

DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2019090301

雅浦沟-弧体系构造演化过程

张臻^{1,2}, 李三忠^{1,2}

1. 海底科学与探测技术教育部重点实验室, 青岛 266100

2. 中国海洋大学海洋地球科学学院, 青岛 266100

摘要: 雅浦沟-弧体系具有十分独特的地质特征, 雅浦岛弧以变质岩为主, 岛弧岩浆作用较为缺乏, 同时雅浦沟-弧距离异常短, 增生楔缺失。在总结雅浦沟-弧系统及其邻区的地球化学、地球物理以及构造特征等证据的基础上, 探讨了雅浦沟-弧系统的构造演化过程。雅浦岛上的变质基底具有相对较高的 K_2O 含量、高 Ti 含量以及较低的 $^{87}Sr/^{86}Sr$ 比值, 表明雅浦岛上的变质基底为帕里西维拉海盆洋壳的一部分。雅浦海沟东侧存在一块水深较深的三角形区域将雅浦岛弧与加罗林海岭间隔开来, 地球物理特征显示该区域并没有受到加罗林热点的影响, 说明加罗林海岭并没有与雅浦岛弧直接碰撞。结合帕里西维拉海盆在 20~15 Ma 的 NE-SW 向扩张以及与之相关的海盆东西两侧洋壳发生的左旋相对移动, 推测雅浦海沟很可能是雅浦岛弧东侧的扩张中心暴露转变成的俯冲带, 而雅浦海沟东侧的三角形区域则为俯冲板片重新暴露的结果。

关键词: 雅浦岛弧; 帕里西维拉海盆; 索罗尔海槽; 构造演化

中图分类号: P736.14

文献标识码: A

Tectonic evolution of the Yap trench-arc system

ZHANG Zhen^{1,2}, LI Sanzhong^{1,2}

1. Key Lab of Submarine Geosciences and Exploration Techniques, Ministry of Education, Qingdao 266100, Shandong, China

2. College of Marine Geoscience, Ocean University of China, Qingdao 266100, Shandong, China

Abstract: The geological characteristics of the Yap trench-arc system is quite unique, which is dominated by metamorphic rocks and lack of island arc magmatism. Meanwhile, the trench-island distance of the Yap trench-arc system is abnormally short and the accretion wedge is absent. In this paper, the tectonic evolution of the Yap trench-arc system is discussed on the basis of geochemical, geophysical and tectonic data. The metamorphic basement of Yap island has relatively high K_2O , Ti and low $^{87}Sr/^{86}Sr$ ratio, which indicates that the basement is once the oceanic crust of the Parece-Vela basin. A deep triangular area is located on the east side of the Yap trench which separates the Yap island arc from the Caroline ridge. The geophysical characteristics of this triangular area demonstrate that the area has not been affected by the Caroline Hotspot, and then the Caroline ridge does not collide with the Yap island arc directly. Considering the spreading of the Parece-Vela basin in NE-SW trending at 20~15 Ma and the relative sinistral movement of the oceanic crust on both sides of the Parece-Vela basin, the Yap trench is probably a subduction zone formed by the exposure of the spreading center on the eastern side of the Yap island arc, while the triangular area on the eastern side of the Yap trench is caused by the re-exposure of the subduction plates.

Key words: Yap island arc; Parece-Vela basin; Sorol trough; tectonic evolution

雅浦岛弧位于菲律宾海板块东南边界, 是太平洋板块和加罗林板块向菲律宾海板块之下俯冲的结果。前人研究将雅浦岛弧和帕劳岛弧归结为伊豆-小笠原-马里亚纳岛弧体系的组成部分^[1], 并认为马里亚纳、雅浦和帕劳岛弧分别代表岛弧演化过程中的最初阶段、过渡阶段和成熟阶段^[2]。与其他岛弧相比, 雅浦岛弧具有十分独特的地质特征, 主要

包括以下几个方面: (1) 雅浦岛弧主要由变质岩组成, 自西向东由绿片岩相转变为角闪岩相, 变质程度逐渐加深, 而雅浦岛弧火山岩分布较少^[3-4]; (2) 雅浦岛弧地震以浅源地震为主, 震源深度多小于 40 km^[5]; (3) 雅浦岛弧沟弧距离为 50 km 左右^[6], 明显短于西太平洋区域其他成熟岛弧的沟弧距离 (100~200 km)^[7-8]; (4) 雅浦岛弧缺少典型的弧前增生楔^[9]。

资助项目: 中央高校基本科研专项资金资助项目“马里亚纳俯冲带地幔楔对流样式”(2017062021); 国家自然科学基金杰出青年基金项目“构造地质学”(41325009)

作者简介: 张臻 (1991—), 男, 博士, 从事构造地质学及海洋地质学研究, E-mail: ZhangZ0422@163.com

收稿日期: 2019-09-03; 改回日期: 2019-09-21. 文凤英编辑

McCabe 和 Uyeda^[10] 认为加罗林海岭在早中新世与雅浦海沟碰撞, 后人对于雅浦区域的研究则集中在加罗林海岭碰撞的影响, 认为该碰撞导致了雅浦岛弧火山活动的终止^[4] 或减弱^[5-6], 而雅浦岛弧缺失的增生楔可能与加罗林海岭俯冲碰撞导致的俯冲侵蚀有关^[4,6]。然而, 现今地形资料显示加罗林海岭与雅浦海沟并非直接接触, 二者中间存在一个明显的低地形区域, 前人认为该区域可能是俯冲板片前缘正断层控制的半地堑结构^[6,11-12]。同时雅浦岛的变质基底以及雅浦岛以南的岛弧变质岩为高温—中温、低压—中压变质作用的产物^[3,13], 缺少与碰撞相关的高压变质岩。因此, 加罗林海岭是否与雅浦岛弧发生碰撞仍需要进一步研究, 而前人所提出的雅浦岛弧构造演化模型^[4,6,10,12] 多数以加罗林海岭与雅浦岛弧的碰撞为前提, 这些模型也需要重新考虑。由此, 本文通过总结雅浦区域的地球化学、地震、重力异常等多方面证据, 对雅浦沟-弧体系的构造演化过程提出了一个全新的解释。

1 区域地质背景

雅浦海沟和雅浦岛弧是太平洋板块、加罗林板块和菲律宾海板块汇聚所形成的沟-弧构造体系, 大

地构造背景十分复杂(图 1a)。雅浦海沟北侧与帕里西维拉海盆扩张中心相接, 南侧与帕劳海沟相连, 东侧为加罗林热点作用下形成的加罗林海岭, 索罗尔海槽将加罗林海岭分为东加罗林海岭和西加罗林海岭两个部分(图 1b)。

帕里西维拉海盆是渐新世沿着九州-帕劳海岭打开的弧后盆地, 海盆内部 S 型转换断层分割的洋中脊段呈雁列状排布(图 1a)^[14]。前人通过对地形和磁条带研究, 提出帕里西维拉海盆经历了两个阶段的盆地扩张过程, 其初始扩张方向为 E-W 向, 在 20~19 Ma 扩张方向转变为 NE-SW^[14-15]。帕里西维拉海盆的洋壳扩张过程最终在约 15 Ma 终止^[16], 然而沿着帕里西维拉海盆的扩张中心还存在一期 13~8.7 Ma 的岩浆事件, 分别为四国海盆的 Kinan 海山链^[17]、帕里西维拉海盆中部的 Gadzilla Megamullion 拆离断层^[18] 以及海盆最南部的岛弧岩浆事件^[19](图 1a)。

加罗林海岭为古近纪加罗林热点作用所形成的隆起, 其包括东加罗林海岭和西加罗林海岭两个部分, 分别属于太平洋板块和加罗林板块, 二者之间以索罗尔海槽为界(图 1b)。然而, 太平洋板块和加罗林板块沿着马里亚纳-雅浦海沟俯冲速率差异较大, 北部的太平洋板块的俯冲速率为 20 mm/a, 而加罗林板块的俯冲速率仅为 5 mm/a^[20]。地震以及

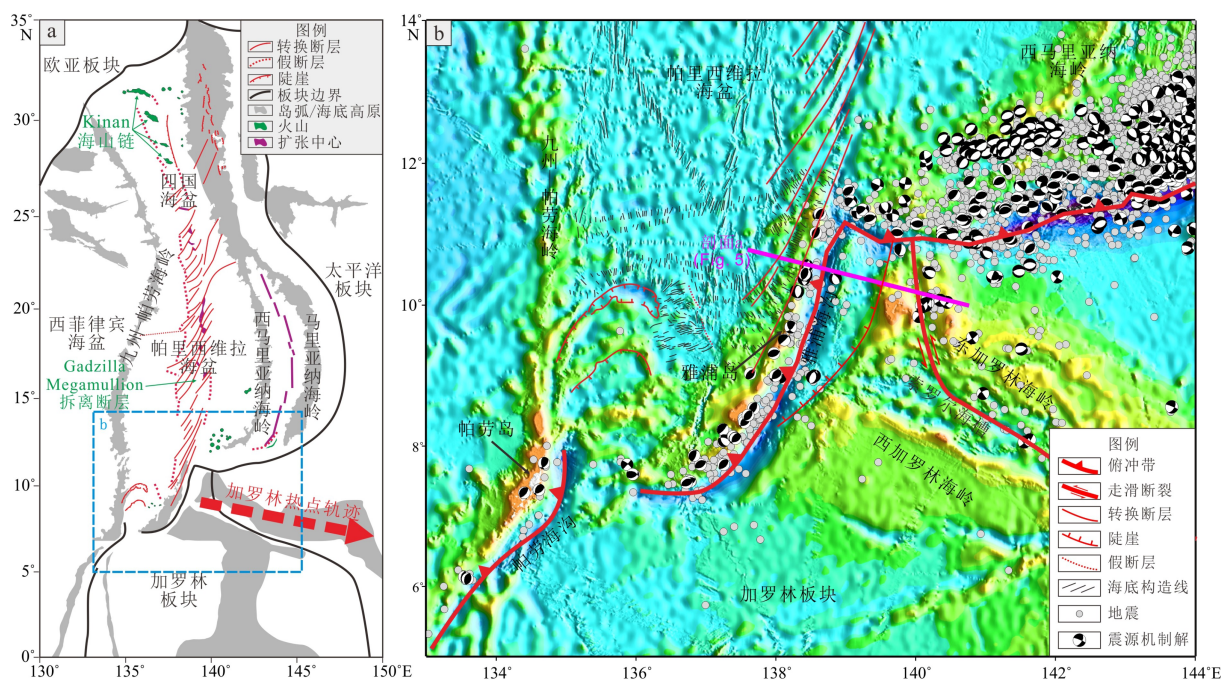


图 1 四国海盆、帕里西维拉海盆以及加罗林板块区域构造简图 (a) 与雅浦岛弧及周边的区域地质概况 (b)

水深数据来源于 GEBCO 2019; 地震数据来源于 USGS 和 CMT

Fig.1 a: Regional tectonic map of the Shikoku basin, the Parece-Vela basin and the Caroline plate; b: Geological map of the Yap arc and its vicinity

bathymetry data from GEBCO 2019; Earthquake data from USGS and CMT

重力资料研究显示索罗尔海槽具有扩张中心的属性,并且有洋壳的存在^[21],然而现今索罗尔海槽内部的地震多为走滑型地震(图1),这与太平洋板块和加罗林板块之间相对运动相对应。Hawkins和Batiza^[4]认为加罗林海岭与雅浦岛弧在早中新世时发生碰撞,致使雅浦岛弧的火山活动停止以及弧前侵蚀^[10]。虽然,岩石地球化学研究证实雅浦岛弧以变质岩为主,岩浆活动较少,但是雅浦岛弧变质岩多为中—低压变质作用导致^[3,13],缺少与碰撞相关的高压—超高压变质岩的报道。同时,雅浦海沟和加罗林海岭之间存在一个三角形的地形平坦区域(图1),该区域内没有与加罗林热点相关的地形隆起。

雅浦岛弧西侧为帕里西维拉海盆的洋壳,主体构造线走向为N-S向(图1b)。Okino等^[22]通过地球物理资料的研究发现在该区域内存在一条近E-W向延伸的扩张中心。该扩张中心形成的洋壳构造线走向为NE-SW向,其东侧为帕里西维拉海盆的洋壳的N-S向构造线区域,二者之间以假断层为界(图1)。Okino等^[22]认为这段扩张中心可能为帕里西维拉海盆早期扩张中心的一部分。

2 雅浦岛弧的地壳性质

前人对于雅浦岛弧岩石地球化学研究多集中在雅浦岛。Tayama^[23]最早将雅浦岛地层划分为4个组,分别为雅浦组、Map组、Tomil集块岩和第四纪沉积地层(图2)。雅浦组是雅浦岛的基底,主要由基性火山岩变质而成的绿片岩和角闪岩组成,同时可见超基性—酸性侵入体和岩脉。覆盖在雅浦组之上的Map组主要为构造角砾岩、砂岩以及粉砂岩组成的沉积岩系,底部发现有角闪岩和绿片岩碎块,Map组有孔虫化石指示其沉积发生在晚渐新世—中新世^[24]。Tomil集块岩由安山岩熔岩、角砾岩和凝灰岩组成,不整合于雅浦组和Map组之上。岩石地球化学研究表明Tomil集块岩中的安山岩属于钙碱性或岛弧拉斑玄武岩系列,与马里亚纳岛弧和帕劳岛弧类似^[3]。由此可见,雅浦岛的构造演化可大体分为3个阶段:晚渐新世以前雅浦组的基性火山岩喷发以及绿片岩相和角闪岩相的变质作用、晚渐新世—中新世雅浦组变质岩风化沉积作用形成的Map组、中新世以后岛弧岩浆作用形成的Tomil集块岩。

岛弧火山岩组合多数以钙碱性系列的安山岩-英安岩-流纹岩组合为主,且K₂O含量较低。雅浦

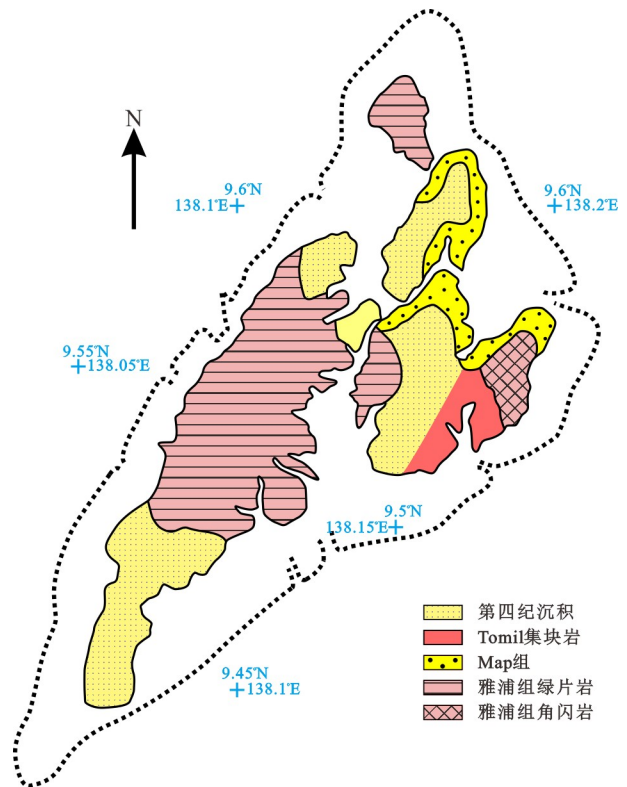


图2 雅浦岛地质图^[3]

Fig.2 Geological map of the Yap Island^[3]

组由绿片岩相-角闪岩相的变质岩组成,根据Pearce^[25]提出的F1-F2判别图解(图3a),雅浦组变质岩原岩属于洋底玄武岩,明显区别于岛弧玄武岩。在板片俯冲过程中,由于Ti存于金红石和钛铁矿等残留体中进入地幔,加上其他不相容元素由于俯冲流体萃取作用,最终导致岛弧火山岩的TiO₂含量较低,因此Ti含量在岛弧和弧后盆地区域样品中差别较为明显。雅浦组的变质岩Ti含量较高,与帕里西维拉海盆玄武岩相近,在Cr-Ti图解上多落于洋中脊玄武岩区域(图3b),与帕里西维拉海盆洋壳玄武岩类似。雅浦岛弧在同位素方面的研究十分匮乏,仅有Matsuda等^[2]报道了一个雅浦岛绿片岩的⁸⁷Sr/⁸⁶Sr比值,为0.7029。马里亚纳岛弧岩浆岩的⁸⁷Sr/⁸⁶Sr比值远高于0.703(图3c),雅浦岛绿片岩的⁸⁷Sr/⁸⁶Sr比值更接近于四国海盆洋壳的Sr同位素比值。因此,雅浦组在地球化学特征上更接近于帕里西维拉海盆洋壳,并非与岛弧岩浆作用相关。根据雅浦岛弧及周边区域构造解析,在雅浦岛弧西侧可以识别出NE-SW向的转换断层以及与之相关的NW-SE向海底构造线(图1),表明雅浦组的岩浆作用发生在帕里西维拉海盆NE-SW向扩张时期,也就是20~15 Ma期间^[16]。

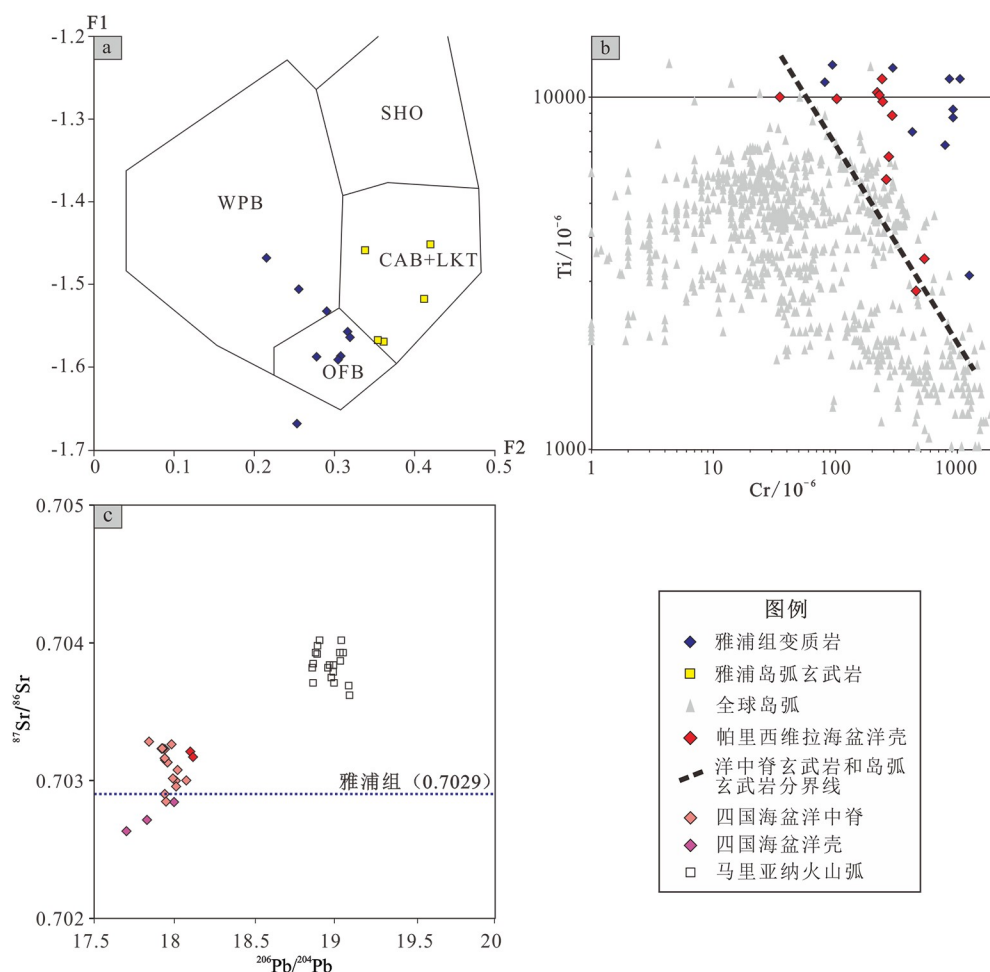


图 3 雅浦岛变质岩和岛弧岩浆岩 F1-F2 图解 (a) 与雅浦组变质岩 Cr-Ti 图解 (b) 及帕里西维拉海盆洋壳以及马里亚纳火山弧的 Pb-Sr 同位素图解 (c)

WPB: 板内玄武岩; SHO: 钾玄岩; CAB: 钙碱性玄武岩; LKT: 低钾拉斑玄武岩和岛弧玄武岩; OFB: 洋底玄武岩. 雅浦组变质岩数据来自于参考文献 [3, 4, 26], 雅浦岛弧岩浆岩数据来自于参考文献 [19], 帕里西维拉海盆数据来自于参考文献 [27-29], 马里亚纳火山弧数据来自于参考文献 [30-34], 全球岛弧数据来自于 GEOROC

Fig.3 a: F1-F2 diagram of the metamorphic rocks and island arc igneous rocks from the Yap island(WPB: Within Plate Basalts; SHO: Shoshonites; CAB: Calc-Alkali Basalts; LKT: Low-potassium Tholeiites and Island Arc Basalts; OFB: Ocean Floor Basalts); b: Cr-Ti diagram of the metamorphic rocks from the Yap Formation; c: Isotope Pb-Sr diagram of the Parece-Vela basin and the Mariana volcanic arc (Data source: Metamorphic rocks of Yap group: [3, 4, 26]; island arc igneous rocks from the Yap Island: [19]; Parece-Vela Basin: [27-29]; Mariana volcanic arc: [27-29]; global island arc: GEOROC)

3 加罗林海岭对雅浦沟-弧系统的影响

加罗林海岭与雅浦岛弧的碰撞一直是雅浦岛弧研究的重点。McCabe 和 Uyeda^[10]认为加罗林海岭在早中新世与雅浦岛弧发生碰撞, 并导致雅浦岛弧活动停止。Fujiwara 等^[6]认为碰撞发生在晚渐新世, 碰撞导致雅浦岛弧的弧前部分缺失、异常近的沟-弧距离、雅浦弧前下地壳物质的暴露以及雅浦岛弧的变质作用。然而, 现今地形数据显示, 加罗林海岭并未与雅浦岛弧相接, 二者之间存在一个三

角形的平坦地形区域(图 1), 该区域水深较深。在俯冲前缘区域的俯冲板片弯曲通常情况下会导致平行于海沟的正断层, Fujiwara 等^[6]认为这些正断层所控制的半地堑结构形成了这个三角形区域, Dong 等^[12]认为加罗林海岭和雅浦岛弧在早中新世发生碰撞, 晚中新世时期开始的索罗尔海槽的扩张导致了半地堑结构的形成。

加罗林海岭是热点所导致的地形隆起, 热点的岩浆作用通常会形成沿着热点轨迹的地球物理特征异常, 包括凸起的地形、加厚的洋壳、高的自由空间重力异常以及较低的布格重力异常。与加罗

林海岭相比,雅浦海沟东侧的三角形区域水深较深,在重力上表现为较低的自由空间重力异常。根据 Fujiwara 等^[6]的半地堑模型,该区域东部边界为切穿岩石圈的正断层,然而该三角形区域内地震较少,在其东部边界并没有观测到与正断层相关的地震发生(图 1b)。在半地堑模型中的正断层不会改变地壳厚度,然而该三角形区域内的地壳厚度明显比加罗林海岭薄(图 4c)。对于 Dong 等^[12]提出的索罗尔海槽扩张形成半地堑的模型,该三角区域内应该存在索罗尔海槽向西的延伸,然而该区域内并没有观测到与索罗尔海槽现今地震类似的走滑性质的地震(图 1b),说明索罗尔海槽的中央裂谷并未延伸到该区域内部。同时该区域内构造线多为 N-S 走向,与索罗尔海槽 N-S 向扩张形成的 E-W 向构造线相悖。因此,该三角形区域内的洋壳并未受到加罗林海岭的影响,同时也表明加罗林海岭并未与雅浦岛弧发生碰撞。另一方面,雅浦岛弧基底是中温—高温变质作用导致的绿片岩相-角闪岩相变质作用^[3,13],并非碰撞相关的高压—超高压变质作用,这也印证了雅浦岛弧与加罗林海岭之间并未发生碰撞。

4 雅浦沟-弧系统俯冲启动时间

雅浦岛弧的岛弧岩浆作用最典型代表为雅浦岛上的 Tomil 集块岩,根据 Map 组晚渐新世—中新世的沉积历史^[24]推断, Tomil 集块岩所代表的岛弧岩浆作用不会早于中新世。九州-帕劳海岭上的始新世岛弧记录表明太平洋板块的俯冲在始新世已经开始^[35]。作为太平洋板块向菲律宾海板块之下俯冲导致的弧后盆地,帕里西维拉海盆在约 29 Ma 开始扩张^[16],雅浦岛的变质岩基底则为帕里西维拉海盆 NE-SW 向扩张(20~15 Ma)形成的洋壳,除此之外在雅浦岛弧上并没有存在其他更老的地质记录。因此,雅浦岛弧的岛弧岩浆事件与其东侧的太平洋板块俯冲时间相悖。

板片俯冲启动时间可以根据俯冲板片形态和俯冲速率进行大致推测。前人根据雅浦岛弧地震数据,推测雅浦岛弧之下的俯冲板片深度为 40 km 左右^[5,36]。因此,根据最新的雅浦岛弧地震数据以及微地震数据^[5],我们沿着剖面 a 推测了俯冲板片的大致形态(图 5)。同时,根据 Ulithi 岛礁的 GPS 观测数据^[36-37]可知,雅浦海沟的俯冲速率为 5 mm/a 左右,因此沿着雅浦海沟的板片俯冲启动时间为约 12.5 Ma。但这同样与太平洋板块始新世的俯冲以及帕里西维拉海盆渐新世的扩张相悖。在渐新世

时期雅浦岛弧为帕里西维拉弧后盆地洋壳的一部分,在这一时期雅浦岛弧东侧还应该存在一个俯冲带对应于太平洋板块的俯冲以及帕里西维拉海盆作为弧后盆地的扩张,直到中新世时期雅浦海沟才形成与俯冲相关的沟-弧体系。由于初始俯冲位置并非雅浦海沟,所以雅浦海沟约 12.5 Ma 的俯冲起始时间不可信。

地球物理资料显示(图 4),雅浦岛弧与加罗林海岭并未直接发生碰撞,二者之间存在一个三角形区域,该区域具有较深的水深、较低的自由空间重力异常以及较薄的地壳厚度。热点导致的地形隆起与周边原始地形区域之间通常为渐变过渡,例如加罗林海岭南部和北部边界的渐变地形变化。然而加罗林海岭与三角形区域之间的弧形边界十分陡峭,地震记录(图 1)否定了东部边界切穿岩石圈正断层的存在。导致这种陡峭地形的另外一种可能是俯冲作用,在俯冲过程中俯冲板片上的海山等隆起地形会被上覆板块切割并且拼贴在增生楔区域^[38],而上覆板块的巨大压力会导致俯冲板片被压缩而变薄。现今,在雅浦海沟东侧的三角形区域之上不存在上覆板块,然而该三角形区域减薄的地壳以及陡峭的东部边界(图 4)均与俯冲板片特征相符合。将三角形区域东部边界假设为起始俯冲带的位置,根据板片形态(图 5)以及俯冲速率^[11,26]计算雅浦海沟东侧的太平洋板块俯冲起始时间为 29~28 Ma,这与帕里西维拉海盆的弧后扩张开始时间相符合。

5 讨论

雅浦岛弧的构造解析(图 1)以及地球化学(图 2)等方面证据表明雅浦沟-弧系统的构造演化经历了 3 个阶段,分别为晚渐新世以前帕里西维拉海盆弧后扩张以及中温—高温变质作用形成变质基底、晚渐新世—中新世变质基底风化形成 Map 组沉积层以及中新世发生岛弧岩浆作用。这说明雅浦海沟在中新世才出现,而在此之前雅浦岛弧东部必然存在另外一条俯冲带对应始新世以来太平洋板块的俯冲^[35]和渐新世—中新世帕里西维拉海盆的扩张^[16]。俯冲起始年龄的计算(图 5)则表明这条中新世以前的俯冲带很可能位于加罗林海岭西边界,上覆板块则位于雅浦岛弧和加罗林海岭之间的三角形区域之上,为帕里西维拉海盆的一部分。因此,中新世时期在雅浦岛弧及邻区发生的构造事件最终导致了雅浦海沟的出现以及雅浦海沟东侧上覆板块的消失。

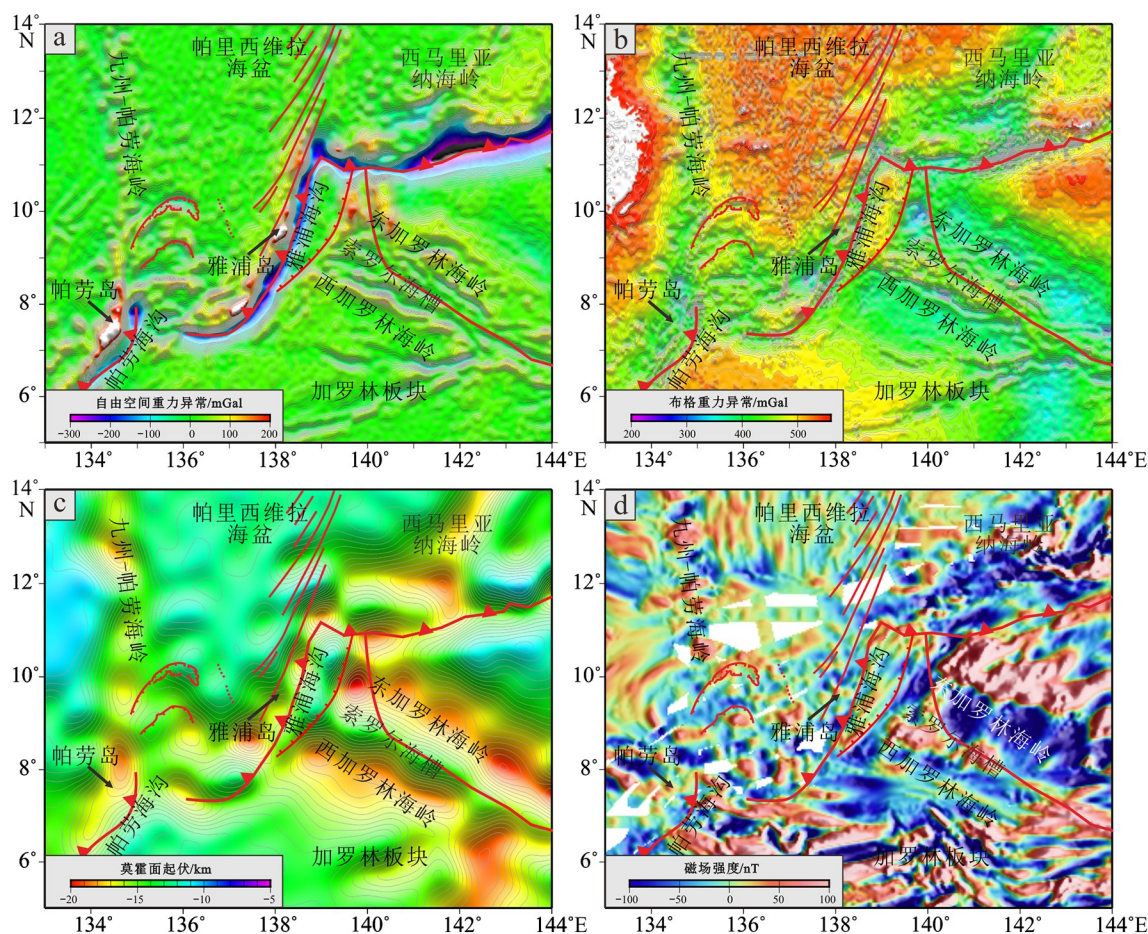


图 4 雅浦岛弧及周边区域自由空间重力异常 (a) 与布格重力异常 (b)、莫霍面起伏 (c) 及地磁场强度 (d)
a, b 的数据来源于 BGI, d 的数据来源于 NGDC

Fig.4 a: The free air gravity anomalies of the Yap arc and its vicinity; b: the bouguer gravity anomalies; c: The undulation of Moho; d: The geomagnetic field intensity

a, b. data from BGI, d. geomagnetism data from NGDC

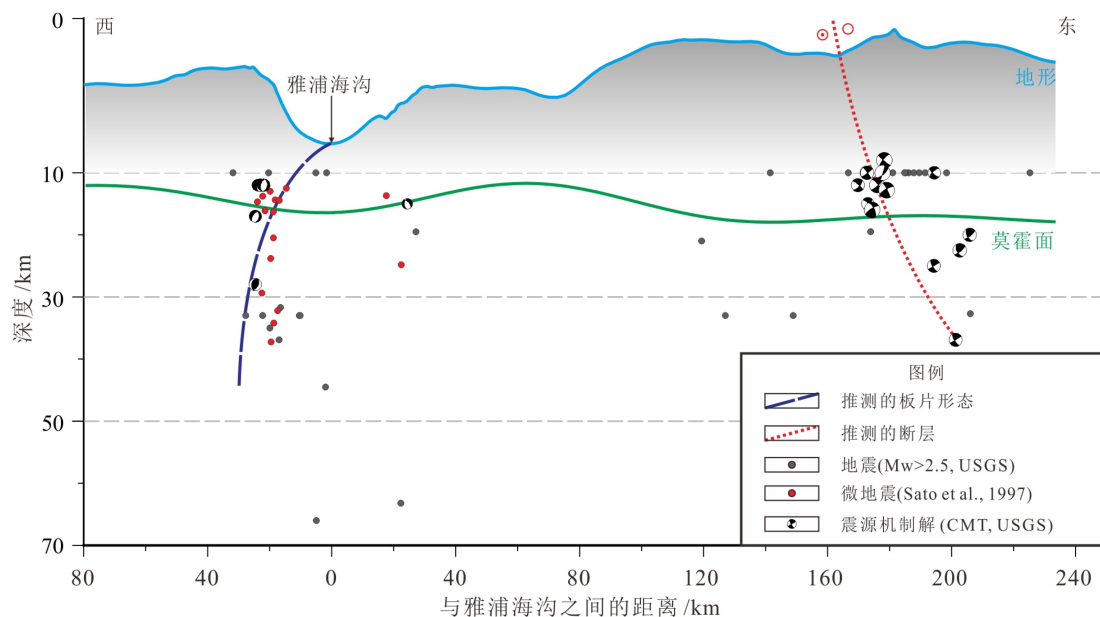


图 5 雅浦海沟地震及俯冲板片形态

Fig.5 Earthquakes and slab geometry of the Yap trench

前人根据地形、地球物理以及磁条带等方面的研究证实帕里西维拉海盆在约 20 Ma 扩张方向由 E-W 转变为 NE-SW^[16]。帕里西维拉海盆在 20~15 Ma 的 NE-SW 向扩张最直接的表现 S 型转换断层、雁列式排布的洋中脊段、NW-SE 向的海底构造线^[14]。同时洋壳 NE-SW 向扩张会将两侧洋壳沿着 NE-SW 方向推离,从而导致帕里西维拉海盆洋中脊东侧和西侧的洋壳发生类似于左旋走滑的相对运动(图 1a, 图 6)。帕里西维拉海盆西侧的洋壳与西菲律宾海盆相连,根据古地磁研究发现西菲律宾海盆在 20~15 Ma 期间基本不发生向北移,同时其顺时针旋转也基本停止^[39-40]。因此,20~15 Ma 帕里西维拉海盆洋中脊东侧和西侧洋壳的相对运动更多地表现为海盆东部洋壳向 NE 方向推离。而海盆东部洋壳向 NE 方向移动会导致在帕里西维拉海盆南部原本已经俯冲的部分洋壳重新暴露,对应于加罗林海岭和雅浦岛弧之间的三角形区域,而该三角形区域东侧的弧形边界也与西马里亚纳海岭南部的弧形岛弧形态相符合(图 1)。帕里西维拉海盆东部洋壳向 NE 方向移动另外一方面结果则是帕里西维拉海盆南部的一部分扩张中心暴露出来。太平洋板块和加罗林板块向 NW 方向连续的俯冲则导致帕里西维拉海盆南部暴露的部分洋中脊转变成了雅浦海沟。

雅浦海沟-弧系统与西太平洋其他的沟-弧-盆体系存在很大的不同,主要表现在很少的岛弧岩浆作

用、极短的沟-弧距离以及弧前增生楔的缺失^[3-8]。板块构造理论中,增生楔是由板块俯冲过程中上覆板块切削下来的沉积物以及岩石等在弧前区域堆积形成。俯冲到一定深度的板块在温度和压力作用下脱水形成流体,而流体会导致地幔岩石熔点降低形成向上的岛弧岩浆。俯冲板片在俯冲初期角度较小,随着俯冲深度的加深,俯冲角度逐渐变陡,这也是典型沟-弧-盆体系中具有一定的沟-弧距离的原因。雅浦海沟是由洋中脊暴露而产生的,其东侧的三角形区域为原本已经俯冲的板块,因而在雅浦海沟区域的俯冲板块缺少了俯冲初期的较小的俯冲角度(图 5),导致在距离岛弧较近的位置就达到俯冲板片脱水的深度,形成了雅浦沟-弧系统很短的沟-弧距离。雅浦岛弧的弧前增生楔缺失则与东侧部分已俯冲的洋壳重新暴露有关,由于重新暴露的洋壳之上没有沉积物,加上雅浦海沟较低的俯冲速率^[11,37],在雅浦岛弧的弧前区域很难形成增生楔。同时,较低的俯冲速率^[11,37]也是导致岛弧岩浆作用较少的原因。

雅浦沟-弧系统为帕里西维拉海盆的一部分,帕里西维拉海盆的扩张过程直接控制了雅浦沟-弧系统的产生以及构造演化。雅浦沟-弧系统西侧具有 N-S 向构造线的洋壳为帕里西维拉海盆在 29~20 Ma 期间 E-W 向扩张的产物。在这一时期,马里亚纳俯冲带、西马里亚纳海岭以及雅浦岛弧西侧 N-S 向构造线的洋壳组成了帕里西维拉海盆南部正常的沟-

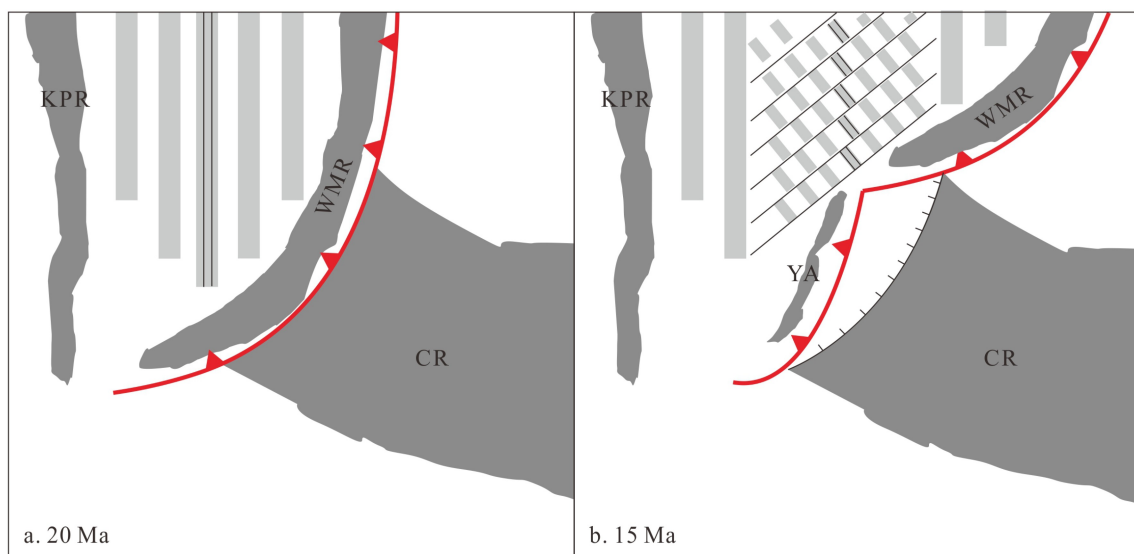


图 6 雅浦俯冲带构造演化模型

KPR: 九州-帕劳海岭, WMR: 西马里亚纳海岭, CR: 加罗林海岭, YA: 雅浦岛弧

Fig.6 Evolutionary model of the Yap subduction zone

KPR: Kyushu-Palau ridge; WMR: West Mariana ridge; CR: Caroline ridge; YA: Yap arc

弧-盆体系, 马里亚纳俯冲带位于现今雅浦海沟东侧三角形区域的东部边界位置。此时, 加罗林海岭与帕里西维拉海盆之间的碰撞发生在西马里亚纳海岭南部(图 6a)。在 20~15 Ma 期间, 帕里西维拉海盆的扩张方向变为 NE-SW 向。扩张方向的改变将帕里西维拉海盆东侧的洋壳向 NE 方向推离, 帕里西维拉海盆南部的部分洋中脊暴露形成了雅浦俯冲带(图 6b)。俯冲伴随的岛弧岩浆作用则导致了雅浦岛弧的隆升以及雅浦岛上 Tomil 集块岩为代表的岛弧岩浆作用, 而雅浦组的角闪岩相-绿片岩相变质岩则可能为岛弧隆升过程中暴露的深部地壳。在这一时期, 帕里西维拉海盆南侧已经俯冲的板片也由于帕里西维拉海盆东侧洋壳的 NE 方向移动而重新暴露, 形成了现今雅浦海沟东侧的三角形区域(图 6b)。

6 结论

雅浦岛弧原本为帕里西维拉海盆 NE-SW 向扩张形成的洋壳。帕里西维拉海盆在 20~15 Ma 的 NE-SW 向扩张使海盆东西两侧洋壳发生相对移动, 这导致了帕里西维拉海盆南部的部分洋中脊段暴露而转变为雅浦海沟。同时雅浦海沟东侧部分已经俯冲的板片重新暴露形成了一个地球物理特征十分特殊的三角形区域。

参考文献 (References)

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] Hawkins J, Batiza R. Metamorphic rocks of the Yap arc-trench system [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1977, 37(2): 216-229.
- [5] 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.
- [6] Fujiwara T, Tamura C, Nishizawa A, et al. Morphology and tectonics of the Yap Trench [J]. *Marine Geophysical Researches*, 2000, 21(1-2): 69-86.
- [7] Sato T, Matsu'ura M. A kinematic model for evolution of island arc-trench systems [J]. *Geophysical Journal International*, 1993, 114(3): 512-530.
- [8] Kim Y M, Lee S M, Okino K. Comparison of gravity anomaly between mature and immature intra-oceanic subduction zones in the western Pacific [J]. *Tectonophysics*, 2009, 474(3-4): 657-673.
- [9] 张正一, 董冬冬, 张广旭, 等. 板块俯冲侵蚀雅浦岛弧的地形制约[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2017, 37(1): 41-50. [ZHANG Zhengyi, DONG Dongdong, ZHANG Guangxu, et al. Topographic constraints on the subduction erosion of the Yap Arc, western Pacific [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2017, 37(1): 41-50.]
- [10] McCabe R, Uyeda S. Hypothetical model for the bending of the Mariana Arc[M]//Hayes D E. *The Tectonic and Geologic Evolution of Southeast Asian Seas and Islands: Part 2*. Washington DC: AGU, 1983: 281-293.
- [11] Lee S M. Deformation from the convergence of oceanic lithosphere into Yap trench and its implications for early-stage subduction [J]. *Journal of Geodynamics*, 2004, 37(1): 83-102.
- [12] 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.
- [13] 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 Ji, ZHANG Guoliang. Origin and tectonic setting of metamorphic rocks in the Yap Island Arc [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2018, 38(4): 71-82.]
- [14] 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.
- [15] Kasuga S, Ohara Y. A new model of back-arc spreading in the Parece Vela Basin, northwest Pacific margin [J]. *Island Arc*, 1997, 6(3): 316-326.
- [16] Sdrolias M, Roest W R, Müller R D. An expression of Philippine Sea plate rotation: the Parece Vela and Shikoku Basins [J]. *Tectonophysics*, 2004, 394(1-2): 69-86.
- [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] 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.
- [19] 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: AGU, 1980: 247-268.
- [20] Ryan W B F, Carbotte S M, Coplan J O, et al. Global multi-resolution topography synthesis [J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2009, 10(3): Q03014.
- [21] 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.
- [22] 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.
- [23] Tayama R. Topography, geology and coral reef of the Yap Islands[R].

- Contributions from the Institute of Geology and Paleontology, Tohoku Imperial University, 1935, 9: 43(in Japanese).
- [24] Cole W S, Todd R, Johnson C G. Conflicting age determination suggested by foraminifera on Yap, Caroline Island [J]. *Bulletins of American Paleontology*, 1960(186): 77-112.
- [25] Pearce J A. Statistical analysis of major element patterns in basalts [J]. *Journal of Petrology*, 1976, 17(1): 15-43.
- [26] Shiraki K, Kuroda N, Maruyama S, et al. Evolution of the Tertiary volcanic rocks in the Izu-Mariana arc [J]. *Bulletin Volcanologique*, 1987, 41(4): 548-562.
- [27] 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.
- [28] 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.
- [29] Jenner F E, O'Neill H S C. Analysis of 60 elements in 616 ocean floor basaltic glasses [J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2012, 13(2): Q02005.
- [30] Ikeda Y, Nagao K, Ishii T, et al. Contributions of slab fluid and sediment melt components to magmatism in the Mariana Arc-Trough system: evidence from geochemical compositions and Sr, Nd, and noble gas isotope systematics [J]. *Island Arc*, 2016, 25(4): 253-273.
- [31] Kohut E J, Stern R J, Kent A J R, et al. Evidence for adiabatic decompression melting in the Southern Mariana Arc from high-Mg lavas and melt inclusions [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 2006, 152(2): 201-221.
- [32] Pearce J A, Stern R J, Bloomer S H, et al. Geochemical mapping of the Mariana arc-basin system: implications for the nature and distribution of subduction components [J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2005, 6(7): Q07006.
- [33] 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.
- [34] Tamura Y, Ishizuka O, Stern R J, et al. Two Primary Basalt Magma types from Northwest Rota-I Volcano, Mariana Arc [J]. *Journal of Petrology*, 2012, 52(6): 1143-1183.
- [35] Ishizuka O, Taylor R N, Yuasa M, et al. Making and breaking an island arc: a new perspective from the Oligocene Kyushu - Palau arc, Philippine Sea [J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2011, 12(5): Q05005.
- [36] Kobayashi K. Origin of the Palau and Yap trench-arc systems [J]. *Geophysical Journal International*, 2004, 157(3): 1303-1315.
- [37] Kotake Y. Study on the tectonics of Western Pacific region derived from GPS data analysis [J]. *Bulletin of Earthquake Research Institute*, 2000, 75: 229-334.
- [38] Tomoda Y, Fujimoto H. Gravity anomalies in the western Pacific and geophysical interpretation of their origin [J]. *Journal of Physics of the Earth*, 1981, 29: 387-419.
- [39] 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: Solid Earth*, 2002, 107(B12): 2322.
- [40] 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.