



菲律宾海板块俯冲与岛弧演化的钻探靶区研究

杜学鑫, 祝文君, 牟明杰, 尚鲁宁, 李攀峰, 尉佳, 虞义勇, 孟元库, 胡刚

Study on drilling target area of subduction of Philippine Sea plate and island arc evolution

DU Xuexin, ZHU Wenjun, MOU Mingjie, SHANG Luning, LI Panfeng, WEI Jia, YU Yiyong, MENG Yuanku, and HU Gang

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16562/j.cnki.0256-1492.2022062002>

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

杜学鑫, 祝文君, 牟明杰, 等. 菲律宾海板块俯冲与岛弧演化的钻探靶区研究 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 2022, 42(5): 199-210.
DU Xuexin, ZHU Wenjun, MOU Mingjie, et al. Study on drilling target area of subduction of Philippine Sea plate and island arc evolution[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2022, 42(5): 199-210.

菲律宾海板块俯冲与岛弧演化的钻探靶区研究

杜学鑫^{1,2}, 祝文君^{1,2}, 牟明杰³, 尚鲁宁², 李攀峰², 尉佳², 虞义勇², 孟元库¹, 胡刚^{1,2}

1. 山东科技大学地球科学与工程学院, 青岛 266590
2. 中国地质调查局青岛海洋地质研究所, 青岛 266237
3. 寿光市海洋渔业发展中心, 寿光 262700

摘要: 菲律宾海板块因其位于欧亚板块、太平洋板块和印-澳板块交汇处的特殊位置, 蕴含丰富的前沿地球科学问题, 是构造地质学、沉积学、古海洋学以及全球变化研究的热点地区, 已经开展了 25 个航次、98 个站位、218 口深海钻探井工作。系统梳理了已有的 DSDP-ODP-IODP 大洋科学钻探航次目标与初步结果, 认为绝大部分钻探航次以“弧前增生楔结构和孕震机理”及“岛弧岩浆作用和大陆边缘陆壳增生机制”为主要科学目标, 且集中在以日本南海海槽、伊豆-小笠原-马里亚纳岛弧区域为主的活动大陆边缘, 少量钻孔分布在板块内部的海底高原和海脊地区, 深海盆区仅有零星钻孔分布。而上述地区同样是制约西太平洋构造沉积演化研究的关键区域, 诸如花东海盆的年代属性、俯冲带和岛弧形成过程、菲律宾海板块演化以及风尘沉积等关键科学问题需要在此寻找答案。基于已有研究与实测资料, 在九州-帕劳海脊三联点区建设性地提出了 5 个大洋科学钻探站位, 并进行了初步钻探预测, 旨在阐述俯冲启动机制和岛弧早期演化、厘定三联点岩浆作用和古环境重建等 3 个科学目标。菲律宾海钻探井位建议与实施, 不仅对解决菲律宾海构造演化与沉积效应的关键科学问题有重要科学意义, 而且对支撑未来我国自有大洋钻探船深海科学钻探需求具有现实意义。

关键词: 大洋科学钻探; 九州-帕劳海脊; 钻探选址; 花东海盆; 菲律宾海

中图分类号: P736.21

文献标识码: A

DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2022062002

Study on drilling target area of subduction of Philippine Sea plate and island arc evolution

DU Xuexin^{1,2}, ZHU Wenjun^{1,2}, MOU Mingjie³, SHANG Luning², LI Panfeng², WEI Jia², YU Yiyong², MENG Yuanku¹, HU Gang^{1,2}

1. School of Earth Science and Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China
2. Qingdao Institute of Marine Geology, China Geological Survey, Qingdao 266237, China
3. Shouguang Marine Fishery Development Center, Shouguang 262700, China

Abstract: The Philippine Sea plate, which is located at the junction of the Eurasian plate, the Pacific plate, and the India-Australia plate, contains a wealth of cutting-edge geoscience issues, including tectonic, sedimentology, and paleoceanography. A total of 25 ocean drilling expeditions have been carried and 218 drilling holes have been completed in this area. This paper highlights the scientific goals and preliminary results for the previous expeditions systematically. Previous expeditions focused on issues such as the structure of forearc accretion, the seismogenic mechanism, and the magmatism of island arc. Most of these holes were drilled at the subduction zones, mainly located at the Nankai Trough and the Izu-Bonin-Mariana Trough. Meanwhile, a few drilling holes were from the oceanic plateau, submarine ridges, and oceanic basin. Oceanic plateau, ridges and basins are preferred areas for revealing nature of Huatung basin, initiation process of subduction and arc magnetism, and aeolian deposition. Based on newly acquired multichannel seismic data, five ocean drilling sites are proposed which are located at the triple junction area of the Kyushu Palau Ridge and the lithology and sequence for the proposed holes are predicted preliminarily. The proposed holes will achieve the scientific goals of revealing the subduction initiation mechanism determining the triple junction magmatism, and paleoenvironment reconstruction. Thus, the future drilling program will support the future scientific drilling needs of Chinese ocean drilling vessel.

Key words: ocean drilling; Kyushu-Palau Ridge; drilling sites; Huatung basin; Philippine Sea

资助项目: 自然资源部海岸带科学与综合管理重点实验室开放基金 (2021COSIMZ003); 中国地质调查局海洋地质调查项目 (DD20190236, DD20221720)

作者简介: 杜学鑫 (1996—), 硕士研究生, 海洋地质学专业, E-mail: 957883054@qq.com

通讯作者: 胡刚 (1979—), 博士, 正高级工程师, 主要从事海洋沉积学研究, E-mail: hugang@mail.cgs.gov.cn

收稿日期: 2022-06-20; 改回日期: 2022-08-23. 张现荣编辑

菲律宾海板块地处欧亚板块、太平洋板块和印度-澳大利亚板块的交汇处,四周几乎全部被俯冲带所包围,在西太平洋板块构造格局中占据特殊地位。受板块俯冲、海底扩张以及地幔柱活动等多重因素的影响,菲律宾海板块的形成演化过程表现为多阶段性,形成了现今复杂的构造格局,是开展西太平洋板块重建的关键区域。菲律宾海蕴含丰富的前沿地球科学问题,是构造地质学、沉积学、古海洋学以及全球变化研究的热点地区。自1969年以来,DSDP-ODP-IODP在菲律宾海及邻区共完成了25个航次的钻探工作。钻探为“弧前增生楔结构和孕震机理”、“菲律宾海板块的形成演化”、“岛弧岩浆作用和大陆边缘陆壳增生机制”以及“西太平洋古气候和古海洋环境演变”等重大科学问题的研究提供了基础。然而,绝大部分钻探航次和站位位于俯冲带发育的主动大陆边缘,集中于日本南海海槽、伊豆-小笠原-马里亚纳沟-弧-盆系统等区域,少量钻孔分布在板块内部的海底高原和海脊地区,深海盆区仅有零星钻孔分布,制约了诸如花东海盆基底属性、俯冲起始过程与岛弧演化等关键科学问题的研究。针对前期大洋钻探工作的局限,预研未来该海域钻探选址与井位建议,不仅可揭示制约菲律宾海构造演化与沉积效应认知的关键地球科学问题,而且对未来我国自有大洋钻探船钻探井位储备具有重要意义。

1 区域地质背景

菲律宾海板块呈南北向狭长的菱形走向,东部边界为伊豆-小笠原-马里亚纳海沟、雅浦海沟、帕劳海沟和阿玉海槽,西部边界为南海海槽、琉球海沟、马尼拉海沟和菲律宾海沟(图1)。以中央南北走向的九州-帕劳海脊将菲律宾海盆分为东、西两个大型的海盆:西菲律宾海盆和四国-帕里西维拉海盆。总体来说,基于磁异常与钻探数据,西菲律宾主海盆形成时间约为61~33/30 Ma^[1],四国海盆形成时间约为25~15 Ma^[2],帕里西维拉海盆形成时间约为30~17 Ma^[3],马里亚纳海槽初始扩张时间约

为6.5 Ma且尚处扩张时期^[4]。

菲律宾海范围较大,南北跨越0°~35°N,东西横跨124°~147°E,面积达 $5.4 \times 10^6 \text{ km}^2$ (图1)。海底地形十分复杂,发育有海沟、岛弧、海脊、海山、海盆、裂谷等地形,是一个海岭与海盆并列、具有洋壳基底的大型边缘海,全区水深3 000~6 000 m,平均水深约为4 500 m,总体表现为“西部深、东部浅”的特点(图1)。海盆整体位于菲律宾海板块之上,周边环绕岛弧与深海沟俯冲带,中部九州-帕劳海脊呈反转“S”形南北延伸,长约2 750 km,宽约50~90 km,海脊中段为一系列断续分布的链状海岭,海山与凹地相间分布,两侧呈明显不对称,东侧陡、西侧缓^[5]。

西菲律宾海盆和帕里西维拉海盆地区,沉积基底面与海底地形起伏基本平行,其上主要是覆盖了一层第四纪沉积物,平均厚度约500 m,基本为等厚度分布,沉积速率非常低,沉积物来源具有空间差异性,基本以远洋自生沉积^[6]、火山成因^[4,7]和内陆风成沉积物质为主^[8-10],沉积物直接覆盖在海底玄武岩层之上。

2 数据来源与研究方法

本文所用多道地震资料取自2020年9月执行的“深海科学钻探井位选址调查”项目菲律宾海调查航次,测量船舶为青岛海洋地质研究所“海洋地质九号”,在菲律宾海九州帕劳海脊和中央海盆断裂带东端共完成二维多道地震和同步多波束测量552.4 km(表1,图1)。

多道地震数据采集系统采用SERCCEL公司Sercel Seal 428系统,配以Sercel SSRD固体电缆,数据记录系统采用Seal 428 version 1.1,震源系统采用SERCCEL公司GII型气枪,空压机系统采用LMF 51S型空压机,拖缆控制系统采用ION公司PCS version 8.30,本次多道地震主要采集参数为接收360道,道间距12.5 m,炮间距37.5 m,震源容量为6 000立方英寸,记录长度12 s,具体参数见表2。

表1 2020年度菲律宾海多道地震测线位置

Table 1 Lines location of multi-channel seismic survey in 2020

测线名	起点坐标		终点坐标		测线长度/km	方位角/(°)
	纬度/N	经度/E	纬度/N	经度/E		
MCS-1	13.7143°	133.5°	16.3993°	133.8188°	301.5	186.9
MCS-2	16.24°	133.5°	15.8344°	135.7851°	250.9	280.5

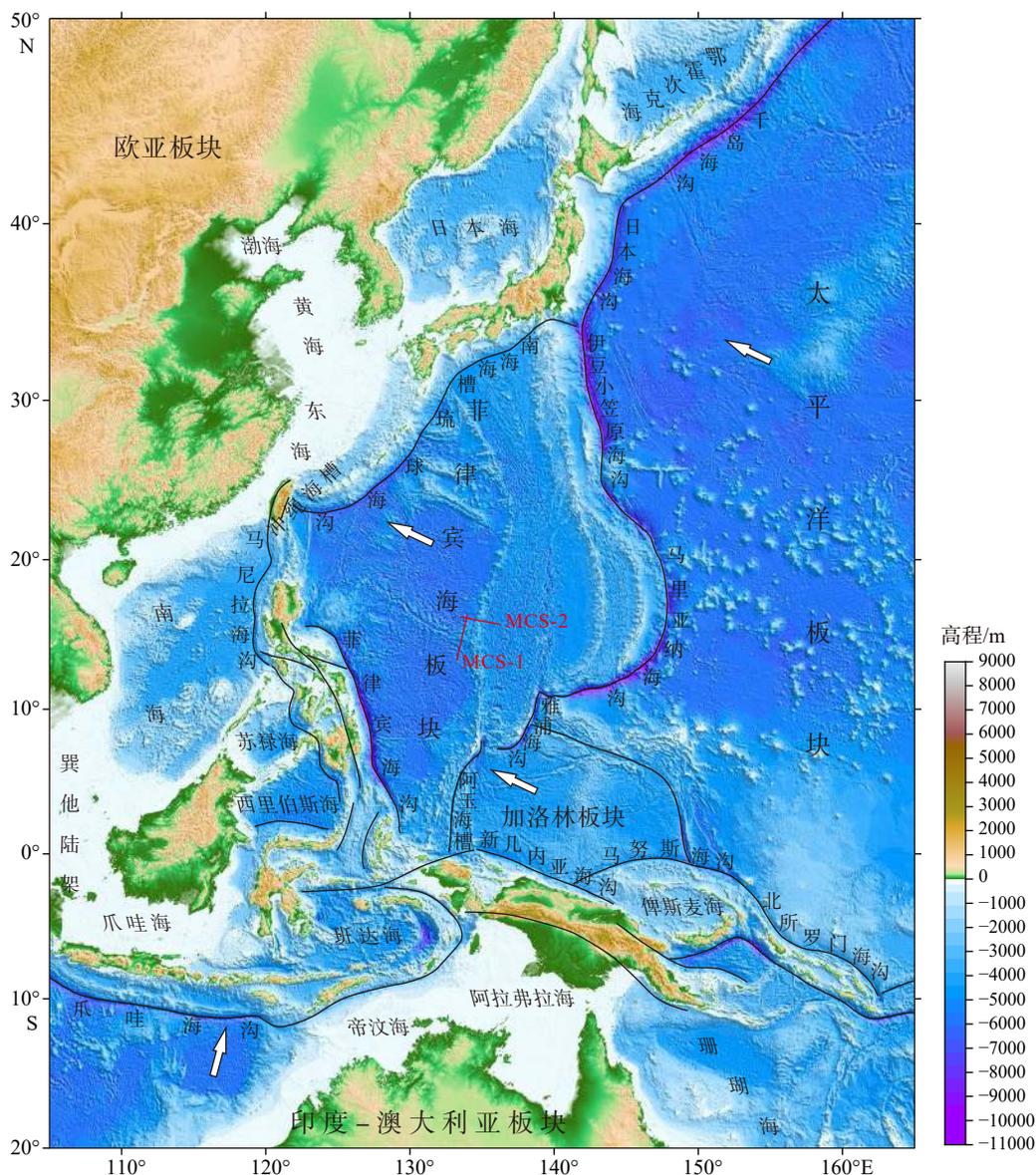


图 1 西太平洋海底地形和构造单元简图

红线代表实测多道地震测线。

Fig.1 Sketch map of topography and tectonic units in the Western Pacific

The red lines represent new acquired multichannel seismic profiles.

表 2 地震数据采集系统参数

Table 2 Parameters of seismic data acquisition system

采集参数		采集参数	
接收道数	360道	工作压力	2 000 psi
电缆长度/m	4 500	震源沉放深度/m	7
道间距/m	12.5	电缆沉放深度/m	10 (试验后确定)
覆盖次数	60	最小偏移距/m	170
炮间距/m	37.5	低截频	3Hz@6dB/oct (模拟)
采样率/ms	2	高截频	400Hz@370dB/oct (线性)
记录长度/ms	12 030	记录格式	SEG-D 8 058
震源容量/cu.in	6 000	记录介质	IBM359盒式磁带

3 菲律宾海已有钻探科学目标实现与重要科学问题进展

迄今为止, DSDP-ODP-IODP 在菲律宾海及邻区共完成了 25 个航次的钻探工作, 在 98 个站位共完成钻孔 218 口, 绝大部分钻探航次和站位集中于日本南海海槽、伊豆-小笠原-马里亚纳沟-弧-盆系统, 少量钻孔分布在板块内部的海底高原和海脊地区 (图 2)。钻探主要以“弧前增生楔结构和孕震机理”、“菲律宾海板块的形成演化”、“岛弧岩浆作用和大陆边缘陆壳增生机制”以及“西太平洋古气候

新世为火山活动的高峰^[15-16]。后期为了探究日本南海海槽与伊豆-马里亚纳岛弧的关系, 相继开展了 ODP-Leg131^[17]、190^[18]、195^[19]、196^[20] 航次的工作, 对比发现两地区均有流体流动的过程和地震活动的特征。伊豆-马里亚纳岛弧有来自中央火山带的蛇纹岩浆, 而日本南海海槽形成了大型逆冲推覆带, 表现为粗粒物质从岛弧向海沟运移转变为横向运移, 运移系统的转变使得沉积物从日本东部区域沿海沟轴线向下运移, 为横断面的沉积物提供了来源。

3.1.3 综合大洋钻探计划 (IODP) 阶段

该阶段主要研究区域是日本南海海槽, 分为多阶段的南海海槽孕震带试验 (NanTroSEIZE), 第一阶段实施了 IODP314 航次的工作, 运用了最先进的随钻测井 (LWD) 技术, 得到了天然气水合物赋存状态的重要信息; 第一阶段后续的 IODP315、316 航次是在 314 航次 4 个站位的基础上增加了新的钻孔工作。主要研究的目的是斜俯冲中增生棱柱体与弧前盆地应变分量的构造研究, 根据地层记录重建棱柱体和弧前盆地演化以及阐明巨型帚状断层系统浅部的特征、行为和演化信息^[21]。IODP319、322 作为第二个阶段, 技术更加先进, 主要科学目标包括在可能安装观测装置的深度或附近采集岩芯并进行井下试验, 推断出四国海盆的粗粒火山沉积物可能是从位于东侧的火山链通过海底等途径运过来的, 并成功地采集了构成基底的枕状玄武岩样品。2010 年实施了第二阶段的 IODP332、333 的工作, 在原有钻孔的基础上安装了井眼观测台, 主要成果有完成了对四国海盆半远洋沉积物上层沉积物物理性质转换带的取芯, 对沉积物/玄武岩界面下方 100 m 范围内的玄武岩进行取芯等。南海海槽第三阶段钻探计划主要为 IODP326、338 和 348 航次, 主要针对深部板块边界及断裂带进行隔水管大口径钻探, 获取大型地震发育机理。

3.1.4 大洋发现计划 (IODP) 阶段

2014 年国际大洋发现计划实施了 350—352 航次的科学钻探工作。IODP350 航次是在伊豆弧后钻探的第一航次, 以前 IODP 站位都位于伊豆-小笠原岛弧或弧前地区, 导致对伊豆弧岩浆作用的认知并不完整。因此, IODP350 航次的主要目的是揭示俯冲工厂“失踪的那一半”的演化历史^[22]。第二航次, 即 IODP351 航次将聚焦于九州-帕劳海脊西侧, 本区被认为记录了 IBM 弧早期的基础、起源和演化过程^[23]。第三航次, 即 IODP352 航次将通过钻探 IBM 岛弧外侧的弧前地区, 来研究俯冲起始过

程^[24]。这 3 个航次重点研究了地球化学不对称的岛弧地壳的起源、弧后岩浆活动、原始地壳与地幔性质、岛弧在古近纪的成分演化、俯冲开始后的地幔熔融演化过程、俯冲开始与初始岛弧地壳形成过程等科学问题。

综上所述, DSDP 阶段的航次解决了菲律宾海盆的地质形成年代和演化历史的问题, 对四国海盆和大东岭海盆的扩张起源问题有了初步的认识, 确定了九州-帕劳海脊火山活动的时间和性质, 提出了 TTR 型三联点: ODP 阶段探究了伊豆-小笠原-马里亚纳岛弧的起源和演化问题, 并与南海海槽做了对比, 发现均有物质的迁移和地震带活动的特征; IODP 阶段分为多阶段的南海海槽孕震带试验, 探明了天然气水合物和增生棱柱体的信息, 推测四国海盆沉积物的来源以及深部取芯; IODP 阶段重点研究了地球化学不对称的岛弧地壳的起源、弧后岩浆活动以及俯冲开始与初始岛弧地壳形成过程等科学问题。但同时, 仍有一些关键的科学问题制约着对菲律宾海及邻域构造沉积过程的全面认识。

3.2 菲律宾海前沿地球科学问题

3.2.1 花东海盆的年代和构造属性

花东海盆位于台湾岛东侧, 是西太平洋地球系统中一个重要的盆地, 位于菲律宾海板块与欧亚板块的交汇处及构造运动的转折点, 构造位置极为重要^[25], 是研究西太平洋板块从白垩纪到新生代构造演化与动力学机制的关键区域^[26](图 3)。目前, 对花东海盆的年龄和构造属性存在较大的争议, 是西太平洋板块重建的关键。

在新生代时期, 菲律宾海板块侵位于欧亚板块与西太平洋板块之间, 古地磁数据显示, 在白垩纪时期花东海盆和菲律宾海板块位于赤道附近^[27-28], 随后相对于欧亚板块沿着巨型剪切带一起向北移动, 大位移地 (近 2 200 km) 运行到现今的位置^[27], 而花东海盆的洋盆性质最初是基于在海盆中识别出 4 个 E-W 向磁异常条带^[11], 推断盆地的年龄有: 41~36 Ma^[1]、15~30 Ma^[29]、52~43 Ma^[30] 等, 据此认为它是菲律宾海板块的一部分, 是菲律宾海板块楔入体的前锋^[31]。后来拖网采得辉长岩样品^[32], 单矿物⁴⁰Ar/³⁹Ar 测年为 131~119 Ma, 据此推断花东海盆年龄为早白垩世, 是板块构造运动遗留给人类的、在菲律宾海盆与欧亚大陆之间唯一的中生代白垩纪洋盆^[33]。因此, 花东海盆形成时代和构造属性、与菲律宾海板块的相关作用关系是重建中生代时期太平洋板块与欧亚板块之间的运动学和动力

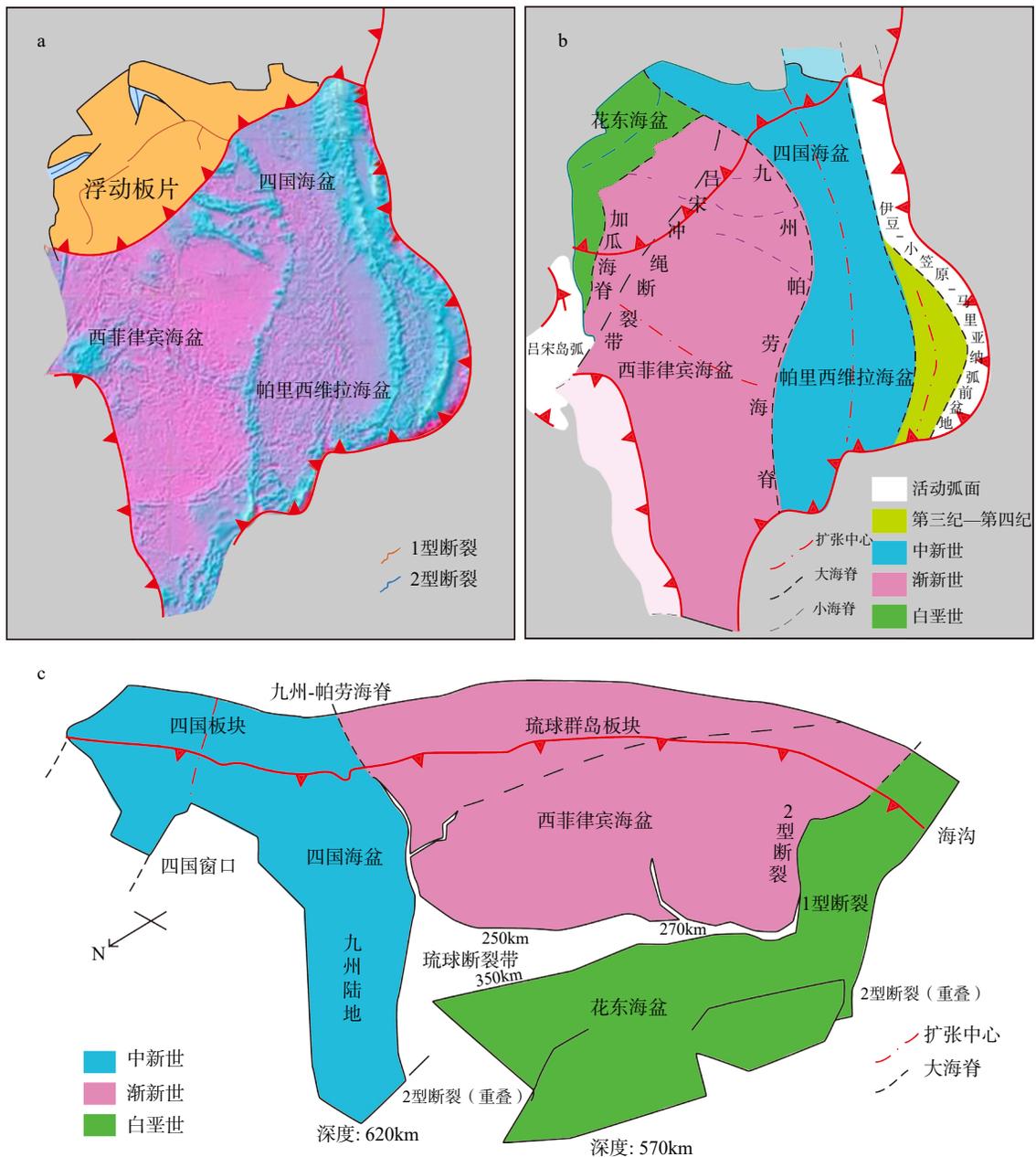


图3 琉球俯冲板片结构和花东海盆的构造属性^[31]

a. 琉球俯冲板片的重建结果, b. 俯冲之前的菲律宾海板块结构, c. 琉球俯冲板片三维结构。

Fig.3 The structure of the Ryukyu subduction plate and the tectonic nature of the Huatung basin^[31]

a. The floated slab mesh connected at the Ryukyu Trench to the Philippine Sea Plate. b. Structure of the Philippine Sea Plate prior to subduction. c. 3D structure of the Ryukyu subducted slab.

学关系一个非常关键的问题。

3.2.2 俯冲启动和岛弧形成过程

没有俯冲带就没有板块构造,俯冲带成因是理解板块构造的关键,然而长期以来俯冲带的起始俯冲机制一直是板块构造理论中最为薄弱的部分,西太平洋边缘海存在多个初始扩张中心和可能的初始俯冲带^[34],是研究初始俯冲的优良靶区。与被动大陆边缘的初始扩张相比,起始俯冲以及由此产生的洋内弧的研究才刚刚起步^[35]。

菲律宾海四周几乎全被俯冲带包围,其东侧伊豆-小笠原-马里亚纳 (IBM) 俯冲带是由古老的西太平洋板块俯冲到菲律宾海板块与马里亚纳微板块之下而形成的,造就了典型的沟-弧-盆体系^[36]。以往该地区的大洋钻探对 IBM 50 Ma 演化过程中近 25 Ma 的历史,通过火山灰和火山碎屑研究已取得显著进展。然而,对于 IBM 形成演化的前半段历史,尤其是岛弧形成的起始过程,却知之甚少。九州-帕劳海脊曾经与现代 IBM 岛弧连为一体,在约

30 Ma 的海底扩张形成四国海盆和帕里西维拉盆地之前一起组成了古 IBM 岛弧, 大洋钻探发现计划连续三个航次在 IBM 展开^[22-24], 但九州-帕劳海脊作为俯冲起始和岛弧形成演化的重要起源区^[37], 开展的钻探工作明显不足, 制约了对上述科学问题的认识。因此, 以九州-帕劳海脊区为目标, 对俯冲起始机制进行研究, 依旧是板块构造学理论体系中的一个重点和难点。

同时, 加瓜海脊介于西菲律宾海盆和花东海盆之间, 构成了两个结构、性质、形成时代截然不同的海盆的边界。最新的多道地震和 OBS 探测结果表明^[38], 加瓜海脊之下的地壳厚度相对于两侧海盆显著增厚, 海脊地壳的增厚是非对称的, 可能代表了中新世期间形成的一条夭折俯冲带, 俯冲启动之后短时间内终止, 俯冲带结构被“定格”在了加瓜海脊之下。因此, 加瓜海脊可能也是研究俯冲启动过程的理想场所^[34]。

3.2.3 菲律宾海板块的形成演化和板块重建

菲律宾海是东亚三大板块包围而成的最大边缘海。三大主要板块的运动符合基于海底扩张和热点参照系确定的全球板块运动模型^[39]。然而菲律宾海板块自早始新世形成以来的运动轨迹, 一直是不确定和有争议的。

多年来, 不同学者提出了许多截然不同的菲律宾海板块重建方案^[39-45]。现今菲律宾板块与太平洋板块均以 WNW 方向高速移动, 需要其与太平洋板块之间存在较强的耦合才能实现。根据菲律宾海板块磁条带确定的海底年龄和扩张模式, 为在一定误差范围内部分重建过去的板块几何结构提供了可能^[1, 32, 46], 对于渐新世末到现在的菲律宾海扩张过程, 已发表的菲律宾海年龄模型之间的差异相对较小。菲律宾海板块过去的运动状态与现今的运动状态截然不同, 古地磁倾角数据表明菲律宾海板块晚中生代以来板块漂移中发生了 110° 的顺时针旋转^[43], 但是却很难区分古地磁数据代表的是全板块旋转还是局部块体旋转。Lee 和 Hilde^[40] 的年龄模式被广泛用于菲律宾海板块的重建, 认为西菲律宾海盆的扩张始于 59~56 Ma。相反, 基于最新放射性测年结果识别出的冲大东热点遗迹建立的新模型则认为西菲律宾海盆的扩张始于更晚的 54~50 Ma^[32, 47]。这种年龄与转向差异的不同直接影响了菲律宾海板块形成与演化重建的结果。

同时, 西菲律宾海作为规模较大的不活动弧后盆地, 其扩张作用终止的动力过程仍不明确。西菲律宾海盆残留的中央扩张中心呈 NW-SE 向, 发育

显著的中央裂谷, 被近 N-S 向的古转换断层切割, 扩张作用终止的动力学机制被认为是“失去动力”的主动停止过程, 但消亡扩张中心在岩石圈结构、扩张末期熔体作用过程和物质组成等方面的差异, 是进一步揭示海底扩张作用终止过程和机制的基础。

3.2.4 海洋风成沉积及其古环境记录

海洋风尘沉积是指陆源沉积物通过大气环流传输并在特定的海区沉降而形成的沉积物。每年大约有 2 000 亿 t 风尘进入大气层, 其中 25% 落在海洋使得风尘沉积成为许多深海沉积物的重要组成部分^[48], 而且亚洲是世界上最大的风尘源区之一, 观测结果表明, 亚洲风尘对海洋沉积物组成和全球气候变化具有重要的影响^[49]。风尘通量和粒度变化是海洋风尘沉积研究中常用的古气候代用指标。ODP885/886 孔的风尘粒度记录了 11.8 Ma 以来西风环流强度的演化历史, 风尘粒径在 4.6 Ma 时增加, 反映了晚中新世由于气候变冷所引起的西风加强^[50]。风尘通量的显著增加反映了亚洲内陆干旱化程度的加剧^[51], 而且干旱程度变化也会在石英通量上有所体现^[52-53], 风尘通量的变化表现为明显的冰期-间冰期旋回特征, 冰期的高风尘输入可能与亚洲内陆干旱化程度和东亚冬季风强度增强有关^[54]。但是, 西菲律宾海风尘沉积物的不同源区物质输入通量还无法定量划分, 风尘沉积物在海流与西风环流的耦合搬运机制仍不清晰, 同时亚洲风尘与大陆沉积尚缺少更长时间尺度和更高分辨率的比对记录, 未来在菲律宾海盆钻取关键站位形成南北和东西断面对比, 有望揭示新生代亚洲内陆干旱程度历史-西风强弱过程和东亚冬季风演化耦合过程及风尘沉积过程与机制。

4 科学目标实现与站位选择

针对菲律宾海板块及周边地区的前沿地球科学问题, 结合 DSDP-ODP-IODP 工作程度、实测多道地震数据以及菲律宾海板块调查研究工作进展, 并综合考虑通过深海钻探解决科学问题的可行性和难易程度, 聚焦 3 个科学目标, 确定了未来可能的钻探井位, 主要包括: ①俯冲启动和岛弧早期演化; ②三联点岩浆作用过程; ③西菲律宾海盆年代和古地磁。

4.1 科学目标 1——俯冲启动和岛弧早期演化

了解俯冲带的肇始机制, 以及洋-洋俯冲产生的洋内火山岛弧的形成和演变过程, 是板块构造理论

最核心的问题之一。九州-帕劳海脊和加瓜海脊是不同类型俯冲启动的产物,是研究俯冲启动和岛弧早期形成演化的理想场所。在此开展钻探,不仅获取俯冲启动和岛弧演化早期的岩浆活动和沉积记录,甚至钻获夭折俯冲带之下的俯冲洋壳,能够为破解俯冲启动和岛弧形成演化过程提供可能。

九州-帕劳海脊曾经与现代 IBM 岛弧连为一体,在约 30 Ma 的海底扩张形成四国海盆和帕里西维拉盆地之前一起组成了古 IBM 岛弧,是古太平洋板块向菲律宾海板块俯冲的产物,视为古 IBM 的残留弧。九州-帕劳海脊及周缘原始洋壳基底之上与岛弧侵位同时期的火山碎屑沉积层,记录了俯冲板块对俯冲起始响应过程的证据,是了解板块如何起始俯冲的关键场所。

PSP-1 站位的位置由 2020 年采集的 MCS-2 多道地震剖面控制,位于九州-帕劳海脊西侧,距离海脊顶部边缘约 20 km。站位坐标为 $16^{\circ}05.5323'N$ 、 $134^{\circ}20.9853'E$,站位水深约 5 460 m。PSP-1 井以钻穿沉积层并揭露九州-帕劳海脊西侧的玄武岩洋底为目标,计划完钻深度 6 450 m,其中水深约 5 460 m,沉积层和基底硬岩钻进 990 m。预计将在海底之下 790 m,即 6 250 m 深度钻遇玄武岩基底。推测 5 460~6 250 m 深度的沉积层以深远海沉积物为主,岩性为深海软泥、泥质粉砂岩和粉砂质泥岩,夹少量陆源碎屑和火山碎屑。6 250~6 450 m 为九州-帕劳海脊演化早期形成的中-酸性熔岩和火山碎屑岩,该层之下局部可能发育枕状玄武岩和辉长岩岩脉(图 4)。

PSP-2 站位的位置由 2020 年采集的 MCS-2 多道地震剖面控制,位于九州-帕劳海脊顶部。站位坐

标为 $16^{\circ}1.53'N$ 、 $134^{\circ}43.2316'E$,站位水深约 3 380 m。PSP-4 井以钻穿沉积层并揭露九州-帕劳海脊顶部的岛弧基底为目标,计划完钻深度 4 200 m,其中水深约 3 380 m,沉积层和基底硬岩钻进 820 m。预计将在海底之下 540 m,即 3 920 m 深度钻遇岛弧基底。推测

3 380~3 920 m 深度的沉积层以深远海沉积物为主,岩性为深海软泥、泥质粉砂岩和粉砂质泥岩,夹少量陆源碎屑和火山碎屑。3 920~4 200 m 为九州-帕劳海脊演化早期形成的中-酸性熔岩和火山碎屑岩(图 4)。

4.2 科学目标 2——板块演化与三联点岩浆作用过程

西菲律宾海盆中央断裂带东端与九州-帕劳海脊交汇处存在已经消亡的三联点。中央断裂带是西菲律宾海盆最后一期海底扩张的中心,而九州帕劳海脊代表太平洋板块向西菲律宾海盆之下俯冲形成的洋内弧。由于中央断裂带的形成时代早于俯冲作用且与俯冲带高角度相交,先存洋壳破裂带的存在势必会对俯冲作用引起的熔体作用过程产生显著影响,而俯冲作用也可能导致彼时已经停止活动或即将停止活动的扩张中心再次活化。二者之间的复杂相互作用过程,可能导致不同来源的深部熔体发生大规模的相互作用,并在海底岩石类型和同位素组成上留下显著的痕迹。

位于西菲律宾海盆中央裂谷北侧隆起的 PSP-3 站位由 2020 年采集的 MCS-1 多道地震剖面控制,距离中央裂谷轴部约 30 km。站位坐标为 $15^{\circ}29'33.8834''N$ 、 $133^{\circ}42'40.3420''E$,站位水深约 4 460 m。该井以钻穿沉积层并揭露西菲律宾海盆中央裂谷

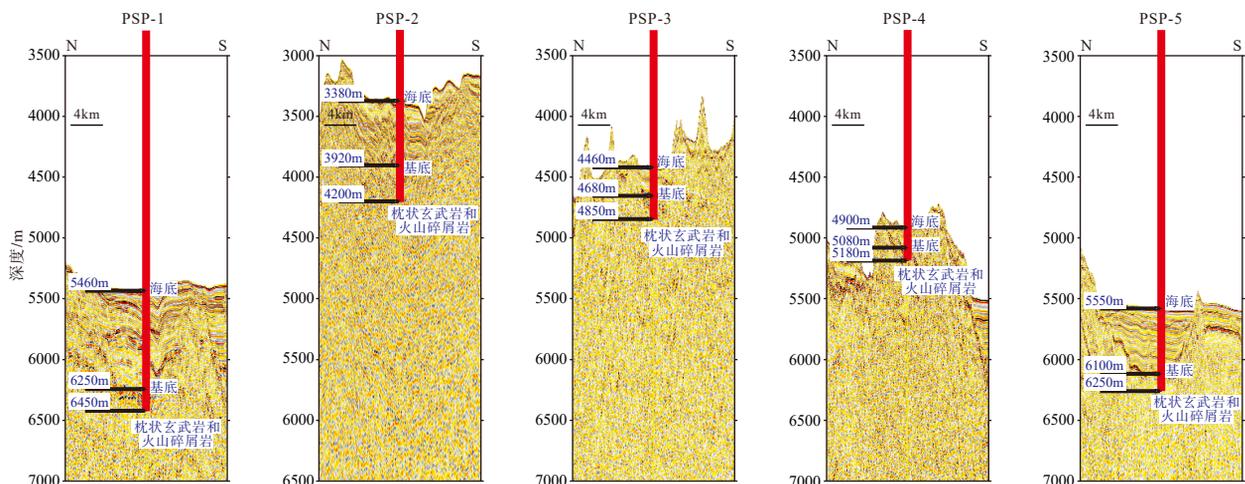


图 4 菲律宾海深海科学钻井预测图

Fig.4 Diagram of sequence and lithology of the proposed drilling holes

与九州-帕劳海脊三联点岩石组成为目标, 计划完钻深度 4 850 m, 其中水深约 4 460 m, 沉积层和基底硬岩钻进 390 m。预计将在海底之下 220 m, 即 4 680 m 深度钻遇基底 (图 4)。

位于西菲律宾海盆中央裂谷南侧的 PSP-4 站位由 2020 年采集的 MCS-1 多道地震剖面控制, 位于中央裂谷东端南侧隆起之外的一个小型海底火山型凸起之上, 距离中央裂谷轴部约 80 km。站位坐标为 $133^{\circ}34'57.1887''$ E, $14^{\circ}25'34.7389''$ N, 站位水深约 4 900 m。该井科学目标与 PSP-3 井相同, 利于裂谷两侧对比, 计划完钻深度 5 180 m, 其中水深约 4 900 m, 沉积层和基底硬岩钻进 280 m。预计将在海底之下 180 m, 即 5 080 m 深度钻遇基底, 该井层序地层格架与岩性与 PSP-3 井基本相同 (图 4)。

4.3 科学目标 3——西菲律宾海盆年代和古地磁

古老的西菲律宾海盆年龄和运动轨迹解释存在的显著差异, 制约了菲律宾海构造演化与板块重建研究。菲律宾海板块的构造发展史在很大程度上依赖于古地磁研究, 然而, 迄今为止用于菲律宾海板块古地磁测量的样品几乎全部来自易受局部块体旋转影响的板块边界附近, 难以区分古地磁数据代表的是全板块旋转还是局部块体旋转。因此, 通过钻探, 在板块内部稳定区域尽可能多地采集样品, 开展古地磁和放射性测年的研究, 是准确开展菲律宾海板块重建的基础。

位于西菲律宾海盆的 PSP-5 站位由 2020 年采

集的 MCS-1 和 MCS-2 多道地震剖面控制, 位于 MCS-1 和 MCS-2 测线交点附近, 距离九州-帕劳海脊约 60 km。站位坐标为 $16^{\circ}13.635'N$ 、 $133^{\circ}48.0269'E$, 站位水深约 5 550 m。PSP-5 井以钻穿沉积层并揭露西菲律宾海盆中央裂谷东端北侧的海盆基底岩石组成为目标, 计划完钻深度 6 250 m, 其中水深约 5 550 m, 沉积层和基底硬岩钻进 700 m。预计将在海底之下 550 m, 即 6 100 m 深度钻遇基底。推测 5 550~6 100 m 深度的沉积层以深远海沉积物为主, 岩性为深海软泥、泥质粉砂岩和粉砂质泥岩, 夹少量陆源碎屑和火山碎屑。6 100 m 之下以西菲律宾海盆海底扩张形成的枕状玄武岩为主, 局部可能受九州-帕劳海脊演化早期形成的中-酸性熔岩和火山碎屑岩影响 (图 4)。

4.4 菲律宾海钻探井位汇总

本文根据目前的调查研究程度与研究进展, 选择西菲律宾海盆中央断裂带与九州-帕劳海脊交汇处的三联点关键区域, 选取钻探站位 5 个 (表 3、图 5)。其中, PSP-1、PSP-2 站位在九州-帕劳海脊探索可能的俯冲启动过程; PSP-3 和 PSP-4 站位主要针对三联点岩浆作用; PSP-5 站位目的在于获得额外的古地磁和年代学样品, 为西菲律宾海盆的形成演化提供约束。

PSP-1 孔设计终孔深度 6 450 m, 沉积层厚度约 790 m, 基底硬岩钻进 200 m, 采用全取芯钻探; PSP-2 孔设计终孔深度 4 200 m, 沉积层厚度约 540 m, 基

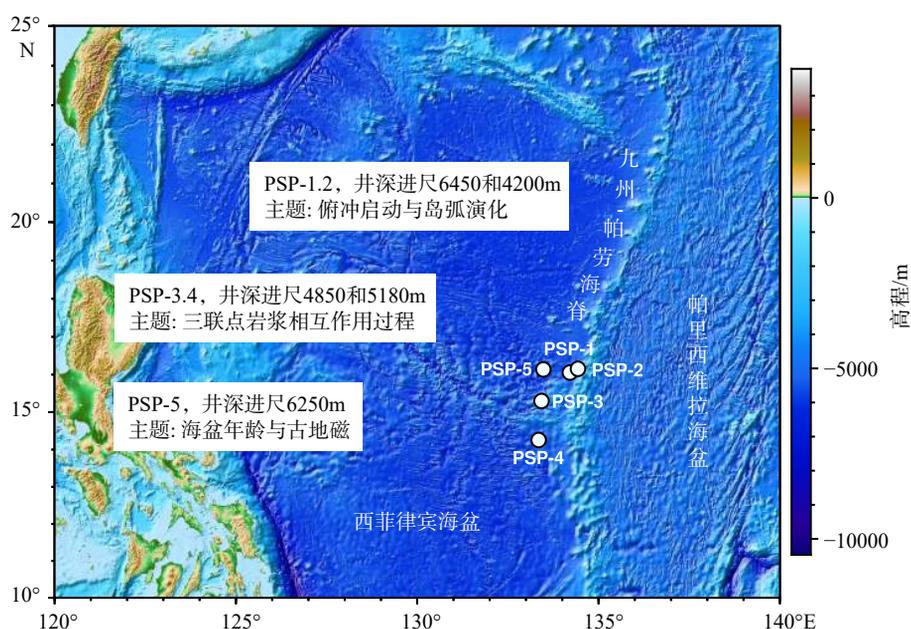


图 5 菲律宾海深海科学钻探选址关键区域及井位分布图

Fig.5 Distribution of the proposed wells in the Philippine Sea

表3 菲律宾海科学钻探建议井位位置
Table 3 Proposed well locations of Philippine Sea Scientific Drilling

序号	站位编号	井位坐标	站位水深/m	地球物理测线控制
1	PSP-1	16°05.5323'N、134°20.9853'E	5 460	MCS-2多道地震剖面
2	PSP-2	16°1.5300'N、134°43.2316'E	3 380	MCS-2多道地震剖面
3	PSP-3	15°29.5647'N、133°42.6724'E	4 460	MCS-1多道地震剖面
4	PSP-4	14°25.5790'N、133°34.9531'E	4 900	MCS-1多道地震剖面
5	PSP-5	16°13.635'N、133°48.0269'E	5 550	MCS-1和MCS-2多道地震剖面

底硬岩钻进 280 m, 采用全取芯钻探; PSP-3 孔设计终孔深度 4 850 m, 沉积层厚度约 220 m, 基底硬岩钻进 170 m, 采用全取芯钻探; PSP-4 孔设计终孔深度 5 180 m, 沉积层厚度约 180 m, 基底硬岩钻进 100 m, 采用全取芯钻探; PSP-5 孔设计终孔深度 6 250 m, 沉积层厚度约 550 m, 基底硬岩钻进 150 m, 采用全取芯钻探。

5 结论

(1) 系统分析了在菲律宾海及邻区已完成的 DSDP-ODP-IODP 的 25 个钻探航次进展与问题, 发现绝大部分钻探航次和站位集中于日本南海海槽、伊豆-小笠原-马里亚纳沟-弧-盆系统, 少量钻孔分布在板块内部的海底高原和海脊地区, 深海盆区仅有零星钻孔分布。钻探目标以弧前增生楔结构和孕震机理、岛弧岩浆作用和大陆边缘陆壳增生机制等为科学主题。

(2) 菲律宾海蕴含的花东海盆年龄与构造属性、板块俯冲起始与弧后盆地扩张停止机制、菲律宾海盆年代等科学问题等是制约菲律宾海板块构造演化、板块重建和古气候环境重建的关键。

(3) 根据已有研究进展与实测资料, 在国际大洋钻探稀少或空白区, 在九州-帕劳海脊附近选定区域, 聚焦不同科学目标实现甄选了未来深海钻探站位 5 个 PSP1-5。

(4) 根据地震资料和前期研究成果, 对目标层位的深度和岩性特征进行了初步预测, 钻探实施预计将推进以下科学目标的实现: ① 进一步揭示俯冲启动机制和岛弧早期演化过程; ② 进一步揭示三联点岩浆作用过程; ③ 获取更多的西菲律宾海盆年代和古地磁数据, 为菲律宾海及邻区的板块重建提供证据。

致谢: 在论文评审过程中, 审稿专家提出了专

业细致的评审意见, 使得文稿质量大幅提升; 在此表示感谢, 一并感谢 2020 年“海洋地质九号”西太航次调查全体船员及工作人员。

参考文献 (References)

- [1] Hilde T W C, Chao-Shing L. Origin and evolution of the West Philippine Basin: a new interpretation [J]. *Tectonophysics*, 1984, 102 (1-4): 85-104.
- [2] Chamot-Rooke N, Renard V, Le Pichon X. Magnetic anomalies in the Shikoku Basin: a new interpretation [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1987, 83 (1-4): 214-228.
- [3] 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.
- [4] 张国良, 王帅, 张吉, 等. 西太平洋若干沟-弧-盆体系及板内岩浆成因研究进展 [J]. *海洋与湖沼*, 2017, 48 (6): 1220-1234. [ZHANG Guoliang, WANG Shuai, ZHANG Ji, et al. Proceedings of subduction system and intra-oceanic volcanism of the western Pacific [J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2017, 48 (6): 1220-1234.]
- [5] Qin X W, Luo W D, Li P F, et al. Topographic and geomorphological features and tectogenesis of the southern section of the Kyushu-Palau Ridge (KPR) and its adjacent areas [J]. *China Geology*, 2021, 4 (4): 571-584.
- [6] Nechaev V P. Evolution of the Philippine and Japan Seas from the clastic sediment record [J]. *Marine Geology*, 1991, 97 (1-2): 167-190.
- [7] Kroenke L, Scott R. Initial report DSDP59[R]. Washington: U. S. Government Printing Office, 1980.
- [8] 秦蕴珊, 陈丽蓉, 石学法. 西菲律宾海风成沉积物的研究 [J]. *科学通报*, 1995, 40 (17): 1595-1597. [QIN Yunshan, CHEN Lirong, SHI Xuefa. Study on aeolian sediments in the West Philippine Sea [J]. *Chinese Science Bulletin*, 1995, 40 (17): 1595-1597.]
- [9] 石学法, 陈丽蓉, 李坤业, 等. 西菲律宾海西部海域粘土沉积物的成因矿物学研究 [J]. *海洋地质与第四纪地质*, 1995, 15 (2): 61-72. [SHI Xuefa, CHEN Lirong, LI Kunye, et al. Study on minerageny of the clay sediment in the West of Philippine Sea [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 1995, 15 (2): 61-72.]
- [10] 万世明, 徐兆凯. 西太平洋风尘沉积记录研究进展 [J]. *海洋与湖沼*, 2017, 48 (6): 1208-1219. [WAN Shiming, XU Zhaokai. Research

- progress on eolian dust records in the West Pacific [J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2017, 48 (6): 1208-1219.]
- [11] Fischer A G, Heezen B C, Boyce R E, et al. Initial report of the Deep Sea Drilling Project 6[R]. Washington: U. S. Government Printing Office, 1971.
- [12] Karig D E, Ingle J C. Initial reports of the Deep Sea Drilling Project 31[R]. Washington: U. S. Government Printing Office, 1975.
- [13] Devries Klein G, Kobayashi K. Initial reports of the Deep Sea Drilling Project 58[R]. Washington: U. S. Government Printing Office, 1980.
- [14] Hussong D M, Uyeda S. Initial reports of the Deep Sea Drilling Project 60[R]. Washington: U. S. Government Printing Office, 1981.
- [15] Fryer P, Pearce J A, Stokking L B. Proceeding of ODP initial reports 125[R]. College Station, TX: Ocean Drilling Program, 1990.
- [16] Taylor B, Fujioka K. Proceeding of ODP initial reports 126[R]. College Station, TX: Ocean Drilling Program, 1990.
- [17] Taira A, Hill I, Firth J V. Proceeding of the Ocean Drilling Program initial reports 131[R]. College Station, TX: Ocean Drilling Program, 1991.
- [18] Moore G F, Taira A, Klaus A. Proceeding of the Ocean Drilling Program initial reports 190[R]. College Station, TX: Ocean Drilling Program, 2001.
- [19] Salisbury M H, Shinohara M, Richter C, et al. Proceedings of the Ocean Drilling Program initial reports 195[R]. College Station, TX: Ocean Drilling Program, 2002.
- [20] Mikada H, Becker K, Moore J C, et al. Proceeding of the Ocean Drilling Program initial reports 196[R]. College Station, TX: Ocean Drilling Program, 2002.
- [21] Kinoshita M, Tobin H, Ashi J, et al. Proceedings of the Integrated Ocean Drilling Program 314/315/316[G]. Washington, DC: Integrated Ocean Drilling Program Management International, Inc, 2009.
- [22] Tamura Y, Busby C J, Blum P, et al. Proceedings of the International Ocean Discovery Program expedition 350: Izu-Bonin-Mariana rear arc[R]. College Station, TX: International Ocean Discovery Program, 2015.
- [23] Arculus R J, Ishizuka O, Bogus K, et al. Proceedings of the International Ocean Discovery Program expedition 351: Izu-Bonin-Mariana arc origins[R]. College Station, TX: International Ocean Discovery Program, 2015.
- [24] Reagan M K, Pearce J A, Petronotis K, et al. Proceedings of the International Ocean Discovery Program expedition 352: Izu-Bonin-Mariana fore arc[R]. College Station, TX: International Ocean Discovery Program, 2015.
- [25] 李春峰, 周祖翼, 李家彪, 等. 台湾岛南部海域的前碰撞构造地球物理特征[J]. *中国科学(D辑: 地球科学)*, 2007, 37(5): 649-659. [LI Chunfeng, ZHOU Zuyi, LI Jiabiao, et al. Geophysical characteristics of pre collisional structures in the southern waters of Taiwan Island[J]. *Science in China (Part D: Earth Science)*, 2007, 37(5): 649-659.]
- [26] 赵明辉, 王强, 杨富东, 等. 花东海盆综合地震探测及其重要的构造意义[J]. *地球科学*, 2021, 46 (1): 359-368. [ZHAO Minghui, WANG Qiang, YANG Fudong, et al. Seismic survey in Huatung Basin and its tectonic significance [J]. *Earth Science*, 2021, 46 (1): 359-368.]
- [27] Concepcion R A B, Dimalanta C B, Yumul G P, et al. Petrography, geochemistry, and tectonics of a rifted fragment of mainland Asia: evidence from the Lasala Formation, Mindoro Island, Philippines [J]. *International Journal of Earth Sciences*, 2012, 101 (1): 273-290.
- [28] Balmater H G, Manalo P C, Faustino-Eslava D V, et al. Paleomagnetism of the Samar Ophiolite: implications for the Cretaceous sub-equatorial position of the Philippine island arc [J]. *Tectonophysics*, 2015, 664: 214-224.
- [29] Kuo B Y, Chi W C, Lin C R, et al. Two-station measurement of Rayleigh-wave phase velocities for the Huatung Basin, the westernmost Philippine Sea, with OBS: implications for regional tectonics [J]. *Geophysical Journal International*, 2009, 179 (3): 1859-1869.
- [30] Sibuet J C, Hsu S K, Le Pichon X, et al. East Asia plate tectonics since 15 Ma: constraints from the Taiwan region [J]. *Tectonophysics*, 2002, 344 (1-2): 103-134.
- [31] Pownall J M, Hall R, Lister G S. Rolling open Earth's deepest Forearc basin [J]. *Geology*, 2016, 44 (11): 947-950.
- [32] Deschamps A, Monié P, Lallemand S, et al. Evidence for Early Cretaceous oceanic crust trapped in the Philippine Sea Plate [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2000, 179 (3-4): 503-516.
- [33] Huang C Y, Wang P X, Yu M M, et al. Potential role of strike-slip faults in opening up the South China Sea [J]. *National Science Review*, 2019, 6(5): 891-901.
- [34] 李春峰, 周多, 李刚, 等. 西太平洋地球动力学问题与未来大洋钻探目标[J]. *地球科学*, 2021, 46 (3): 759-769. [LI Chunfeng, ZHOU Duo, LI Gang, et al. Geodynamic problems in the Western Pacific and future scientific drill targets [J]. *Earth Science*, 2021, 46 (3): 759-769.]
- [35] 丁巍伟, 李家彪. 南海南部陆缘构造变形特征及伸展作用: 来自两条 973 多道地震测线的证据[J]. *地球物理学报*, 2011, 54 (12): 3038-3056. [DING Weiwei, LI Jiabiao. Seismic stratigraphy, tectonic structure and extension factors across the southern margin of the South China Sea: evidence from two regional multi-channel seismic profiles [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2011, 54 (12): 3038-3056.]
- [36] 林间, 徐敏, 周志远, 等. 全球俯冲带大洋钻探进展与启示[J]. *地球科学进展*, 2017, 32 (12): 1253-1266. [LIN Jian, XU Min, ZHOU Zhiyuan, et al. Ocean drilling investigation of the global subduction processes [J]. *Advances in Earth Science*, 2017, 32 (12): 1253-1266.]
- [37] Stern R J. Subduction initiation: spontaneous and induced [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2004, 226 (3-4): 275-292.
- [38] McIntosh K, Lavier L L, van Avendonk H, et al. Crustal structure and inferred rifting processes in the northeast South China Sea [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2014, 58: 612-626.
- [39] Seton M, Müller R D, Zahirovic S, et al. Global continental and ocean basin reconstructions since 200 Ma [J]. *Earth-Science Reviews*, 2012, 113 (3-4): 212-270.
- [40] Lee C S, Hilde T W C. Magnetic lineations in the western Philippine Sea [J]. *Acta Oceanographica Taiwanica*, 1971 (1): 69-75.
- [41] Seno T, Maruyama S. Paleogeographic reconstruction and origin of the Philippine Sea [J]. *Tectonophysics*, 1984, 102 (1-4): 53-84.
- [42] Uyeda S, Ben-Avraham Z. Origin and development of the Philippine

- sea [J]. *Nature Physical Science*, 1972, 240(104): 176-178.
- [43] 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.
- [44] 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.
- [45] Hall R. Late Jurassic-Cenozoic reconstructions of the Indonesian region and the Indian Ocean [J]. *Tectonophysics*, 2012, 570-571: 1-41.
- [46] Watts A B, Weissel J K. Tectonic history of the Shikoku marginal basin [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1975, 25(3): 239-250.
- [47] Sasaki T, Yamazaki T, Ishizuka O. A revised spreading model of the West Philippine Basin [J]. *Earth, Planets and Space*, 2014, 66(1): 83.
- [48] Shao Y P, Wyrwoll K H, Chappell A, et al. Dust cycle: an emerging core theme in Earth system science [J]. *Aeolian Research*, 2011, 2(4): 181-204.
- [49] Rea D K. The paleoclimatic record provided by eolian deposition in the deep sea: the geologic history of wind [J]. *Reviews of Geophysics*, 1994, 32(2): 159-195.
- [50] Rea D K, Snoeckx H, Joseph L H. Late Cenozoic eolian deposition in the North Pacific: Asian drying, Tibetan uplift, and cooling of the Northern Hemisphere [J]. *Paleoceanography*, 1998, 13(3): 215-224.
- [51] Hovan S A, Rea D K, Pisias N G. Late Pleistocene continental climate and oceanic variability recorded in northwest pacific sediments [J]. *Paleoceanography*, 1991, 6(3): 349-370.
- [52] Janecek T R, Rea D K. Eolian deposition in the northeast Pacific Ocean: Cenozoic history of atmospheric circulation [J]. *GSA Bulletin*, 1983, 94(6): 730-738.
- [53] Leinen M, Heath G R. Sedimentary indicators of atmospheric activity in the Northern Hemisphere during the Cenozoic [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 1981, 36(1-2): 1-21.
- [54] Wan S M, Yu Z J, Clift P D, et al. History of Asian eolian input to the west Philippine Sea over the last one million years [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2012, 326-328: 152-159.