

DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2020110202

西太平洋海山区构造分区图编制及玄武岩 Nd 同位素填图

王厉星^{1,2,3}, 姚会强^{1,2,3}, 李正刚^{4,5}, 刘丽强^{1,2}, 韩冰^{1,2}, 彭天玥^{1,2}

1. 自然资源部海底矿产资源重点实验室, 广州 510075
2. 中国地质调查局广州海洋地质调查局, 广州 510760
3. 南方海洋科学与工程广东省实验室(广州), 广州 511458
4. 自然资源部海底科学重点实验室, 杭州 310059
5. 自然资源部第二海洋研究所, 杭州 310059

摘要: 基于公开的地球物理、地球化学数据以及国内外航次调查积累的海底地形等资料, 笔者编制了西太平洋海山区 1 : 500 万构造分区图。西太平洋海山区构造分区图包括 1 幅主图和 3 幅辅图, 主图为《西太平洋海山区构造分区图》, 共划分出了 3 个一级板块、22 个二级分区块体、12 个三级分区块体, 3 幅辅图分别为《西太平洋海山区地质构造图》、《西太平洋海山区布格重力异常图》和《西太平洋海山区 $\epsilon_{Nd}(t)$ 等值线图》。本文介绍了构造分区图编制的思路和方法、数据来源和构造单元的划分依据, 还通过搜集和整理西太平洋海山区玄武岩 $\epsilon_{Nd}(t)$ 同位素数据, 在研究区圈定了 9 个 Nd 同位素异常区, 并讨论了 Nd 同位素填图结果与地质过程的耦合关系以及其对海山区构造分区的指示意义。

关键词: 单元划分; 编图研究; Nd 同位素填图; 西太平洋

中图分类号: P736.5

文献标识码: A

Compilation of tectonic map and Nd isotopic mapping for basalts in the seamount area of Western Pacific Ocean

WANG Lixing^{1,2,3}, YAO Huiqiang^{1,2,3}, LI Zhenggang^{4,5}, LIU Liqiang^{1,2}, HAN Bing^{1,2}, PENG Tianyue^{1,2}

1. Key Laboratory of Mineral Resources, Ministry of Natural Resources, Guangzhou 510075, China
2. Guangzhou Marine Geological Survey, China Geology Survey, Guangzhou 510760, China
3. Southern Marine Science and Engineering Guangdong Laboratory (Guangzhou), Guangzhou 511458, China
4. Key Laboratory of seabed science, Ministry of Natural Resources, Hangzhou 310059, China
5. Second Institute of Oceanography, Ministry of Natural Resources, Hangzhou 310059, China

Abstract: The Tectonic Map of the Western Pacific Seamount Area (1 : 5 000 000) is compiled based on the topographic and geological data of the COMRA cruises over past years and the latest geophysical and geochemical data. The tectonic map of the Western Pacific seamount area consists of one main map and three auxiliary maps. The main map or the tectonic map of mapping area includes 3 first order plates, 22 second order blocks and 12 third-order blocks, while the three auxiliary maps includes the geological structure map of the seamount area in Western Pacific Ocean, the bouguer gravity anomaly map of seamount area in the Western Pacific Ocean and the contour map of $\epsilon_{Nd}(t)$ value in seamount area of Western Pacific Ocean. The guiding idea and method adopted by the map compilation, the data source, the content of the map and the division basis of tectonic units are introduced and described in this paper. Based on the $\epsilon_{Nd}(t)$ data of the basalts in the Western Pacific region, nine Nd isotopic anomaly areas are delineated. The coupling relationship between the Nd distribution pattern and geological processes and its significance to tectonic division of the area are further discussed.

Key words: tectonic division; research of map compilation; Nd isotopic mapping; Western Pacific

西太平洋是现今地球上巨型俯冲带发育区, 区内最深的海沟、众多的弧后盆地、新生的俯冲作用是西太平洋板块边缘的显著特征。该边缘构造带

地震和火山活动强烈, 是中生代以来太平洋板块与菲律宾海板块洋洋俯冲、板块旋转和弧后扩张等构造过程长期作用的结果。此外, 西太平洋板块是全

资助项目: 中国大洋矿产资源开发协会“十三五”项目“西太平洋海山区地质环境研究”(DY135-E2-2-01); 中国地质调查局项目(DD20191009)

作者简介: 王厉星(1989—), 男, 博士, 工程师, 主要从事海洋地质研究, E-mail: wanglx@gmgs.ac.cn

收稿日期: 2020-11-02; 改回日期: 2020-12-10. 周立君编辑

球海山系统分布最为集中的区域, 海山形态各异, 地貌复杂, 而且海山上发育了重要的战略性矿产资源——富钴结壳。西太平洋海山的成因机制及其资源环境效应已成为重要的科学问题。因此, 西太平洋是研究板块相互作用、构造演化、海山地形地貌及成因和资源勘查评价等研究的天然实验室。

然而, 西太平洋地区一直缺乏综合性的地质构造分区图件, 影响了西太平洋整体性的地质研究和调查活动。目前西太平洋构造图(1:2000万)于2016年由全球地质图编图委员会(CGMW)编制, 其经纬度坐标范围为70°S~60°N、100°E~160°W。该构造图主要包含了洋壳年龄、洋中脊和转换断层、俯冲带、断裂带、震中位置、大洋钻探站位等海洋地质要素^[1], 但缺少区域重磁异常、海山年龄等信息和细致的构造分区。尽管近年来一些学者在西太平洋区域陆续编制了多种图件, 如大地构造分区图、构造纲要图、构造地质图、地壳厚度图、重力和磁异常特征图等^[2-5], 但研究范围主要限于第二岛链以内, 针对菲律宾海板块以东的西太平洋海山区的研究工作较为缺乏。随着中国在西太平洋海山区的调查活动日益增多, 对综合性的区域地质信息图件的需求愈加迫切。

整合西太平洋海山区内各方面的地质调查资料, 如高精度的海底深度图、海山分布图、地质构造图、海底重力和磁异常图以及地球化学数据等, 并进一步划分相关的构造单元, 编制相关的构造分区图件, 可以更好地总结西太平洋板块相互作用和弧后盆地演变的关系, 发掘更多的海山分布规律和成因信息, 对于理解和推进西太平洋地区地质演化和资源分布研究非常重要。因此, 本文将从编图的角度, 梳理西太平洋海山区各构造分区单元的地质和地球物理特征, 同时系统搜集整理岩石地球化学数据, 开展研究区玄武岩 Nd 同位素填图的研究。

1 西太平洋海山区构造分区图编制

1.1 编图思路

本次西太平洋海山区构造分区图编制以洋底地理图为底图, 并添加了最新的西太平洋地质、地球物理和地球化学等研究成果, 包括最新编绘的构造图、近几年发表的重磁数据、玄武岩的同位素地球化学和年龄数据等^[1, 4-6]。为了使得主图图面整洁大方, 我们适当地减少了一些次要的图面要素, 如等深线和洋壳的年龄等。图件以一主图、三辅图的

形式呈现(图1-4), 主图为《西太平洋海山区构造分区图》, 辅图则包括《西太平洋海山区地质构造图》、《西太平洋海山区布格重力异常图》和《西太平洋海山区 $\epsilon_{Nd}(t)$ 等值线图》。主图主要反映研究区构造分区单元的综合信息(图1), 三幅辅图分别指示地表、地壳和地幔尺度浅—深层结合的地质信息(图2-4)。

1.2 编图方法

1.2.1 编制地理底图

根据研究区范围和图幅要求, 我们选取西太平洋海山区 0°~35°N、135°~180°E 作为编图范围。海底地形地貌数据融合了全球海底地貌数据库(GEBCO)及国内大洋航次调查获取的多波束地形数据, 形成了一套分辨率为 450 m 的网格文件。在此基础上利用 Global Mapper 软件对该网格文件进行地理坐标系设置(WGS 1984)和色阶调节(六角锥体模型), 最后生成 GEOTIF 文件作为地理底图(图1)。

1.2.2 编制构造分区图和辅图

在地理底图的基础上, 我们编制了比例尺为 1:500 万的一主图和三辅图。编图工作主要执行的标准有《GB/T 19996-2005 公开版地图质量评定标准》和《GB/T 33453-2016 基础地理信息数据库建设规范》。

《西太平洋海山区构造分区图》主要包含以下信息: 磁异常条带、活动和不活动的洋脊、转换断层、断裂带与推断断裂、俯冲带、热点和热点轨迹、大洋钻探钻孔、被正式命名的海底实体、重点海山与其形成年龄、板块运移方向和速率、构造分区单元及界线、 $\epsilon_{Nd}(t)$ 分区及界线(图1)。

《西太平洋海山区地质构造图》主要包含以下信息: 洋脊与转换断层、俯冲带、断裂带、洋壳的年龄、减薄/拉张的陆壳、未知的洋陆过渡带、地幔剥露杂岩和岛屿等(图2)。《西太平洋海山区布格重力异常图》展示了研究区布格重力异常分布特征, 其填色等值线图以 50 毫伽(10^{-5} m/s^2)为单位间隔绘制(图3)。《西太平洋海山区 $\epsilon_{Nd}(t)$ 等值线图》展示了我们用 Surfer 软件绘制的研究区玄武岩样品的 $\epsilon_{Nd}(t)$ 同位素填图结果, 其填色等值线图以 0.5 为单位间隔绘制(图4)。

1.2.3 作图方法

我们利用数据处理成图平台(Surfer、Global Mapper、ArcGIS等)将研究区地球物理、地球化学数据及地质资料进行了处理、整合和成图。图件坐

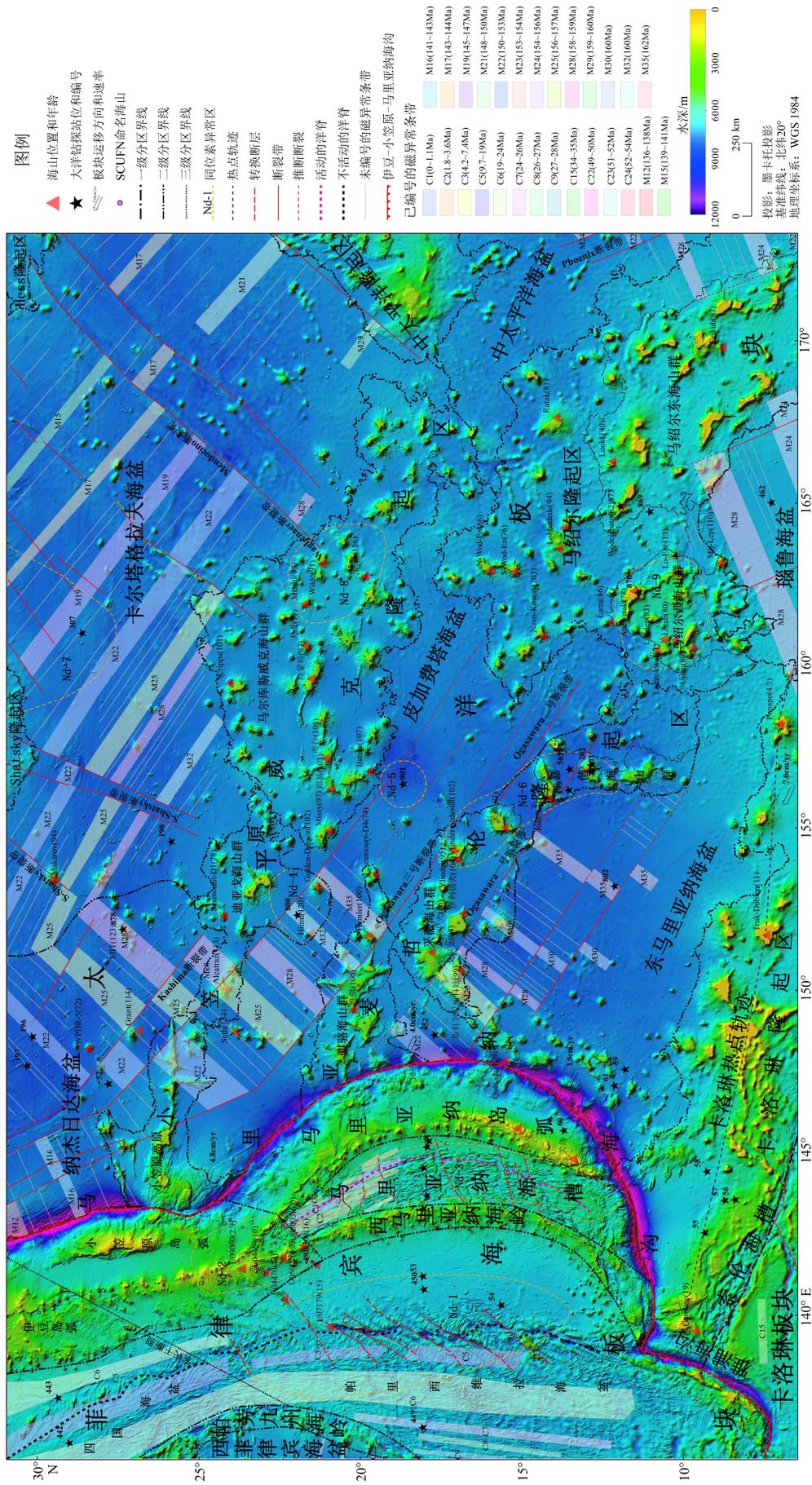


图1 西太平洋海山区构造分区图
Fig.1 Tectonic map of seamount area in the Western Pacific Ocean

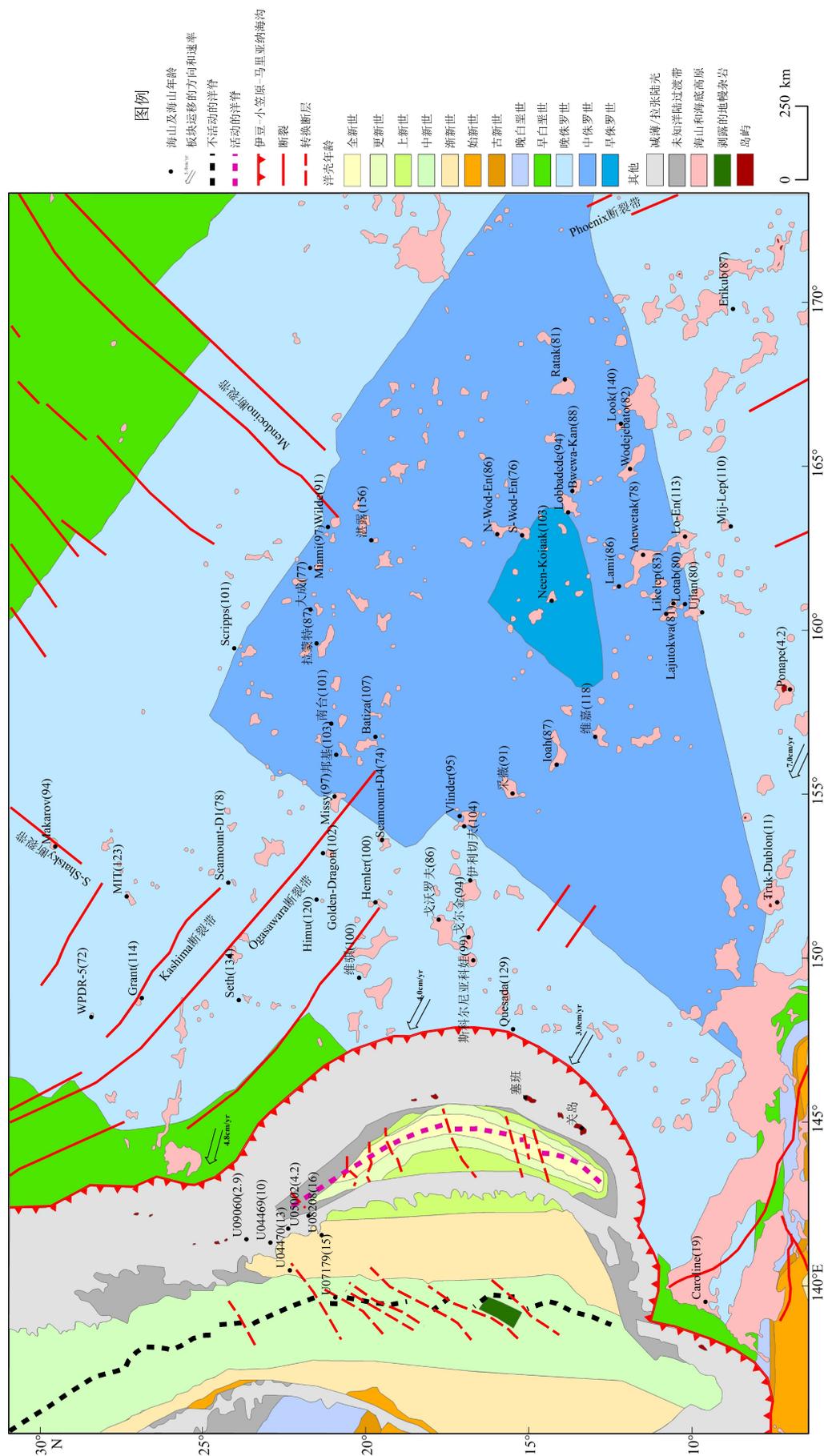
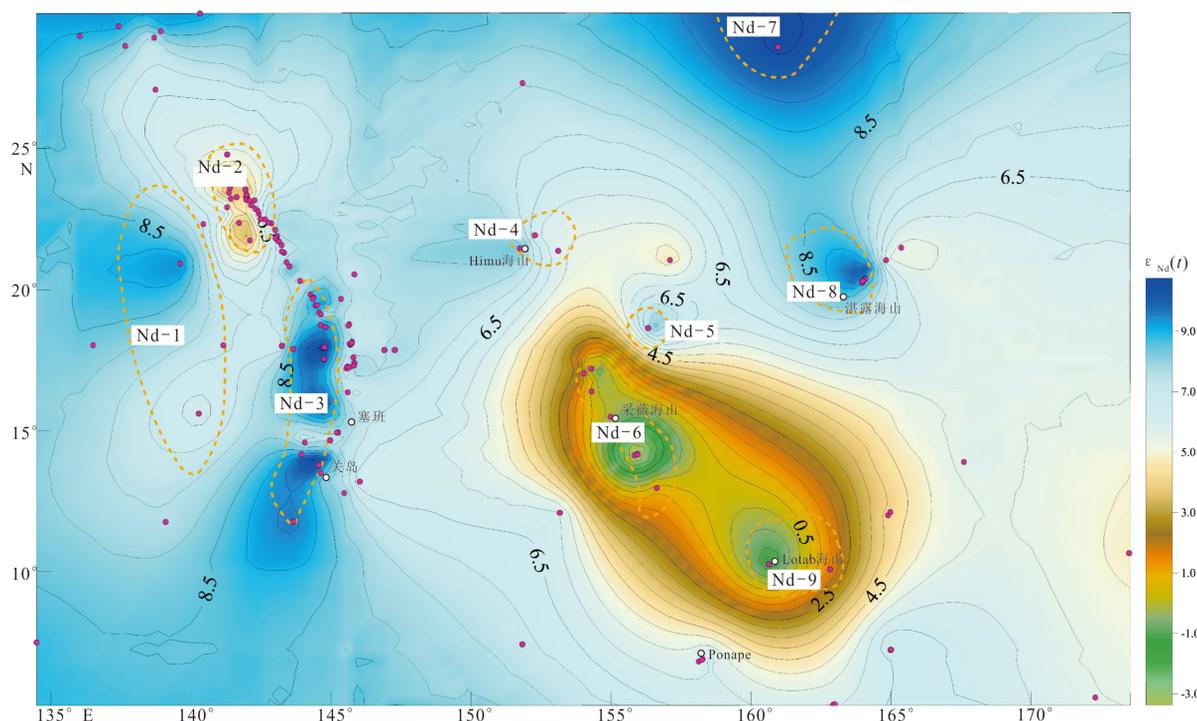


图 2 西太平洋海山区地质构造图^[1]
Fig.2 Geological structure map of seamount area in the Western Pacific Ocean^[1]

图 4 西太平洋海山区 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值等值线图Fig.4 Contour map of $\epsilon_{Nd}(t)$ value in seamount area of the Western Pacific Ocean

标系为 WGS 1984 坐标系, 投影方式为等角正圆柱投影, 即墨卡托 (MERCATOR) 投影, 基准纬线为 20°N。

1.3 主要资料来源

海底地貌数据来源于全球海底地貌数据库 (GEBCO) 及中国科考船多波束地形实测数据; 《西太平洋海山区地质构造图》资料来源于世界地质图编图委员会 (CGMW)^[1], 作了部分修改; 《西太平洋海山区布格重力异常图》格网数据来源于 WGM2012^[6]; 《西太平洋海山区 $\epsilon_{Nd}(t)$ 等值线图》中的 228 个 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值数据来源于 GEOROC 和 EarthChem 全球岩石地球化学数据库, 其他 133 个数据来源于已发表论文中的数据^[7-30]; 磁异常条带数据来自公开文献^[4, 20, 31-32]; 磁异常条带对应的新生代和中生代地质年代数据分别参考相应的文献^[33-34]; 构造单元名称部分参照已发表论文^[2, 35-37], 其他名称由本文作者根据单元内重点地理实体名字命名; 断裂和推断断裂根据洋壳年龄数据^[38]、洋底断裂名称数据库 (SCUFN)、大洋钻探航次报告^[39] 和公开文献^[31] 等资料综合绘制; 大洋钻探位置数据来源于 DSDP 和 ODP 的航次报告 (DSDP6、7、17、20、41、58、59、60、61、89 航次和 ODP129、143、144 航次); 重点海山的年龄数据来源于公开文献^[17, 40-43] 和中国大洋航次报告。

2 构造单元划分

2.1 构造分区单元

块体构造学说^[44-45] 是在全球板块构造理论上发展而来的。根据其大地构造体系, 它将板块作为一级构造单元, 块体作为二级构造单元。本次编图以块体构造学说作为指导思想, 结合地质构造图、重力图、磁力图、玄武岩 $\epsilon_{Nd}(t)$ 等值线图等产品以及其他资料的综合研究, 本文在研究区内共划分或圈定出了 3 个一级板块、22 个二级分区块体、12 个三级分区块体和 9 个 Nd 同位素异常区 (表 1)。

2.2 构造分区界线的圈定

按照块体构造理论的基本原则, 本次研究根据区域内海底地形地貌特征、地球物理场、构造演化历史、地壳年龄等资料对西太平洋海山区的构造单元进行了块体划分。

一级构造分区划分为太平洋板块、菲律宾海板块和卡罗琳板块。太平洋板块与菲律宾海板块、卡罗琳板块和菲律宾海板块的界线都存在明显的俯冲带 (图 2)。其中, 太平洋板块沿伊豆-小笠原-马里亚纳海沟向菲律宾海板块之下俯冲, 该俯冲带表现

表 1 西太平洋海山区主要构造分区单元
Table 1 Main tectonic units in the seamount area of Western Pacific Ocean

一级分区	二级分区	三级分区	Nd同位素异常区
菲律宾海板块	西菲律宾海盆		
	帕劳-九州海岭		
	四国-帕里西维拉海盆	四国海盆	
		帕里西维拉海盆	Nd-1
	伊豆-小笠原岛弧	伊豆岛弧	
		小笠原岛弧	Nd-2
	西马里亚纳海岭		
	马里亚纳海槽		Nd-3
	马里亚纳岛弧		
	太平洋板块	纳杰日达海盆	
Shatsky隆起区			
Hess隆起区			
卡尔塔格拉夫海盆			Nd-7
		小笠原高原	
小笠原威克隆起区		迪亚戈海山群	Nd-4
		马尔库斯威克海山群	Nd-8
中太平洋隆起区			
皮加费塔海盆			Nd-5
中太平洋海盆			
		骐骥海山群	
麦哲伦隆起区		采薇海山群	Nd-6
		嘉借海山群	Nd-6
马绍尔隆起区		马绍尔西海山群	Nd-9
		马绍尔东海山群	
东马里亚纳海盆			
卡洛琳隆起区			
瑙鲁海盆			
卡洛琳板块	西卡洛琳海盆		
	东卡洛琳海盆		

为典型的海沟地形、剧烈的火山和地震活动,因此,可以将海沟直接作为太平洋板块与菲律宾海板块的构造边界^[46]。同样地,菲律宾海板块与其东南侧的卡洛琳板块在研究区内的构造界线为雅浦海沟^[47]。卡洛琳板块沿雅浦海沟向菲律宾海板块下方俯冲,沿海沟发育有大角度的逆断层,并引发了相关的地震活动^[48]。

太平洋板块与卡洛琳板块的构造界线则较为模糊。一种观点认为两者的界线在卡洛琳隆起和东马里亚纳海盆之间,主要依据是大洋钻探 58 站位和 59 站位的基底分别为渐新世和中生代(图 1),因此板块界线可能在两站位之间^[49]。另外,卡洛琳高原(卡洛琳隆起区西部)玄武岩具有低 Sm/Yb 等地球化学特征,推断其下方的卡洛琳板块年龄更

小、岩石圈更薄,可能位于新的卡洛琳板块上。而卡洛琳群岛的 Truk、Ponape 和 Kusaie 岛则位于古老的太平洋板块上^[43]。但是,卡洛琳隆起和东马里亚纳海盆之间不存在海沟地形,不符合板块边界的基本条件。结合本研究搜集的区域重力场特征和磁异常条带资料分析,本文倾向于采纳另一种观点,即太平洋板块与卡洛琳板块之间以索伦海槽和穆绍海槽(图上未显示)为界^[2,50-51]。主要依据有:(1)索伦海槽和穆绍海槽具有强烈的负地形,水深分别可达 4000 和 7000 m;(2)索伦海槽和穆绍海槽的板块边界剖面具有极不寻常的变形构造特征,变形强度向穆绍海槽方向增加^[50];(3)卡洛琳板块边界的地质和地球物理证据显示,在索伦海槽区域,卡罗琳板块洋壳往太平洋洋壳上逆冲,而沿着穆绍海槽,卡洛琳盆地正俯冲到太平洋板块之下,两者俯冲极性相反^[52];(4)卡洛琳板块南边的新几内亚海沟(图上未显示)也反映了卡洛琳板块和澳大利亚板块之间汇聚的特征,因为在该边界下方通过地震层析成像检测到了俯冲板块的存在^[53]。

二级构造分区的块体划分主要以弧盆体系、地形地貌、布格重力异常等基准划分。其中菲律宾海板块的二级构造分区以弧盆体系划分。菲律宾海板块的盆地和弧(或海岭)水深差别较大,在地貌上表现出明显的变化(图 1)。菲律宾海板块各块体的布格重力异常差异也很明显,西菲律宾海盆、四国-帕里西维拉海盆和马里亚纳海槽表现为基本连续的重力高值,海盆两侧的海岭重力异常值较低(图 3)。3 个海盆的磁异常特征也各有差别,西菲律宾海盆识别出的磁异常条带为 C22-C24,方向为北西西向;四国-帕里西维拉海盆识别出的磁异常条带为 C5-C9,北部为北北西向,南部为近南北向,而南部扩张脊东侧未识别出明显的磁异常条带;马里亚纳海槽北部的磁异常调查结果识别出的磁异常条带为 C1-C3,展布方向为北北西向(图 1)。块体构造属性和形成年代也是板块内部块体划分的重要依据,西菲律宾海盆形成于 32~60 Ma;四国-帕里西维拉海盆形成于 29~16 Ma,两者都属于典型的弧后扩张盆地,至今已停止扩张;马里亚纳海槽从 5 Ma 之前开始形成,也属于典型的弧后扩张盆地,至今仍在活动^[20,51](图 2)。伊豆-小笠原岛弧与由西马里亚纳海岭、马里亚纳海槽和马里亚纳岛弧组成的块体沿小笠原高原南缘分为南北两部分,两者表现出不同的地质特征,包括弧岩浆作用的活动时代和地球化学特征^[2]。

太平洋板块和卡洛琳板块的二级构造单元主

要根据地形地貌、布格重力异常图($550 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$ 等值线)和磁异常条带的特征(信号强度、展布方向及对应的年龄)等综合信息划分为海盆和隆起区(图 1)。首先从水深和地貌情况来看,太平洋板块可大致分为北部、中部和南部 3 个海盆区。3 个海盆区中布格重力异常值为 $(550 \sim 600) \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$ 的海盆有两个(图 3),为太平洋板块西南部的中太平洋海盆和瑙鲁海盆,两海盆中断裂方向为北北西向,磁异常条带为北东东向(图 1)。其余海盆中大都存在大面积布格重力异常值大于 $600 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$ 的区域,可以被进一步细分(图 3)。结合海底断裂和磁异常特征,北部海盆区可一分为二,西侧为纳杰日达海盆(Nadezhda),区内断裂以北西向为主,如 Kashima 断裂带,识别出的磁异常条带分布方向为北东向;东侧为卡尔塔格拉夫海盆(Kartagraf),区内断裂带以北东向为主,如 S-Shatsky、Mendocino 和 Waghenaer 断裂带,识别出的磁异常条带展布方向为北西向。中部海盆区主要为皮加费塔海盆,区内断裂以北西向为主,如 Ogasawara 断裂带,识别出的磁异常条带为北东向,东南侧磁异常信号弱,前人称为“侏罗纪磁静区”^[54]。南部海盆区主要为东马里亚纳海盆,区内断裂呈北西向,识别出的磁异常条带为北东向。中太平洋海盆和瑙鲁海盆、皮加费塔海盆和东马里亚纳海盆具有相似的断裂走向和磁条带特征,它们早期可能具有相似的构造演化历史,后期受断裂和板内海山的影响而形成了独立的块体。因此,由板内海山群形成的地壳隆起组成了太平洋板块的另一种块体单元。结合地貌和重力异常特征,太平洋板块可划分出 Shatsky 隆起区、Hess 隆起区、小笠原-威克隆起区、中太平洋隆起区、麦哲伦隆起区、马绍尔隆起区和卡洛琳隆起区(图 1)。值得说明的是,卡洛琳隆起区仅包含了传统上的卡洛琳脊,而西卡洛琳脊则位于卡洛琳板块内。近南北向的奥瑞皮克隆起将卡洛琳板块划分为两个单元,分别为西卡洛琳海盆和东卡洛琳海盆。西卡洛琳海盆从北到南分别被西卡洛琳海脊、雅浦海沟、阿玉海槽和新几内亚海沟所围绕,东卡洛琳海盆从北至南的界线分别是索伦海槽、穆绍海槽和马努斯海沟^[2,51]。

三级构造分区的界线主要根据块体的地质特征、构造演化历史和布格重力异常图($500 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$ 等值线)圈定(图 1)。在菲律宾海板块,三级构造界线在四国-帕里西维拉海盆和伊豆-小笠原岛弧内圈定。前人根据海底地形和海盆形成时扩张方向的差异可将四国-帕里西维拉海盆分为四国海盆和帕

里西维拉海盆,两者以索夫干断裂(也称索夫干构造线)为界^[2]。大洋钻探449号站位对帕里西维拉海盆西部现场调查的结果表明,帕里西维拉海盆形成于大约30至18 Ma之间,大约在四国海盆形成5 Ma之后^[55]。在岛弧区,索夫干断裂把伊豆-小笠原弧细分为伊豆岛弧和小笠原岛弧,因为索夫干构造线是伊豆-小笠原弧南部高伸展区域和北部很少或没有伸展区域之间的调节断层^[39]。在太平洋板块,三级构造界线只在小笠原-威克隆起区、麦哲伦隆起区和马绍尔隆起区圈定。小笠原-威克隆起自西向东划分为小笠原高原、迪亚戈海山群和马尔库斯威克海山群;麦哲伦隆起区自北向南划为骐骆海山群、采薇海山群和嘉偕海山群;马绍尔隆起区自西向东划为马绍尔西海山群和马绍尔东海山群。

3 Nd同位素填图

Sm、Nd具有相似的地球化学性质,除了岩浆作用过程中Sm/Nd的比值能发生一定的变化,其他地质作用很难使其分离。因此,Sm-Nd同位素体系可以用来判别岩石圈演化过程中区域初生地壳加入与壳幔物质再循环机制、对岩浆物质来源等重要地质问题进行示踪研究,而Nd同位素填图是建立在Sm-Nd同位素系统基础上的地球化学研究方法之一。在陆地上,区域性的Nd同位素填图主要用来约束块体边界、讨论壳幔混合、地幔源区和岩石成因作用^[56-58]。近年来,海山区玄武岩的同位素研究主要用于岩石成因和源区探讨,而应用Nd同位素填图的方法来约束块体边界信息的研究较少^[20,43]。

我们重新整理和计算了前人在西太平洋地区已发表的同位素数据,再采用克里格网格化方法将得到的 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值绘制了《西太平洋海山区 $\epsilon_{Nd}(t)$ 等值线图》。地球化学异常是相对背景而存在的值特高或特低的现象,是元素地球化学分布的特殊模式。地球化学异常存在的地方称为异常区,而西太平洋海山区玄武岩的 $\epsilon_{Nd}(t)$ 异常区可以为构造分区单元提供深部软流圈地幔结构和成分的信息。因此,我们在软件自动生成的 $\epsilon_{Nd}(t)$ 等值线图上,结合西太平洋海山区各构造分区单元不同的地质属性和地球物理资料,在研究区内圈定了9个异常区(图4,自西向东依次编号)。其中,Nd-1、Nd-2和Nd-3为弧和弧后盆地的同位素异常区,其他为西太平洋海山和海盆构造单元中的异常区。

Nd-1异常区位于帕里西维拉海盆,区内共有7个数据点分布,北侧 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值为9.95,中部2个数据

据点的值为6.43和7.08,南侧较低,4个数据点的值为6.05~6.31,平均值为6.86。Nd-2异常区位于小笠原岛弧,区内共有48个数据点分布, $\epsilon_{Nd}(t)$ 值范围为2.89~7.70,平均值为4.58。Nd-3异常区位于马里亚纳海槽,区内共有29个数据点分布, $\epsilon_{Nd}(t)$ 值范围为6.08~11.9,异常区中部和南侧的 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值较北侧高,总体平均值为9.57。Nd-4异常区位于迪亚戈海山群,区内共有8个数据点分布, $\epsilon_{Nd}(t)$ 值范围为2.25~8.43, $\epsilon_{Nd}(t)$ 平均值为5.69。Nd-5异常区位于皮加费塔海盆中部,共有45个数据点, $\epsilon_{Nd}(t)$ 值范围为4.00~15.7,平均值为9.48。Nd-6异常区位于麦哲伦隆起区,共有9个数据点分布, $\epsilon_{Nd}(t)$ 值范围为-4.03~2.37,平均值为-1.10。Nd-7异常区位于卡尔塔格拉夫海盆,共有6个数据点分布, $\epsilon_{Nd}(t)$ 值范围为10.4~14.7,平均值为11.8。Nd-8异常区位于马尔库斯威克海山群东侧,共有6个数据点分布, $\epsilon_{Nd}(t)$ 值范围为6.98~11.0,平均值为9.17。Nd-9异常区位于马绍尔西海山群,共有4个数据点分布, $\epsilon_{Nd}(t)$ 值范围为-1.52~1.62,平均值为-0.08。对搜集到的数据进行初步统计,西太平洋海山区存在四种类型的Nd同位素异常区: $\epsilon_{Nd}(t)$ 平均值大于11的为特亏损区,如Nd-7异常区; $\epsilon_{Nd}(t)$ 平均值在7~11范围内的为较亏损区,如Nd-3、Nd-5和Nd-8异常区; $\epsilon_{Nd}(t)$ 平均值在0~7范围内的为弱亏损区,如Nd-1、Nd-2和Nd-4异常区; $\epsilon_{Nd}(t)$ 平均值小于0的为富集区,如Nd-6和Nd-9异常区(图4)。

在板块构造的框架下,块体构造理论是划分菲律宾海板块构造单元最合适的方法之一。与此同时,本文另外提出玄武岩 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值也可以作为块体划分的一个重要手段。帕里西维拉海盆和马里亚纳海槽分别是停止扩张和正在扩张的弧后盆地,两者Nd同位素填图结果存在着较大的差别。马里亚纳海槽的玄武岩(平均 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值为9.57)Nd同位素比帕里西维拉海盆的玄武岩(平均 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值为6.86)更为亏损,经向上,帕里西维拉海盆的 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值由北向南逐渐降低,而马里亚纳海槽的 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值则有相反的现象,其南部存在 $\epsilon_{Nd}(t)$ 的最高值。马里亚纳海槽南部与北部相对高 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值区被中间一个相对狭窄的 $\epsilon_{Nd}(t)$ 低值区隔开,反映了下伏软流圈地幔成分的不均一性。小笠原岛弧玄武岩的 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值是弱亏损区里最低的(平均 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值为4.58),与新生弧后盆地——马里亚纳海槽的玄武岩Nd同位素强烈亏损的特征形成了鲜明的对比。从马里亚纳海槽往北,玄武岩的 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值有一个逐渐降低的趋势,其源区可能经历了岩浆混合、地壳深熔等过程,是

新生岛弧成熟化的标志^[59]。

麦哲伦隆起区、小笠原-威克隆起区的海山群是中国大洋调查的重点区域。从前人资料来看,两个隆起区的海山群地貌、形成时代和底质分布都有较大的差异,本文讨论的Nd同位素填图结果也体现了这一特征。麦哲伦隆起区具有富集的Nd同位素异常区(平均 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值为-1.10),现有数据点都分布于采薇海山群南部和嘉偕海山群北部,大面积低的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值指示了海山玄武岩岩浆源区可能包含少量古老地壳的组分^[60]。小笠原-威克隆起区存在一个Nd同位素弱亏损区和一个较亏损区。Nd同位素弱亏损区位于迪亚戈海山群(数据来自Himu海山和Golden-Dragon海山,平均 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值为5.69),同时还有数据显示,迪亚戈海山群的玄武岩具有异常高的 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 比值,反映了该区存在一个特殊的地幔源区^[20,61]。小笠原-威克隆起区的较亏损区位于马尔库斯威克海山群(平均 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值为9.17),以上说明了小笠原-威克隆起区与麦哲伦隆起区下伏地幔的成分存在显著的差别。据前人研究,马绍尔隆起区的海山和麦哲伦隆起区的海山形成年代都为100~80 Ma,海山链近平行展布,距离小于1000 km,同位素组分都接近南太平洋同位素和热异常区(SOPITA)^[20-21]。根据本文统计的资料,马绍尔隆起区的海山玄武岩(平均 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值为-0.08)具有和麦哲伦隆起区玄武岩(平均 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值为-1.10)相近的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值,都属于Nd同位素富集区,更加说明了它们具有相似的岩浆源区。

皮加费塔海盆和卡尔塔格拉夫海盆的玄武岩Nd同位素数据较少,且数据基本上都集中于一个站位。皮加费塔海盆存在一个Nd同位素富集区,而卡尔塔格拉夫海盆存在研究区平均 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值最高(11.7)的Nd同位素特亏损区。海盆里的所有玄武岩样品都是通过大洋钻探的方式获得的,它们都属于MORB成因。皮加费塔海盆所处的洋壳(801站位)形成时代是中侏罗世,而卡尔塔格拉夫海盆所处的洋壳(307站位)形成时代是晚侏罗世(图2)。与东马里亚纳海盆中侏罗世洋壳玄武岩(802站位)的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值(6.39~7.14)相比,皮加费塔海盆的Nd同位素更为亏损(平均 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值为9.48),这可能与不同时代洋壳的源区性质差异有关。而卡尔塔格拉夫海盆玄武岩的Nd同位素(平均 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值为11.76)比东马里亚纳海盆亏损得多,可能是由于中侏罗世不同的古洋中脊(伊泽纳奇板块、法拉隆板块和太平洋板块之间的洋中脊)^[62]下方软流圈地幔性质差异造成的。

4 结论

(1)根据研究人员在西太平洋海山区内多年的调查成果,绘制了西太平洋海山区构造分区图,包括1幅主图和3幅辅图,主图为《西太平洋海山区构造分区图》,辅图分别为《西太平洋海山区地质构造图》、《西太平洋海山区布格重力异常图》和《西太平洋海山区 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 等值线图》。

(2)总结了西太平洋海底地貌、地质和地球物理等综合信息,初步对海山区进行了构造单元划分,共划分出了3个一级板块、22个二级分区块体、12个三级分区块体。

(3)首次搜集整理了西太平洋地区玄武岩 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 同位素数据,在研究区圈定了9个Nd同位素异常区,并将异常区大致分为特亏损区、较亏损区、弱亏损区和富集区四类。其中,麦哲伦隆起区南部和马绍尔隆起区西部玄武岩的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值接近于0,Nd同位素具有相对富集的特征,小笠原岛弧玄武岩的Nd同位素具有相对较亏损的特征,而皮加费塔海盆和卡尔塔格拉夫海盆玄武岩的Nd同位素具有相对亏损或强烈亏损的特征。

参考文献 (References)

- [1] Miles P, Pubellier M, Collot J. Structural Map of the Western Pacific Ocean at 1: 20 000 000 scale [Z]. CCGM-CGMW 2016.
- [2] 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.]
- [3] 温珍河, 张训华, 郝天珧, 等. 我国海洋地质编图现状、计划与主要进展[J]. *地球物理学报*, 2014, 57(12): 3907-3919. [WEN Zhenhe, ZHANG Xunhua, HAO Tianyao, et al. Progress in compilation of geoscience map series for China seas and adjacent regions [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2014, 57(12): 3907-3919.]
- [4] 夏成龙, 郑彦鹏, 董冬冬, 等. 菲律宾海盆磁条带特征及61 Ma以来的海底扩张过程重建[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2017, 37(1): 30-40. [XIA Chenglong, ZHENG Yanpeng, DONG Dongdong, et al. Characteristics of magnetic lineations and reconstruction of seafloor spreading processes of the Philippine sea basin since 61 Ma [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2017, 37(1): 30-40.]
- [5] 张正一, 范建柯, 白永良, 等. 中国海—西太平洋地区典型剖面的重-磁-震联合反演研究[J]. *地球物理学报*, 2018, 61(7): 2871-2891. [ZHANG Zhengyi, FAN Jianke, BAI Yongliang, et al. Joint inversion of gravity-magnetic-seismic data of a typical profile in the China Sea-Western Pacific area [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2018, 61(7): 2871-2891.]

- [6] Bonvalot S, Balmino G, Briais A, et al. World Gravity Map[Z]. BGI-CGMW-CNES-IRD, 2012.
- [7] Batiza R. Trace-element characteristics of Leg 61 basalts[R]. Initial Report of the Deep Sea Drilling Project, 1981, 61: 689-695.
- [8] Castillo P R. Geochemistry of Cretaceous volcanoclastic sediments in the Nauru and East Mariana basins provides insights into the mantle sources of giant oceanic plateaus [J]. *Geological Society, London, Special Publications*, 2004, 229(1): 353-368.
- [9] Castillo P R, Carlson R W, Batiza R. Origin of Nauru Basin igneous complex: Sr, Nd and Pb isotope and REE constraints [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1991, 103(1-4): 200-213.
- [10] Castillo P, Batiza R, Stern R J. Petrology and geochemistry of Nauru basin igneous complex: large-volume, off-ridge eruptions of MORB-like basalt during the Cretaceous[R]. Initial Report of the Deep Sea Drilling Project, 1986: 555-576.
- [11] Castillo P R, Floyd P A, France-Lanord C. Isotope geochemistry of leg 129 basalts: implications for the origin of the widespread cretaceous volcanic event in the pacific[C]//Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results. College Station, TX, 1992, 129: 405-413.
- [12] Castillo P R, Pringle M S, Carlson R W. East mariana basin tholeiites: cretaceous intraplate basalts or rift basalts related to the Ontong Java plume? [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1994, 123(1-3): 139-154.
- [13] Davis A S, Pringle M S, Pickthorn L B G, et al. Petrology and age of alkalic lava from the Ratak Chain of the Marshall Islands [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1989, 94(B5): 5757-5774.
- [14] Floyd P A, Castillo P R. Geochemistry and petrogenesis of Jurassic ocean crust basalts, site 801[C]//Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results. College Station, TX, 1992, 129: 361-388.
- [15] Floyd P A, Winchester J A, Castillo P R. Geochemistry and petrography of Cretaceous sills and lava flows, sites 800 and 802[C]//Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results. College Station, TX, 1992, 129: 345-359.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] Ishizuka O, Yuasa M, Tamura Y, et al. Migrating shoshonitic magmatism tracks Izu-Bonin-Mariana intra-oceanic arc rift propagation [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2010, 294(1-2): 111-122.
- [19] Kelley K A, Plank T, Ludden J, et al. Composition of altered oceanic crust at ODP Sites 801 and 1149 [J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2003, 4(6): 8910.
- [20] Koppers A A P, Staudigel H, Pringle M S, et al. Short-lived and discontinuous intraplate volcanism in the South Pacific: Hot spots or extensional volcanism? [J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2003, 4(10): 1089.
- [21] Koppers A A P, Staudigel H, Wijbrans J R, et al. The Magellan seamount trail: implications for Cretaceous hotspot volcanism and absolute Pacific plate motion [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1998, 163(1-4): 53-68.
- [22] Lee J I, Hur S D, Park B K, et al. Geochemistry and K-Ar Age of Alkali Basalts from Weno Island, Caroline Islands, Western Pacific [J]. *Ocean & Polar Research*, 2001, 23(1): 23-34.
- [23] Mahoney J. J. An isotopic survey of pacific oceanic plateaus: implications for their nature and origin[M]//Keating B H, Fryer P, Batiza R, et al. Seamounts, Islands, and Atolls. Washington DC: AGU, 1987: 207-220.
- [24] Meijer A, Anthony E, Reagan M. Petrology of volcanic rocks from the fore-arc sites[R]. Initial Report of the Deep Sea Drilling Project, 1981, 60: 709-729.
- [25] Michael P J. Implications for magmatic processes at Ontong Java plateau from volatile and major element contents of Cretaceous basalt glasses [J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2000, 1(12): 1008.
- [26] 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.
- [27] Pearce J A, Kempton P D, Nowell G M, et al. Hf-Nd element and isotope perspective on the nature and provenance of mantle and subduction components in Western Pacific Arc-Basin systems [J]. *Journal of Petrology*, 1999, 40(11): 1579-1611.
- [28] Staudigel H, Park K H, Pringle M, et al. The longevity of the South Pacific isotopic and thermal anomaly [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1991, 102(1): 24-44.
- [29] Straub S M, Woodhead J D, Arculus R J. Temporal evolution of the Mariana Arc: Mantle wedge and subducted slab controls revealed with a tephra perspective [J]. *Journal of Petrology*, 2015, 56(2): 409-439.
- [30] Tokuyama H, Batiza R. Chemical composition of igneous rocks and origin of the sill and pillow-basalt complex of Nauru Basin, Southwest Pacific[R]. Initial Report of the Deep Sea Drilling Project, 1981, 61: 673-687.
- [31] Larson R L, Yves Lancelot, Andrew Fisher, et al. Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results[R]. College Station, TX, United States: Texas A & M University, 1990, 129: 551-569.
- [32] Yamazaki T, Seama N, Okino K, et al. Spreading process of the northern Mariana Trough: Rifting-spreading transition at 22°N [J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2003, 4(9): 1075.
- [33] Cande S C, Kent D V. Revised calibration of the geomagnetic polarity timescale for the Late Cretaceous and Cenozoic [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1995, 100(B4): 6093-6095.
- [34] Ogg J G. Geomagnetic polarity time scale[M]//The Geologic Time Scale. Amsterdam: Elsevier, 2012: 85-113.
- [35] Пушаровский Ю М, 李寿田. 太平洋大地构造(续一)[J]. 海洋地质译丛, 1995(2): 18-36. [LI Shoutian, Пушаровский Ю М. Geotectonic development in the Pacific and its surrounding areas (1) [J]. *Translation of Marine Geology*, 1995(2): 18-36.]
- [36] Reisberg L, Rouxel O, Ludden J, et al. Re-Os results from ODP Site 801: Evidence for extensive Re uptake during alteration of oceanic crust [J]. *Chemical Geology*, 2008, 248(3-4): 256-271.

- [37] 黄奇瑜, 余梦明. 边缘海的形成机制[M]//大洋钻探五十年. 上海: 同济大学出版社, 2018: 147-157. [HUANG Qiyu, YU Mengming. Formation mechanism of marginal sea[M]//Fifty Years of Ocean Drilling. Shanghai: Tongji University Press, 2018: 147-157.]
- [38] Müller R D, Seton M, Zahirovic S, et al. Ocean basin evolution and global-scale plate reorganization events since Pangea breakup [J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 2016, 44: 107-138.
- [39] Expedition 350 Scientists. Izu-Bonin-Mariana rear arc: the missing half of the subduction factory[R]. International Ocean Discovery Program Expedition 350 Preliminary Report, 2014.
- [40] Hirano N, Ogawa Y, Saito K. Long-lived early Cretaceous seamount volcanism in the Mariana Trench, Western Pacific Ocean [J]. *Marine Geology*, 2002, 189 (3-4): 371-379.
- [41] Koppers A A P, Staudigel H, Duncan R A. High-resolution $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating of the oldest oceanic basement basalts in the western Pacific basin [J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2003, 4 (11): 8914.
- [42] Clouard V, Bonneville A. Ages of seamounts, islands, and plateaus on the Pacific plate[Z]. Geological Society of America Special Paper, 2005, 388: 71-90.
- [43] 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.
- [44] 刘光鼎. 中国大陆构造格架的动力学演化[J]. *地学前缘*, 2007, 14 (3): 39-46. [LIU Guangding. Geodynamical evolution and tectonic framework of China [J]. *Earth Science Frontiers*, 2007, 14 (3): 39-46.]
- [45] 张训华, 孟祥君, 韩波. 块体与块体构造学说[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2009, 29 (5): 59-64. [ZHANG Xunhua, MENG Xiangjun, HAN Bo. Block and block tectonics [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2009, 29 (5): 59-64.]
- [46] Takahashi N, Kodaira S, Klemperer S L, et al. Crustal structure and evolution of the Mariana intra-oceanic island arc [J]. *Geology*, 2007, 35 (3): 203-206.
- [47] 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.
- [48] Ranken B, Cardwell R K, Karig D E. Kinematics of the Philippine Sea Plate [J]. *Tectonics*, 1984, 3 (5): 555-575.
- [49] Heezen B C, Pimm A C. Underway Observations, Leg 6[R]. Initial Reports of the Deep Sea Drilling Project, Volume VI. Washington (U. S. Government Printing Office), 1971: 691-708.
- [50] Weissel J K, Anderson R N. Is there a Caroline plate? [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1978, 41 (2): 143-158.
- [51] 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.
- [52] 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. Boston, MA: Springer, 1988: 277-301.
- [53] Tregoning P, Gorbатов A. Evidence for active subduction at the New Guinea Trench [J]. *Geophysical Research Letters*, 2004, 31 (13): L13608.
- [54] Stadler T J, Tominaga M. Intraplate volcanism of the western Pacific: New insights from geological and geophysical observations in the Pigafetta Basin [J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2015, 16 (9): 3015-3033.
- [55] Kroenke L, Scott R, et al. Initial Reports of the Deep Sea Drilling Project[R]. DSDP, 59: Washington (U. S. Govt. Printing Office), 1980.
- [56] Chen J F, Jahn B M. Crustal evolution of southeastern China: Nd and Sr isotopic evidence [J]. *Tectonophysics*, 1998, 284 (1-2): 101-133.
- [57] 杜斌, 王长明, 贺昕宇, 等. 锆石Hf和全岩Nd同位素填图研究进展: 以三江特提斯造山带为例[J]. *岩石学报*, 2016, 32 (8): 2555-2570. [DU Bin, WANG Changming, HE Xinyu, et al. Advances in research of bulk-rock Nd and zircon Hf isotopic mappings: Case study of the Sanjiang Tethyan Orogen [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2016, 32 (8): 2555-2570.]
- [58] 侯增谦, 王涛. 同位素填图与深部物质探测(II): 揭示地壳三维架构与区域成矿规律[J]. *地学前缘*, 2018, 25 (6): 20-41. [HOU Zengqian, WANG Tao. Isotopic mapping and deep material probing (II): imaging crustal architecture and its control on mineral systems [J]. *Earth Science Frontiers*, 2018, 25 (6): 20-41.]
- [59] Ribeiro J M, Ishizuka O, Lee C T A, et al. Evolution and maturation of the nascent Mariana arc [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2020, 530: 115912.
- [60] Zindler A, Hart S. Chemical geodynamics [J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 1986, 14 (1): 493-571.
- [61] Konter J G, Hanan B B, Blichert-Toft J, et al. One hundred million years of mantle geochemical history suggest the retiring of mantle plumes is premature [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2008, 275 (3-4): 285-295.
- [62] Smith A D. A plate model for Jurassic to Recent intraplate volcanism in the Pacific Ocean basin[M]//Foulger G R, Jurdy D M. Plates, Plumes, and Planetary Processes. Geological Society of America Special Paper 430, 2007: 471-495.