南部)熔岩的影响仍缺乏研究。卡罗琳高原的富集组分以及卡罗琳高原之下的太平洋型 MORB 地幔源区对雅浦弧及弧后盆地的影响仍需要进一步研究。

(3)海底高原的裂解动力学过程?

索罗尔海槽位于卡罗琳海底高原内(图 2),分开卡罗琳群岛脊和西卡罗琳隆起,它地处西太平洋地区三大板块的联接处,构造演化活动强烈且复杂,因而研究索罗尔海槽的活动时代和张裂机制对于理解三大板块中新世以来的构造演化和相互作用有着重要意义。早期对索罗尔海槽的研究认为其性质为消亡的弧间盆地,之后的研究推测索罗尔海槽属于活跃的斜向拉张转换系统,兼具伸展和走滑的特征^[26, 32, 59]。卡罗琳高原是地幔柱成因的说法得到地球物理学和岩石学研究的支持后,索罗尔海槽的成因便更为复杂^[28, 34, 41]。索罗尔海槽作为卡罗琳海底高原裂解的产物,其地球物理特征符合 Campbell^[96]提出的海底高原形成及初始裂解的经典模型:首先,地幔柱上涌导致大洋岩石圈底部发生高温熔融,大规模岩浆上涌喷出地表形成地壳较厚的海底高原;之后,大规模玄武岩的横向流动会使岩石圈处于拉张应力作用下,导致海底高原内部发生张裂形成新的洋壳^[41, 94]。另一方面,卡罗琳高原在中新世期间与雅浦海沟发生碰撞,碰撞过程可能导致沿海沟方向产生了垂直于卡罗琳脊走向的拉张应力^[37, 42, 97]。同时,雅浦海沟北部的马里亚纳俯冲带俯冲板片角度较陡,北部太平洋板块在俯冲过程中产生的较大俯冲拖曳力也可能导致在卡罗琳脊上产生拉张的远场应力^[28]。因此,以上的多种因素均可能导致海底高原的裂解,而具体哪种因素占主导地位仍存在争议,但目前对索罗尔海槽的有关研究多局限于地球物理调查而缺乏岩石学证据。

因此对上述关键科学问题和有关争议的回答可通过系统的钻探取样实现,今后可利用索罗尔海槽内基底岩石样品的各项地球化学特征,探究海底高原裂解形成海槽的形成时代及深部动力学背景,从而为索罗尔海槽的演化机制提供地球化学制约。

(4)帕劳沟-弧系统的起源与构造演化历史?

帕劳群岛区域的岩石年代学数据显示其岩浆作用的起始时间较晚,目前其最古老的岩石年龄为 37.7 Ma^[66],而其岩浆活动一直持续至 20 Ma 左右^[98],而基于 IODP-U1438 站位在 KPR 北部弧后所获取的古 IBM 弧基底年龄为 48.7 Ma^[99],并且传统观念所认为的 KPR 主体(古 IBM 弧残余)的岛弧岩浆活动伴随着古 IBM 弧裂解与东侧四国海盆及帕里西维拉海盆的打开在 25 Ma 左右已经停止^[17]。此外,帕劳海沟具有极深的水深(8080 m)与极短的沟-弧轴线间距(35 km),而其现今的板块汇聚速率仅为 3 mm/a,没有明显的火山与地震活动^[68]。前人模型中普遍认为帕劳沟-弧系统曾是 IBM 俯冲系统的重要组成部分,是在后期太平洋板片俯冲后撤的过程中受到了负浮力的卡罗琳高原俯冲阻碍的影响而逐渐与 IBM 俯冲系统分离^[98]。然而,帕劳区域所表现出的岩石年龄特征却与 IBM 俯冲系统之间存在明显的不耦合关系,帕劳的岩浆活动起始及持续时间相对更晚,其确切的岛弧岩浆活动究竟起源于何时?极短的沟弧间距可能预示着地质历史上该区域存在着强烈的俯冲侵蚀,而其海沟中可能保留有过去俯冲板片的重要信息。迄今为止,我们对帕劳海沟的了解相对较少,早期主要由日本研究团队对其开展了部分观测与取样工作^[68-69]。未来需要在该区域进一步开展地质与地球物理探测,通过多种方法与手段联用以揭示其深部结构与物质组成,为西太平洋边缘沟-弧系统的构造演化提供更完整的佐证与重要线索。

参考文献 (References)

- [1] Li S Z, Yu S, Zhao S J, et al. Tectonic transition and plate reconstructions of the east Asian continental margin[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2013, 33(3): 65-94.
- [2] Yan Q S, Metcalfe I, Shi X F, et al. Early Cretaceous granitic rocks from the southern Jiaodong Peninsula, eastern China: implications for lithospheric extension[J]. *International Geology Review*, 2019, 61(7): 821-838.
- [3] Yan Q S, Shi X F, Yuan L, et al. Tectono-magmatic evolution of the Philippine Sea Plate: A review[J]. *Geosystems and Geoenvironment*, 2022, 1(2): 100018.
- [4] 石学法, 鄒全树. 西太平洋典型边缘海盆的岩浆活动[J]. *地球科学*

- 进展, 2013, 28(7): 737-750. [SHI Xuefa, YAN Quanshu. Magmatism of typical marginal basins (or back-arc basins) in the West Pacific[J]. *Advances in Earth Science*, 2013, 28(7): 737-750.]
- [5] Niu Y L, Liu Y, Xue Q Q, et al. Exotic origin of the Chinese continental shelf: new insights into the tectonic evolution of the western Pacific and eastern China since the Mesozoic[J]. *Science Bulletin*, 2015, 60(18): 1598-1616.
- [6] Xu Y, Yan Q S, Shi X F, et al. Discovery of Late Mesozoic volcanic seamounts at the ocean-continent transition zone in the Northeastern margin of South China Sea and its tectonic implication[J]. *Gondwana Research*, 2022, doi: 10.1016/j.gr.2022.04.003.
- [7] Sharp W D, Clague D A. 50-Ma initiation of Hawaiian-Emperor bend records major change in Pacific plate motion[J]. *Science*, 2006, 313(5791): 1281-1284.
- [8] Torsvik T H, Doubrovine P V, Steinberger B, et al. Pacific plate motion change caused the Hawaiian-Emperor Bend[J]. *Nature Communications*, 2017, 8(1): 15660.
- [9] Karig D E. Origin and development of marginal basins in the western Pacific[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1971, 76(11): 2542-2561.
- [10] Stern R J. Subduction zones[J]. *Reviews of Geophysics*, 2002, 40(4): 3-1-3-38.
- [11] Hilde T W C, Lee C S. Origin and evolution of the West Philippine Basin: a new interpretation[J]. *Tectonophysics*, 1984, 102(1-4): 85-104.
- [12] 李三忠, 索艳慧, 朱俊江, 等. 海沟系统研究的进展与前沿 [J]. *中国科学: 地球科学*, 2020, 50(12): 1874-1892. [LI Sanzhong, SUO Yanhui, ZHU Junjiang, et al. Advance and frontier of the research on trench system[J]. *Scientia Sinica Terrae*, 2020, 50(12): 1874-1892.]
- [13] Hickey - Vargas R. Origin of the Indian Ocean - type isotopic signature in basalts from Philippine Sea plate spreading centers: An assessment of local versus large - scale processes[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1998, 103(B9): 20963-20979.
- [14] Hall R. Cenozoic geological and plate tectonic evolution of SE Asia and the SW Pacific: computer-based reconstructions, model and animations[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2002, 20(4): 353-431
- [15] Yan Q S, Shi X F. Geological comparative studies of Japan arc system and Kyushu-Palau arc[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2011, 30(4): 107-121.
- [16] Seno T, Maruyama S. Paleogeographic reconstruction and origin of the Philippine Sea[J]. *Tectonophysics*, 1984, 102(1-4): 53-84.
- [17] Okino K, Ohara Y, Kasuga S, et al. The Philippine Sea: New survey results reveal the structure and the history of the marginal basins[J]. *Geophysical Research Letters*, 1999, 26(15): 2287-2290.
- [18] Shervais J W, Reagan M, Haugen E, et al. Magmatic response to subduction initiation: Part 1. Fore - arc basalts of the Izu - Bonin arc from IODP expedition 352[J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2019, 20(1): 314-338.
- [19] 吴时国, 范建柯, 董冬冬. 论菲律宾海板块大地构造分区 [J]. *地质科学*, 2013, 48(3): 677-692. [WU Shiguo, FAN Jianke, DONG Dongdong. Discussion on the tectonic division of the Philippine Sea Plate[J]. *Chinese Journal of Geology*, 2013, 48(3): 677-692.]
- [20] Engebretson D C, Cox A, Gordon R G. Relative motions between oceanic and continental plates in the Pacific basin[M]. *Geological Society of America*, 1985: 1-60.
- [21] Seton M, Müller R D, Zahirovic S, et al. Global continental and ocean basin reconstructions since 200Ma[J]. *Earth-Science Reviews*, 2012, 113(3-4): 212-270.
- [22] Nakanishi M, Tamaki K, Kobayashi K. A new Mesozoic isochron chart of the northwestern Pacific Ocean: Paleomagnetic and tectonic implications[J]. *Geophysical Research Letters*, 1992, 19(7): 693-696.
- [23] Flower M F J, Chung S L, Lo C H, et al. *Mantle Dynamics and Plate Interactions in East Asia*. Washington: American Geophysical Union, 1998: 67-88.
- [24] Jolivet L, Faccenna C, Becker T, et al. Mantle flow and deforming continents: From India - Asia convergence to Pacific subduction[J]. *Tectonics*, 2018, 37(9): 2887-2914.
- [25] Hall R, Ali J R, Anderson C D, et al. Origin and motion history of the Philippine Sea Plate[J]. *Tectonophysics*, 1995, 251(1-4): 229-250.
- [26] Weissel J K, Anderson R N. Is there a Caroline plate?[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1978, 41(2): 143-158.
- [27] Hegarty K A, Weissel J K. Complexities in the development of the Caroline Plate region, western equatorial Pacific[J]. *The Ocean Basins and Margins: The Pacific Ocean*. Boston: Springer, 1988: 277-301.
- [28] 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.
- [29] Bird P. An updated digital model of plate boundaries[J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2003, 4(3): 1027.
- [30] Müller R D, Sdrolias M, Gaina C, et al. Age, spreading rates, and spreading asymmetry of the world's ocean crust[J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2008, 9(4): Q04006.
- [31] Bracey D R. Reconnaissance geophysical survey of the Caroline Basin[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 1975, 86(6): 775-784.
- [32] Bracey D R, Andrews J E. Western Caroline Ridge: relic island arc?[J]. *Marine Geophysical Researches*, 1974, 2(2): 111-125.
- [33] 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.
- [34] 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.
- [35] 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.
- [36] Hill K C, Hegarty K A. New tectonic framework for PNG and the Caroline plate: implications for cessation of spreading in back-arc basins[C]//Pacific Rim 87. International Congress on the Geology, Structure, Mineralisation and Economics of Pacific Rim. Parkville: Australasian Inst. Mining Metallurgy, 1987: 179-182.
- [37] Fujiwara T, Tamura C, Nishizawa A, et al. Morphology and tectonics of the Yap Trench[J]. *Marine Geophysical Researches*, 2000, 21(1): 69-86.
- [38] Lee S M. Deformation from the convergence of oceanic lithosphere into Yap trench and its implications for early-stage subduction[J]. *Journal*

- al of *Geodynamics*, 2004, 37(1): 83-102.
- [39] 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.
- [40] 李三忠, 曹现志, 王光增, 等. 太平洋板块中—新生代构造演化及板块重建 [J]. *地质力学学报*, 2019, 25(5): 642-677. [LI Sanzhong, CAO Xianzhi, WANG Guangzeng, et al. Meso-Cenozoic tectonic evolution and plate reconstruction of the Pacific Plate[J]. *Journal of Geomechanics*, 2019, 25(5): 642-677.]
- [41] 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.
- [42] Ohara Y, Fujioka K, Ishizuka O, et al. Peridotites and volcanics from the Yap arc system: implications for tectonics of the southern Philippine Sea Plate[J]. *Chemical Geology*, 2002, 189(1-2): 35-53.
- [43] 瞿洪宝, 郑彦鹏, 刘晨光, 等. 晚始新世以来雅浦海沟-岛弧构造演化模式 [J]. *海洋科学进展*, 2017, 35(2): 249-257. [QU Hongbao, ZHENG Yanpeng, LI Chenguang, et al. Model of tectonic evolution for Yap Trench-Arc Since Late Eocene[J]. *Advances in Marine Science*, 2017, 35(2): 249-257.]
- [44] Yang Y M, Wu S G, Gao J W, et al. Geology of the Yap Trench: new observations from a transect near 10°N from manned submersible Jiaolong[J]. *International Geology Review*, 2018, 60(16): 1941-1953.
- [45] 张志毅, 韩喜彬, 许冬. 雅浦—马里亚纳海沟连接处地貌特征研究 [J]. *海洋学报*, 2022, 44(11): 63-76. [ZHANG Zhiyi, HAN Xibin, XU Dong. Geomorphological characteristics of the junction Yap Trench and Mariana Trench[J]. *Haiyang Xuebao*, 2022, 44(11): 63-76.]
- [46] Kinoshita M, Kasumi Y. Heat flow measurements in the Yap Trench area[J]. Preliminary report of Hakuho-maru Cruise KH87-3: Tokyo, The Ocean Research Institute, University of Tokyo, 1989: 136-143.
- [47] Sato T, Kasahara J, Katao H, et al. Seismic observations at the Yap Islands and the northern Yap Trench[J]. *Tectonophysics*, 1997, 271(3-4): 285-294.
- [48] 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.
- [49] Hawkins J, Batiza R. Metamorphic rocks of the Yap arc-trench system[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1977, 37(2): 216-229.
- [50] 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. Washington, DC, USA: American Geophysical Union, 1983: 281-293.
- [51] 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): 23-39.]
- [52] Beccaluva L, Macciotta G, Savelli C, et al. Geochemistry and K/Ar ages of volcanics dredged in the Philippine Sea (Mariana, Yap, and Palau trenches and Parece Vela Basin)[M]//Hayes D E. The Tectonic and Geologic Evolution of Southeast Asian Seas and Islands. Washington DC: American Geophysical Union, 1980: 247-268.
- [53] 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.
- [54] Shiraki K. Metamorphic basement rocks of Yap Islands, western Pacific: Possible oceanic crust beneath an island arc[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1971, 13(1): 167-174.
- [55] Matsuda J I, Zashu S, Ozima M. Sr isotopic studies of volcanic rocks from island arcs in the western Pacific[J]. *Tectonophysics*, 1977, 37(1-3): 141-151.
- [56] 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.
- [57] Sun S S, McDonough W F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes[J]. *Geological Society, London, Special Publications*, 1989, 42(1): 313-345.
- [58] Niu Y L, O'Hara M J. Origin of ocean island basalts: A new perspective from petrology, geochemistry, and mineral physics considerations[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2003, 108(B4): 2209.
- [59] Yuan L, Yan Q S. Source lithology and magmatic processes recorded in the mineral of basalts from the Parece Vela Basin[J]. *Acta Geologica Sinica - English Edition*, 2022, 96(6): 1991-2006.
- [60] Perfit M R, Fornari D J. Mineralogy and geochemistry of volcanic and plutonic rocks from the boundaries of the Caroline plate: Tectonic implications[J]. *Tectonophysics*, 1982, 87(1-4): 279-313.
- [61] Hawkins J W, Castillo P R. Early history of the Izu-Bonin-Mariana arc system: evidence from Belau and the Palau Trench[J]. *Island Arc*, 1998, 7(3): 559-578.
- [62] Hawkins J W, Ishizuka O. Petrologic evolution of Palau, a nascent island arc[J]. *Island Arc*, 2009, 18(4): 599-641.
- [63] 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.
- [64] Kumagai H, Kaneoka I, Ishii T. The active period of the Ayu Trough estimated from K-Ar ages: The southeastern spreading center of Philippine Sea Plate[J]. *Geochemical Journal*, 1996, 30(2): 81-87.
- [65] Park S H, Lee S M, Arculus R J. Geochemistry of basalt from the Ayu Trough, equatorial western Pacific[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2006, 248(3-4): 700-714.
- [66] Haston R, Fuller M, Schmidtke E. Paleomagnetic results from Palau, West Caroline Islands: a constraint on Philippine Sea plate motion[J]. *Geology*, 1988, 16(7): 654-657.
- [67] Haston R B, Fuller M. Paleomagnetic data from the Philippine Sea plate and their tectonic significance[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1991, 96(B4): 6073-6098.
- [68] Kobayashi K, Fujioka K, Fujiwara T, et al. Why is the Palau Trench so deep? Deep-sea trench without plate convergence[J]. *Proceedings of the Japan Academy, Series B*, 1997, 73(6): 89-94.
- [69] Fujiwara T, Tamaki K, Fujimoto H, et al. Morphological studies of the Ayu trough, Philippine sea—Caroline plate boundary[J]. *Geophysical*

- Research Letters*, 1995, 22(2): 109-112.
- [70] Cosca M, Arculus R, Pearce J, et al. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ and K-Ar geochronological age constraints for the inception and early evolution of the Izu-Bonin-Mariana arc system[J]. *Island Arc*, 1998, 7(3): 579-595.
- [71] Meijer A, Reagan M, Ellis H, et al. Chronology of volcanic events in the eastern Philippine Sea[M]//Hayes D E. The Tectonic and Geologic Evolution of Southeast Asian Seas and Islands. Washington DC: American Geophysical Union, 1983: 349-359.
- [72] Mason A. Military geology of the Palau Islands, Caroline Islands[J]. Rep. Intel. Div. Off. Engineer HQ, US Army (rear), 1956, 285.
- [73] Ishiwatari A, Yanagida Y, Li Y B, et al. Dredge petrology of the boninite - and adakite - bearing Hahajima Seamount of the Ogasawara (Bonin) forearc: An ophiolite or a serpentinite seamount?[J]. *Island Arc*, 2006, 15(1): 102-118.
- [74] Hong J K, Lee S M. Reflection seismology in the southern Ayu Trough, a slow-spreading divergent boundary[J]. *Ocean and Polar Research*, 2002, 24(3): 189-196.
- [75] Macdonald K C. Mid-ocean ridges: Fine scale tectonic, volcanic and hydrothermal processes within the plate boundary zone[J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 1982, 10(1): 155-190.
- [76] Lee S M, Kim S S. Vector magnetic analysis within the southern Ayu Trough, equatorial western Pacific[J]. *Geophysical Journal International*, 2004, 156(2): 213-221.
- [77] Zhang Z, Li S Z, Wang G Z, et al. Plate boundary processes of the Caroline Plate[J]. *Science China Earth Sciences*, 2022, 65(8): 1554-1567.
- [78] Hickey-Vargas R. Isotope characteristics of submarine lavas from the Philippine Sea: implications for the origin of arc and basin magmas of the Philippine tectonic plate[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1991, 107(2): 290-304.
- [79] Mrozowski C L, Hayes D E. The evolution of the Parece Vela basin, eastern Philippine Sea[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1979, 46(1): 49-67.
- [80] 俞恂, 陈立辉. 弧后盆地玄武岩的成分变化及其成因 [J]. *岩石学报*, 2020, 36(7): 1953-1972. [YU Xun, CHEN Lihui. Geochemical variation of back-arc Basin basalt and its genesis[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2020, 36(7): 1953-1972.]
- [81] 鄢全树, 袁龙, 石学法. 帕里西维拉海盆岩浆-构造过程及钻探建议 [J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2022, 42(5): 103-109. [YAN Quanshu, YUAN Long, SHI Xuefa. Magmatism and tectonic evolution of the Parece Vela Basin and the drilling proposal[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2022, 42(5): 103-109.]
- [82] Okino K, Ohara Y, Fujiwara T, et al. Tectonics of the southern tip of the Parece Vela Basin, Philippine Sea Plate[J]. *Tectonophysics*, 2009, 466(3-4): 213-228.
- [83] Nisbet E G, Pearce J A. Clinopyroxene composition in mafic lavas from different tectonic settings[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1977, 63(2): 149-160.
- [84] Weissel J K, Karner G D. Flexural uplift of rift flanks due to mechanical unloading of the lithosphere during extension[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1989, 94(B10): 13919-13950.
- [85] Heezen BC, Fischer AG, Boyce RE, et al. Initial reports of the deep sea drilling project, 57[M]. Washington DC: US Government Printing Office, 1971, 6: 493-537.
- [86] Yan S S, Yan Q S, Shi X F, et al. The dynamics of the Sorol Trough magmatic system: Insights from bulk - rock chemistry and mineral geochemistry of basaltic rocks[J]. *Geological Journal*, 2022, 57(10): 4074-4089.
- [87] 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.
- [88] Hegarty K A, Weissel J K, Hayes D E. Convergence at the Caroline-Pacific plate boundary: collision and subduction[M]// Hayes K A. The Tectonic and Geologic Evolution of Southeast Asian Seas and Islands. Washington DC: American Geophysical Union, 1983: 326-348.
- [89] Seton M, Müller R D, Zahirovic S, et al. A global data set of present - day oceanic crustal age and seafloor spreading parameters[J]. *Geochimistry, Geophysics, Geosystems*, 2020, 21(10): e2020GC009214.
- [90] 鄢全树, 石学法. 无震脊或海山链俯冲对超俯冲带处的地质效应 [J]. *海洋学报*, 2014, 36(5): 107-123. [YAN Quanshu, SHI Xuefa. Geological effects of aseismic ridges or seamount chains subduction on the supra-subduction zone[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2014, 36(5): 107-123.]
- [91] Tetreault J L, Buiter S J H. Geodynamic models of terrane accretion: Testing the fate of island arcs, oceanic plateaus, and continental fragments in subduction zones[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2012, 117(B8): B08403.
- [92] Barazangi M, Isacks B L. Spatial distribution of earthquakes and subduction of the Nazca plate beneath South America[J]. *Geology*, 1976, 4(11): 686-692.
- [93] Van Hunen J, Van Den BERG A P, Vlaar N J. On the role of subducting oceanic plateaus in the development of shallow flat subduction[J]. *Tectonophysics*, 2002, 352(3-4): 317-333.
- [94] Jackson M G, Price A A, Blichert-Toft J, et al. Geochemistry of lavas from the Caroline hotspot, Micronesia: Evidence for primitive and recycled components in the mantle sources of lavas with moderately elevated $^3\text{He}/^4\text{He}$ [J]. *Chemical Geology*, 2017, 455: 385-400.
- [95] 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.
- [96] Campbell I H. The mantle's chemical structure: insights from the melting products of mantle plumes[M]//Jackson I. The Earth's Mantle: Composition, Structure, and Evolution. Cambridge: Cambridge University Press, 1998: 259-310.
- [97] 张吉, 张国良. 雅浦岛弧变质岩成因和构造环境研究 [J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2018, 38(4): 71-82. [Zhang J, Zhang G L. Origin and tectonic setting of metamorphic rocks in the Yap Island Arc[J]. *Marine Geology and Quaternary Geology*, 2018, 38(4): 71-82.]
- [98] Kobayashi K. Origin of the Palau and Yap trench-arc systems[J]. *Geophysical Journal International*, 2004, 157(3): 1303-1315.
- [99] Ishizuka O, Hickey-Vargas R, Arculus R J, et al. Age of Izu-Bonin-Mariana arc basement[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2018, 481: 80-90.