



帕里西维拉海盆岩浆-构造过程及钻探建议

鄢全树, 袁 龙, 石学法

Magmatism and tectonic evolution of the Parece Vela Basin and the drilling proposal

YAN Quanshu, YUAN Long, and SHI Xuefa

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16562/j.cnki.0256-1492.2022062003>

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

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.

帕里西维拉海盆岩浆-构造过程及钻探建议

鄢全树^{1,2}, 袁龙¹, 石学法^{1,2}

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. 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

摘要: 揭示位于太平洋板块、欧亚板块与印澳板块之间的菲律宾海板块的地质演化是理解西太平洋沟-弧-盆体系形成演化的重要一环。隶属于菲律宾海板块的帕里西维拉海盆及其北侧的万国海盆, 是菲律宾海板块发生第二次扩张的产物, 记录了菲律宾海板块生长、太平洋板块西向俯冲消减的过程及弧后扩张的重要信息。基于前人研究成果, 综述了帕里西维拉海盆的地质与地球物理特征, 并将其分为 4 个区域: 东区、西区、南区及中央裂谷区。其中: (1) 东区的沉积物较厚 (最厚达 3 500 m), 地形较为平滑, 未能识别出磁异常条带, 基底熔岩具有类似于弧后盆地玄武岩的微量元素特征和印度洋型 MORB (洋中脊玄武岩) 的同位素特征。(2) 西区的沉积物较薄, 地形较为复杂, 可识别出 10-5D 号磁异常条带, 海底熔岩的特点类似于东区。(3) 南区地形复杂, 海山、裂谷、丘陵等海底组构相间分布, 可进一步分为 5 个次级单元, 无磁异常条带, 其基底熔岩具有类似于 N (正常) -MORB 和 IAB (岛弧玄武岩) 之间的微量元素特征和印度洋型 MORB 的同位素特征。(4) 裂谷区, 沉积物较薄, 广泛分布了折离断层和核杂岩, 水深较深 (最深处超过 7 500 m), 该区域同时出露有肥沃型橄榄岩和难熔型橄榄岩。最后, 本文建议了 8 个钻孔站位, 以解决该海盆尚存的一些有关构造-岩浆过程、深部地幔过程、俯冲带过程及沉积古环境方面的重要的基础科学问题。

关键词: 海底扩张; 核杂岩; 地幔源区性质; 俯冲过程; 帕里西维拉海盆

中图分类号: P736.11

文献标识码: A

DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2022062003

Magmatism and tectonic evolution of the Parece Vela Basin and the drilling proposal

YAN Quanshu^{1,2}, YUAN Long¹, SHI Xuefa^{1,2}

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

2. Laboratory for Marine Geology, Qingdao National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao 266237, China

Abstract: Studying the geological evolution of the Philippine Sea Plate (PSP) is the key to understand the formation and evolution of the trench-arc-basin systems in the West Pacific region. The Parece Vela Basin (PVB) and the Shikuko Basin are formed during the second spreading epoch of the western Pacific back-arc system, during which important information about the growth of the Philippine Sea Plate and westward subduction process of the Pacific Plate beneath the PSP is recorded. In this study, the geological and geophysical characteristics of PVB and subdivided the basin into four sub-units are summarized. In the eastern sub-unit, the sediment is thin and the seafloor topography is complex, and the observed magnetic anomalies range from 10 to 5D. The submarine lavas from the sub-unit have similar trace element characteristics to those of back-arc basin basalts and so in isotope imprint to those of the Indian Ocean type MORB (mid-oceanic ridge basalt). In the western sub-unit, the sediment is thick (up to 3 500 m), the seafloor topography is smooth, the magnetic anomalies are not recognizable, and the compositions of the submarine lavas of the sub-unit are similar to those of the eastern sub-unit. The southern sub-unit, composed by seamounts, rifts, and hills, exhibits a complex morphology. The magnetic anomalies are not recognizable. The lavas from the sub-unit have transitional trace element characteristics between N(normal)-MORB and IAB (island arc basalt), and isotopic features of the Indian Ocean type MORBs (similar to the eastern and western sub-units). In the rift sub-unit, the sediment is thin, the seafloor topography is composed of detachment faults and oceanic core complexes, and the water depth of seafloor can reach up to 7 500 m. There occurred some residual fertile peridotite, and refractory peridotite as well. Finally, we proposed 8 possible drilling sites in the PVB in attempt to solve some key scientific issues related to tectonic, magmatic, deep mantle, sedimentation, and subduction processes.

资助项目: 青岛海洋科学与技术试点国家实验室山东省专项经费项目“俯冲带岩浆活动与构造约束”(2022QNLMO50201-3); 国家自然科学基金“海底岩石学”(41322036); 山东省泰山学者建设工程项目。

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

收稿日期: 2022-06-20; **改回日期:** 2022-06-30. 文凤英编辑

系列重要的认识^[11, 17]。研究表明, 帕里西维拉海盆在地形上具有东西不对称的特征, 其基底熔岩具有类似于弧后盆地玄武岩(BABB)的微量元素特点和印度洋型 MORB 的同位素特征^[6, 18]。然而, 帕里西维拉海盆还存在一系列的科学问题亟待解决, 比如, 帕里西维拉扩张动力学过程、深部地幔源区性质, 扩张后海山及核杂岩成因机制, 以及该海盆的沉积过程与古海洋古气候演化等, 还不是很清晰。本文在总结前人对于该海盆研究成果的基础上, 提出了目前尚存在的重要科学问题以及未来可能的钻探位置建议。

1 主要单元地质与地球物理特征

菲律宾海是西太平洋最大的边缘海之一, 面积约为 540 万 km², 位于欧亚板块、印度-澳大利亚板块和太平洋板块的交互处(图 1), 构造背景非常复杂, 地质现象丰富, 是研究和观测现代海底俯冲带过程的天然实验室^[6, 11]。菲律宾海板块的东部和南部依次为伊豆-小笠原-马里亚纳海沟、雅浦海沟、

帕劳海沟和阿玉海槽, 菲律宾海板块的北部边界为东侧的南开(Nankai)海槽和西侧的琉球海沟, 该板块西侧为菲律宾海沟^[19]。基于构造重建, Hall^[20]阐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, 在运动的过程中形成了西菲律宾海盆并伴随原(proto)伊豆-小笠原-马里亚纳岛弧的裂解作用。30~15 Ma, 原伊豆-小笠原-马里亚纳岛弧发生裂解形成了帕里西维拉海盆和四国海盆。11 Ma, 伊豆-小笠原-马里亚纳岛弧的岩浆活动再次活跃。5 Ma 左右, 随着伊豆-小笠原-马里亚纳海沟向太平洋板块方向的继续后撤, 导致了马里亚纳海槽的打开, 并活动至今^[20-21]。

帕里西维拉海盆是菲律宾海板块的重要组成部分, 位于九州-帕劳脊的东部, 以索夫干断裂与北侧的四国海盆分开, 南部边界为马里亚纳弧和雅浦岛弧, 东界为西马里亚纳脊(图 2)。帕里西维拉海盆呈狭长型, 南北长约 1 900 km, 东西宽 700 km, 平均水深为 4 500~5 500 m, 盆地中部为已经停止活动的帕里西维拉裂谷, 水深最深处超过 7 500 m。前人

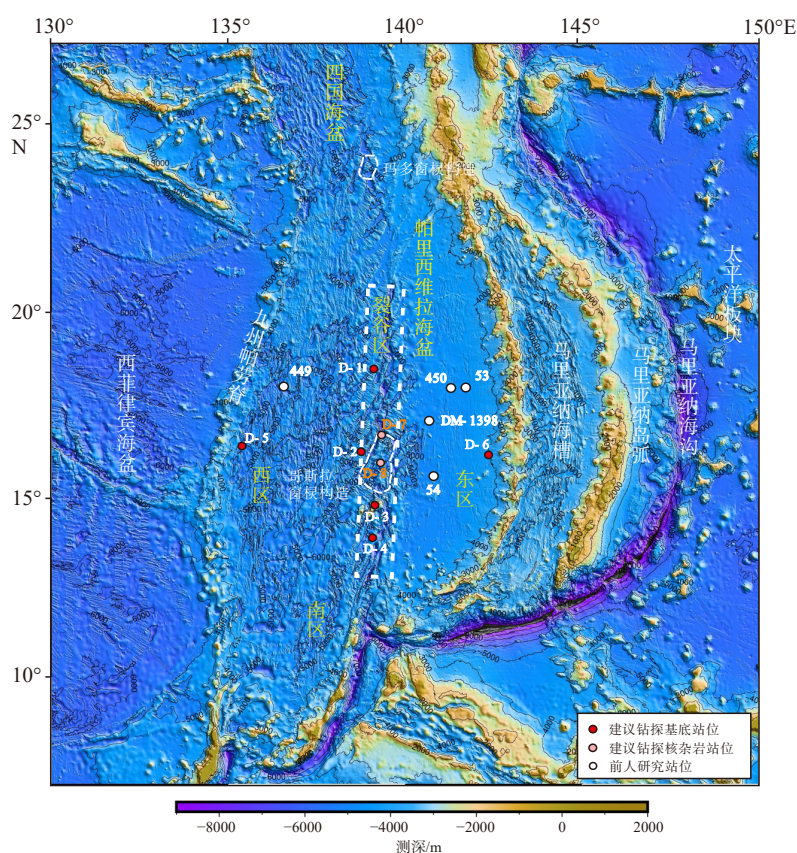


图 2 帕里西维拉海盆地质及建议钻探位置图

前人研究的站位数据源自文献 [6, 10, 22]。窗棂构造位置数据源自 [23-24]。

Fig.2 Geology and proposed drilling positions (red and orange dots) in the Parece Vela Basin

Data for previous drilling sites are from references [6, 10, 22]. Data for mullion structures are from references [23-24].

研究指出帕里西维拉海盆与四国海盆、马里亚纳海槽类似,是原伊豆-小笠原-马里亚纳俯冲带向海一侧后撤诱发的弧后扩张所形成的^[11, 13, 25]。帕里西维拉海盆的扩张历史可以分为两个阶段,分别为第一阶段的東西向裂谷作用和海底扩张作用(开始于26 Ma左右),全扩张速率约为8.8 cm/a;第二阶段发生了逆时针的旋转,扩张轴的延伸方向由南北向变为北西-南东向,全扩张速率约为7.0 cm/a^[26-29]。靠近帕里西维拉裂谷破碎带区域分布有一系列雁列式较短的一级构造片段,扩张停止的时间约为12 Ma^[28]。

基于地质与地球物理学特征,本文将帕里西维拉海盆分为4个区域,分别为东区、西区、南区和裂谷区(图2)。其中,西区为帕里西维拉海盆中央裂谷以西至九州-帕劳脊的区域,东区为帕里西维拉海盆中央裂谷以东至西马里亚纳脊,裂谷区为帕里西维拉海盆的遗迹扩张中心区域,南区范围为北雅浦陡崖(North Yap Escarpment)以南至雅浦弧(图2)^[30]。下面分别阐述这4个区域的地质与地球物理特征。

1.1 帕里西维拉海盆西区

帕里西维拉海盆西区的沉积物厚度较薄,大约为110 m,沉积物类型主要为远洋黏土、放射虫软泥和超微化石软泥。西区的地形比较复杂,有大量南北向排列的海山和深谷相间分布,在靠近九州-帕劳脊附近呈现凹陷的裂谷地形(图2)。帕里西维拉海盆的扩张速率约为7.7~8 cm/a^[30]。西区中可以观测到振幅极小的磁异常,通常小于150 γ ,磁异常条带为5D-10(17~30 Ma),其中7-10号磁异常比较明显(7-10磁异常条带的波长较长不容易被后来的侵入体或者磁化的地形所掩盖),5D或5E的磁异常条带存在不确定性,这可能与扩张末期靠近扩张轴的洋脊跳跃有关^[31-32]。DSDP449站位位于该区(图2),钻取了151.1 m,共获得岩心93.4 m,其中上部110 m为沉积层(远洋黏土、放射虫软泥和超微化石软泥),下部41.1 m为枕状玄武岩和玄武岩熔岩流^[17]。该区域的海底熔岩为玄武岩,具有类似于弧后盆地玄武岩(BABB)的微量元素特征和类似于印度洋型MORB的同位素特征^[6, 33-34]。

1.2 帕里西维拉海盆东区

帕里西维拉海盆东区的沉积物较厚,厚度从西马里亚纳脊附近的3500 m向西递减到100 m左右,沉积物主要为远洋黏土和晚渐新世—晚中新世的火山碎屑,这些火山碎屑物质可能为西马里亚纳

脊的火山活动的产物^[32]。东区的地形比较平滑,未能识别出明显的磁异常,可能与沉积层较厚有关,水深约为4500~5500 m^[11, 32]。东区现有3个钻孔站位(DSDP 53、54、450)和一个拖网站位(DM-1398)获取到了底质样品(图2)。DSDP 53站位的底部(约193 m)为侵入的火山岩体,上覆有远洋黏土、放射虫软泥和火山灰;DSDP 54站位在海底之下292 m处发现了玄武岩熔岩流,上覆有火山灰层。DSDP 450站位成功钻到了海水-沉积物界面之下340 m,上部33 m为沉积层,包括远洋黏土、玻屑凝灰岩以及细粒的玻屑凝灰岩,最下部7 m为枕状玄武岩,中部为火山玻璃凝灰岩^[17]。基于底部玄武岩和上覆沉积物的接触关系的情况,说明仅有DSDP 54站位最下方的玄武岩可以代表基底。DM-1398站位获得了大量的海底熔岩样品,它们均为亚碱性玄武岩和辉长岩^[22]。东区的海底熔岩具有类似于弧后盆地玄武岩(BABB)的微量元素特征和类似于印度洋型MORB的同位素特征^[6, 33-34]。

1.3 帕里西维拉海盆南区

帕里西维拉海盆南区的构造特征比较复杂(图2),海山、裂谷、丘陵等海底地貌单元相间分布,根据构造形态前人将其分为5个次级单元(A、B、C、D、E)^[35]。A单元靠近雅浦岛弧,广泛分布有北西-南东向的丘陵,可能是帕里西维拉海盆第二阶段海底扩张的产物;B单元位于A单元西侧,与帕里西维拉海盆主体相连,该单元存在大量南北向展布的深海丘陵,可能是第一阶段海底扩张的产物;C单元位于B单元东南侧,广泛发育北东-南西西向展布的深海丘陵,可能是海底扩张与裂谷体系相互作用的产物;D单元位于帕里西维拉海盆最南端,广泛分布有线性和圆锥形的海山;E单元位于B单元西南侧、靠近九州帕劳脊的位置,该单元分布有两个半月形深水裂谷,深度分别为6100和5500 m^[35]。南区未能识别出磁异常条带,水深范围为5200~500 m,水深从北向南逐渐变浅^[35]。KH05-1-D1拖网站位取到了风化的枕状熔岩,可能为玻安岩或者岛弧拉斑玄武岩^[35-36]。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,获得了多个站位的玄武岩样品。结果表明,帕里西维拉海盆南部玄武岩具有类似于N-MORB和IAB之间的微量元素特征和印度洋型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^[18]。帕里西维拉海盆南部的东半部已缺失,其缺失的原因仍存在争议,目前有两

种观点, 一个是通过转换断层迁移到现今西马利亚纳弧西侧^[31, 35], 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雅浦弧地壳之上^[30, 37]。

1.4 裂谷区

帕里西维拉海盆裂谷区是指已经停止活动的扩张中心区域(图 2), 其沉积物较薄, 小于 100 m。裂谷区的水深相对较深, 最深处超过了 7 500 m。裂谷区地形比较复杂, 分布了大量的拆离断层、裂谷片段和核杂岩。每一个裂谷段都可以识别出窗棂构造, 被解释为岩浆供给不足环境下大洋拆离断层的下盘^[28]。在北纬 16°附近发现了一个巨大的窗棂构造, 被称为哥斯拉(Godzilla)窗棂构造(图 2), 它是世界上已知的最大的窗棂构造, 比中大西洋中脊窗棂构造大了十多倍^[28]。前人通过拖网和 ROV (Remote Operated Vehicle, 遥控无人潜水器)等取样技术在帕里西维拉裂谷获得了大量的蛇纹石化橄榄岩和辉长岩样品。这些橄榄岩分为 3 种类型, 分别为 F 型(方辉橄榄岩)、P 型(含斜长石的方辉橄榄岩和纯橄岩型的方辉橄榄岩)和 D 型(纯橄岩)^[28, 38]。帕里西维拉裂谷橄榄岩最突出的特征是小尺度的肥沃型橄榄岩和难熔型橄榄岩的混合, 其中肥沃型的橄榄岩是地幔橄榄岩经历低程度部分熔融(4%)的残余, 纯橄岩和含斜长石的橄榄岩是不同比例熔体-地幔相互作用的产物^[28, 38]。

2 科学问题及钻探建议

尽管前人对帕里西维拉海盆进行了相应的研究, 但是相较于菲律宾海板块中研究程度较高的西菲律宾海盆和马里亚纳海槽, 帕里西维拉海盆的研究程度较浅, 样品数量较少^[39]。因此, 帕里西维拉海盆仍存在如下几个亟待解决的关键科学问题:

(1) 帕里西维拉海盆扩张动力学过程。帕里西维拉海盆扩张停止的时间也存在争议, 一部分学者基于磁异常条带认为帕里西维拉海盆海底扩张停止的时间为 17 Ma^[31], 一部分学者基于磁异常条带和扩张速率认为海底扩张停止的时间为 12 Ma^[28], 另一部分学者基于帕里西维拉裂谷的核杂岩数据推断扩张停止的时间为 7.9 Ma^[23]。上述观点都是基于地球物理资料得到的, 缺少相应的基底玄武岩的 K-Ar/Ar-Ar 等高精度年龄数据。因此, 建议在帕里西维拉海盆布置 D-1、D-2、D-4 站位来获取相应的基底岩石样品(图 2)。这 3 个站位都是在帕里西维

拉海盆西半部分靠近扩张轴的位置, 这些位置的样品代表了帕里西维拉海盆弧后扩张活动晚期的产物, 同时这些位置远离西马利亚纳脊, 其沉积层较薄(明显低于东半部分的沉积物厚度), 比较容易钻取到基底岩石样品。同时分别在靠近九州-帕劳脊和西马利亚纳脊处布置 D-5 和 D-6 站位, 通过获取的基底岩石样品来限定帕里西维拉海盆开始扩张的时间。

(2) 海盆之下的地幔源区性质探讨。由于基底岩石样品缺乏, 帕里西维拉海盆的地幔源区性质不清楚, 帕里西维拉海盆的地幔是否存在不均一性仍不清楚。我们建议布置 D-1、D-2、D-4 站位来研究帕里西维拉海盆活动晚期的地幔性质及其地幔性质在纬度上是否存在不均一性(图 2)。D-2、D-5、D-6 站位的设置, 主要是为了研究帕里西维拉海盆海底扩张从早期到晚期演化过程中地幔源区性质的变化, 以及受俯冲组分影响程度是否与距离扩张中心距离有关。其中 D-5 和 D-6 的位置远离扩张轴, 钻取的样品代表弧后扩张早期的产物; D-2 靠近扩张轴, 钻取的样品代表弧后扩张晚期的产物。

(3) 帕里西维拉海盆轴部少量海山的成因机制。帕里西维拉海盆属于西太平洋第二扩张幕的弧后盆地, 其扩张时代与四国海盆、南海、苏禄海、日本海和鄂霍次克海相一致。在同时代的弧后盆地中南海和四国海盆的扩张中心处也分布有一系列的海山, 但是它们的成因和形成年龄有较大的差别^[29, 40-42]。南海扩张轴附近的海山是在南海停止扩张之后 5 Ma 出现的, 其成因机制与海南地幔柱有关; 四国海盆轴部的 Kinan 海山链是在海底扩张停止之后马上就形成的, 可能是受到了 EM1 组分的影响^[29, 40-42]。帕里西维拉海盆轴部海山的成因是类似于四国海盆的 Kinan 海山链还是南海扩张期后的海山还需要进一步研究。因此, D-3 站位选定在帕里西维拉海盆轴部最大的一个海山上(图 2), 该海山顶部相对平坦, 水深较浅(约为 2 060 m), 有利于获得更多的海山样品来研究其成因机制。

(4) 帕里西维拉海盆内核杂岩的成因机制。大洋核杂岩是指在构造拉张应力的作用下, 地壳深部和上地幔物质发生去顶、抬升而形成的穹隆状构造岩石组合^[43-44]。与拆离断层和大洋核杂岩有关的洋脊不对称扩张模式丰富和完善了海底扩张的新模式。大洋核杂岩和拆离断层主要分布于岩浆供给不充足的慢速和超慢速扩张脊, 例如大西洋中脊、中印度洋中脊、东南印度洋脊和西南印度洋脊。Akizawa 等^[24]在四国海盆发现了玛多(Mado)窗棂

构造和核杂岩,并指出在该窗根构造处的大洋核杂岩在岩性和成分上类似于慢速-超慢速扩张洋中脊^[24,45-48]。前人通过高精度的测深学研究,在帕里西维拉裂谷中部发现了巨大的哥斯拉(Godzilla)窗根构造和核杂岩,出露的岩石类型主要为蛇纹石化橄榄岩和辉长岩^[21]。帕里西维拉裂谷处的哥斯拉窗根构造是全球已发现最大的窗根构造,同时帕里西维拉扩张中心是少数中等扩张速率的洋中脊,对完善海底扩张理论具有重要的研究意义^[21,28]。但是目前仅有少量的拖网和ROV站位对该区域进行了调查取样,缺少相应的海底钻探站位来研究大洋岩石圈的组成和演化过程。同时,由于拆离断层的存在,帕里西维拉海盆的洋壳直接暴露在海底,有利于取样。因此,我们建议在哥斯拉窗根构造处布置2个钻探站位(D-7和D-8站位),来获取帕里西维拉海盆洋壳的岩心样品(图2),通过研究获取的样品来探讨该核杂岩的成因机制。

(5)沉积过程及古海洋古气候演化。帕里西维拉海盆是一典型边缘海盆,以IBM弧与开放大洋分割开来,其沉积物记录了丰富的地质作用信息,具有独特的地质意义。对上述建议钻探位置获取的沉积物样品开展研究,有助于理解该海盆的沉积过程、物源信息以及周围地质单元的岩浆活动规律,并可恢复古海洋、古环境及古气候演化历史。

参考文献(References)

- [1] 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.
- [2] Meade B J. Present-day kinematics at the India-Asia collision zone [J]. *Geology*, 2007, 35(1): 81-84.
- [3] Whittaker J M, Müller R D, Leitchenkov G, et al. Major Australian-Antarctic plate reorganization at Hawaiian-Emperor bend time [J]. *Science*, 2007, 318(5847): 83-86.
- [4] Najman Y, Appel E, Boudagher-Fadel M, et al. Timing of India-Asia collision: geological, biostratigraphic, and palaeomagnetic constraints [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2010, 115(B12): B12416.
- [5] Torsvik T H, Doubrovine P V, Steinberger B, et al. Pacific plate motion change caused the Hawaiian-Emperor Bend [J]. *Nature Communications*, 2017, 8: 15660.
- [6] 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*, 1998, 103(B9): 20963-20979.
- [7] Hickey-Vargas R. Basalt and tonalite from the Amami Plateau, northern West Philippine Basin: new early Cretaceous ages and geochemical results, and their petrologic and tectonic implications [J]. *Island Arc*, 2005, 14(4): 653-665.
- [8] Savov I P, Hickey-Vargas R, D'antonio M, et al. Petrology and geochemistry of West Philippine Basin basalts and Early Palau-Kyushu arc volcanic clasts from ODP Leg 195, Site 1201D: implications for the early history of the Izu-Bonin-Mariana Arc [J]. *Journal of Petrology*, 2006, 47(2): 277-299.
- [9] Reagan M K, Ishizuka O, Stern R J, et al. Fore-arc basalts and subduction initiation in the Izu-Bonin-Mariana system [J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2010, 11(3): Q03X12.
- [10] Yuan L, Yan Q S, Liu Y G, et al. *In situ* geochemical compositions of the minerals in basaltic rocks from the West Philippine Basin: constraints on source lithology and magmatic processes [J]. *Lithosphere*, 2020, 2020(1): 8878501.
- [11] 石学法, 鄢全树. 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.]
- [12] 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.
- [13] Karig D E. Origin and development of marginal basins in the western Pacific [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1971, 76(11): 2542-2561.
- [14] 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.
- [15] Ishizuka O, Taylor R N, Ohara Y, et al. Upwelling, rifting, and age-progressive magmatism from the Oki-Daito mantle plume [J]. *Geology*, 2013, 41(9): 1011-1014.
- [16] Deschamps A, Lallemand S. The West Philippine Basin: an Eocene to early Oligocene back arc Basin opened between two opposed subduction zones [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2002, 107(B12): 2322.
- [17] Kroenke L, Scott R, Balshaw K, et al. Initial Reports of DeepGSea Drilling Project Leg 59[M]. Washington DC: US Government Printing Office, 1980, 321-483.
- [18] 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, doi: 10.1111/1755-6724.14937.
- [19] 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.
- [20] 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.
- [21] 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.
- [22] Dietrich V, Emmermann R, Oberhänsli R, et al. Geochemistry of basaltic and gabbroic rocks from the West Mariana Basin and the Mariana trench [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1978, 39(1): 127-

- 144.
- [23] Tani K, Dunkley D J, Ohara Y. Termination of backarc spreading: zircon dating of a giant oceanic core complex [J]. *Geology*, 2011, 39(1): 47-50.
- [24] Akizawa N, Ohara Y, Okino K, et al. Geochemical characteristics of back-arc Basin Lower crust and Upper mantle at final spreading stage of Shikoku Basin: an example of Mado Megamullion [J]. *Progress in Earth and Planetary Science*, 2021, 8(1): 65.
- [25] 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.]
- [26] Okino K, Kasuga S, Ohara Y. A new scenario of the Parece Vela Basin genesis [J]. *Marine Geophysical Researches*, 1998, 20(1): 21-40.
- [27] Ohara Y, Yoshida T, Kato Y, et al. Giant megamullion in the Parece Vela Backarc Basin [J]. *Marine Geophysical Researches*, 2001, 22(1): 47-61.
- [28] Ohara Y, Fujioka K, Ishii T, et al. Peridotites and gabbros from the Parece Vela backarc Basin: unique tectonic window in an extinct back-arc spreading ridge [J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2003, 4(7): 8611.
- [29] Ishizuka O, Yuasa M, Taylor R N, et al. Two contrasting magmatic types coexist after the cessation of back-arc spreading [J]. *Chemical Geology*, 2009, 266(3-4): 274-296.
- [30] 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.
- [31] 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.
- [32] 殷征欣, 李正元, 沈泽中, 等. 西太平洋帕里西维拉海盆不对称性发育特征及其成因[J]. *吉林大学学报:地球科学版*, 2019, 49(1): 218-229. [YIN Zhengxin, LI Zhengyuan, SHEN Zezhong, et al. Asymmetric geological developments and their geneses of the Parece Vela Basin in western Pacific Ocean [J]. *Journal of Jilin University:Earth Science Edition*, 2019, 49(1): 218-229.]
- [33] Fryer P, Sinton J M, Philpotts J A. Basaltic glasses from the Mariana trough[M]//Initial Reports of the Deep Sea Drilling Project, 60. Washington: US Government Printing Office, 1981, doi: 10.2973/dsdp.proc.60.132.1982.
- [34] Stolper E, Newman S. The role of water in the Petrogenesis of Mariana trough magmas [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1994, 121(3-4): 293-325.
- [35] 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.
- [36] 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.
- [37] 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.
- [38] Ohara Y, Okino K, Snow J E, et al. Preliminary report of Kairei KR03-01 cruise: Amagmatic tectonics and lithospheric composition of the Parece Vela Basin [J]. *InterRidge News*, 2003, 12(1): 27-29.
- [39] 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.
- [40] Yan Q S, Straub S, Shi X F. Hafnium isotopic constraints on the origin of Late Miocene to Pliocene seamount basalts from the South China Sea and its tectonic implications [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2019, 171: 162-168.
- [41] Yan Q S, Shi X F, Castillo P R. The Late Mesozoic-Cenozoic tectonic evolution of the South China Sea: a petrologic perspective [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2014, 85: 178-201.
- [42] 鄢全树, 石学法. 海南地幔柱与南海形成演化[J]. *高校地质学报*, 2007, 13(2): 311-322. [YAN Quanshu, SHI Xuefa. Hainan mantle plume and the Formation and evolution of the South China Sea [J]. *Geological Journal of China Universities*, 2007, 13(2): 311-322.]
- [43] 李三忠, 吕海青, 侯方辉, 等. 海洋核杂岩[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2006, 26(1): 47-52. [LI Sanzhong, LÜ Haiqing, HOU Fanghui, et al. Oceanic core complex [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2006, 26(1): 47-52.]
- [44] 余星, 初凤友, 董彦辉, 等. 拆离断层与大洋核杂岩: 一种新的海底扩张模式[J]. *地球科学:中国地质大学学报*, 2013, 38(5): 995-1004. [YU Xing, CHU Fengyou, DONG Yanhui, et al. Detachment fault and oceanic core complex: a new mode of seafloor spreading [J]. *Earth Science:Journal of China University of Geosciences*, 2013, 38(5): 995-1004.]
- [45] Basch V, Sanfilippo A, Sani C, et al. Crustal accretion in a slow spreading back-arc Basin: Insights from the Mado Megamullion oceanic core complex in the Shikoku Basin [J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2020, 21(11): e2020GC009199.
- [46] Tucholke B E, Behn M D, Buck W R, et al. Role of melt supply in oceanic detachment faulting and Formation of megamullions [J]. *Geology*, 2008, 36(6): 455-458.
- [47] Tucholke B E, Lin J, Kleinrock M C. Megamullions and mullion structure defining oceanic metamorphic core complexes on the Mid-Atlantic Ridge [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1998, 103(B5): 9857-9866.
- [48] Nooner S L, Sasagawa G S, Blackman D K, et al. Structure of oceanic core complexes: constraints from seafloor gravity measurements made at the Atlantis Massif [J]. *Geophysical Research Letters*, 2003, 30(8): 1446.