

雅浦俯冲带北段地球物理场及构造活动性分析

韩 潇^{1,2}, 付永涛^{1*}

(1. 中国科学院海洋研究所 海洋地质与环境重点实验室, 山东 青岛 266071;

2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 雅浦俯冲带北段和马里亚纳俯冲带西南端均受加罗林岛脊俯冲影响, 但是二者的地球物理特征存在显著差异。通过分析雅浦俯冲带北段和马里亚纳俯冲带的地球物理特征, 对比了二者之间的海底地形、重力异常、地震活动和应力场等特征。结果表明: ①雅浦海沟北段外缘发育垒堑构造带, 马里亚纳海沟西南端加罗林岛脊俯冲区域水深明显变浅, 加罗林岛脊俯冲最前端形成凹角。②雅浦岛弧北段和马里亚纳岛弧西南端加罗林岛脊俯冲区域高布格异常值反映了强烈的构造侵蚀可能导致火山弧地壳缺失, 岛弧之下高密度物质上涌。③雅浦俯冲带北段和马里亚纳俯冲带西南端地震活动性弱并且缺乏高震级地震, 说明加罗林海脊岛脊的俯冲阻塞降低了俯冲带的构造活动性。马里亚纳俯冲带西南端存在少量的中源地震, 表明该区域板片俯冲深度比雅浦俯冲带北段更深。④马里亚纳俯冲带西南端的地震存在更多的走滑分量, 与加罗林板块的倾斜俯冲、加罗林岛脊的倾斜碰撞有关。⑤加罗林岛脊相对于海沟走向的俯冲角度是造成雅浦俯冲带北段和马里亚纳俯冲带西南端的地球物理特征存在差异的主要原因。

关键词: 加罗林岛脊; 地形特征; 地球物理差异; 俯冲过程

中图分类号: P541; P738

文献标志码: A

文章编号: 1671-6647(2022)03-0449-12

doi: 10.12362/j.issn.1671-6647.20220130001

引用格式: 韩潇, 付永涛. 雅浦俯冲带北段地球物理场及构造活动性分析[J]. 海洋科学进展, 2022, 40(3): 449-460. HAN X, FU Y T. Analysis of geophysical field and tectonic ctivity in the northern Yap subduction zone[J]. Advances in Marine Science, 2022, 40(3): 449-460.

洋脊俯冲是洋脊与俯冲带交叉而随俯冲板片一起俯冲至地幔的一种现象, 洋脊的俯冲对俯冲板片的形态、相关构造岩浆活动以及俯冲带的地质地球物理特征具有重要的控制作用^[1-3]。加罗林洋脊位于加罗林板块之上, 由加罗林岛脊和西加罗林隆起构成, 被认为是晚渐新世时期的热点作用形成的海底洋脊^[4]。加罗林岛脊随加罗林板块一起沿雅浦海沟北部和马里亚纳海沟西南端俯冲至菲律宾海板块之下, 对雅浦俯冲带北段和马里亚纳俯冲带西南端的地球物理特征和构造演化进程产生了重要影响。

前人研究了加罗林洋脊的形成和演化^[4-5], 认为加罗林洋脊是晚渐新世时期热点作用形成的海底洋脊; 分析了雅浦俯冲带的地质地球物理特征和构造演化过程^[6-14], 发现雅浦俯冲带的地球物理特征具有明显的分段特征, 并且将雅浦俯冲带的形成演化大致分为古雅浦俯冲带的形成和加罗林洋脊俯冲碰撞两个主要阶段; 探讨了加罗林洋脊的俯冲对雅浦俯冲带的影响^[15-16], 认为加罗林洋脊的俯冲碰撞是导致雅浦俯冲带南北段产生地球物理差异的主要原因。但是有关加罗林洋脊俯冲对马里亚纳俯冲带西南端的影响研究甚少。

作为加罗林洋脊的一部分, 加罗林岛脊同时沿雅浦海沟北部和马里亚纳海沟西南端俯冲, 加罗林岛脊的俯冲碰撞对马里亚纳俯冲带西南端的地球物理特征和构造演化过程产生了哪些影响? 这些影响与加罗林岛脊对雅浦俯冲带的影响有何异同? 基于此问题, 本文拟通过分析受加罗林岛脊影响的雅浦俯冲带北段和马里亚纳俯冲带西南端的地球物理特征, 对比二者的地球物理差异, 揭示加罗林岛脊俯冲的动力学意义。

收稿日期: 2022-01-30

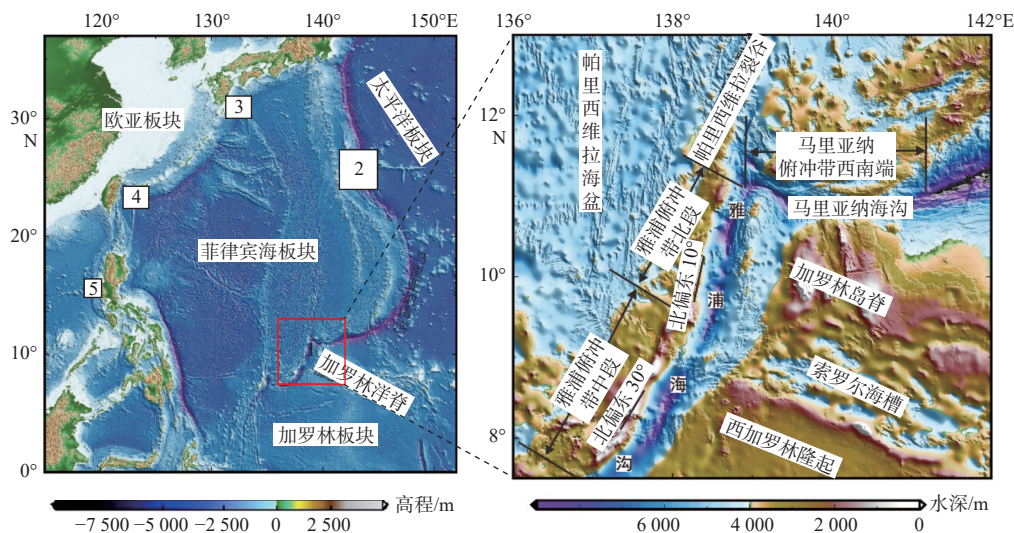
作者简介: 韩 潇(1997—), 男, 硕士研究生, 主要从事海洋重磁勘探方面研究. E-mail: shawn0217@163.com

* 通信作者: 付永涛(1970—), 男, 副研究员, 博士, 主要从事海洋重磁勘探方面研究. E-mail: ytfu@qdio.ac.cn

(陈 靖 编辑)

1 区域构造背景

在西太平洋构造带中,有很多受海底高原、海山、洋脊等海底高地地形俯冲影响的俯冲带,例如加罗林洋脊俯冲影响的雅浦俯冲带和南马里亚纳俯冲带、小笠原海台(马库斯-内克海岭的西部)俯冲影响的马里亚纳俯冲带、九州-帕劳海脊俯冲影响的九州俯冲带、加瓜海脊俯冲影响的琉球海沟俯冲带以及南海古扩张脊俯冲影响的马尼拉俯冲带等(图 1a)。受洋脊等俯冲的影响,这些俯冲带显示出较正常洋壳俯冲带更为复杂的地形地貌与地球物理特征。



- 1 加罗林洋脊俯冲带
2 小笠原海台(马库斯-内克海岭西部)俯冲影响的小笠原-马里亚纳俯冲带
3 九州-帕劳海脊俯冲影响的九州俯冲带
4 加瓜海脊俯冲影响的琉球海沟俯冲带
5 南海古扩张脊俯冲影响的马尼拉俯冲带

图 1 研究区位置

Fig. 1 Location of the study area

加罗林洋脊大致沿 WNW—ESE 向延伸,东西长约 500 km,南北宽约 300 km。洋脊被索罗尔海槽分割为两部分:北部的加罗林岛脊和南部的西加罗林隆起。加罗林岛脊北部为马里亚纳俯冲带,西侧为雅浦俯冲带,由于研究角度不同,对雅浦俯冲带的分段不尽相同^[15,17]。本文为了研究加罗林洋脊俯冲的影响,将雅浦俯冲带分为 3 段,本文的研究区域只包含雅浦俯冲带北段,即加罗林岛脊对应的雅浦俯冲带(图 1b)。

加罗林洋脊在晚渐新世时期形成于加罗林板块和太平洋板块之上,并随着加罗林板块和太平洋板块向北西向运动,在 21 Ma 与古马里亚纳海沟发生碰撞^[16],年轻且具有较大浮力的加罗林洋脊阻塞了俯冲板块的俯冲,进而减缓了俯冲碰撞区域海沟的后撤速率^[17]。约 10 Ma 时,加罗林洋脊裂陷为加罗林岛脊和西加罗林隆起两部分,中间形成索罗尔海槽。此后,加罗林岛脊以缓慢的速率沿着雅浦海沟北段和马里亚纳海沟西南端俯冲,影响雅浦俯冲带北段和马里亚纳俯冲带西南端的构造演化进程^[15-17],并最终形成现今马里亚纳海沟西南端 E—W 向延伸,雅浦海沟“J”形展布的构造格局。

2 海底地形与地球物理特征

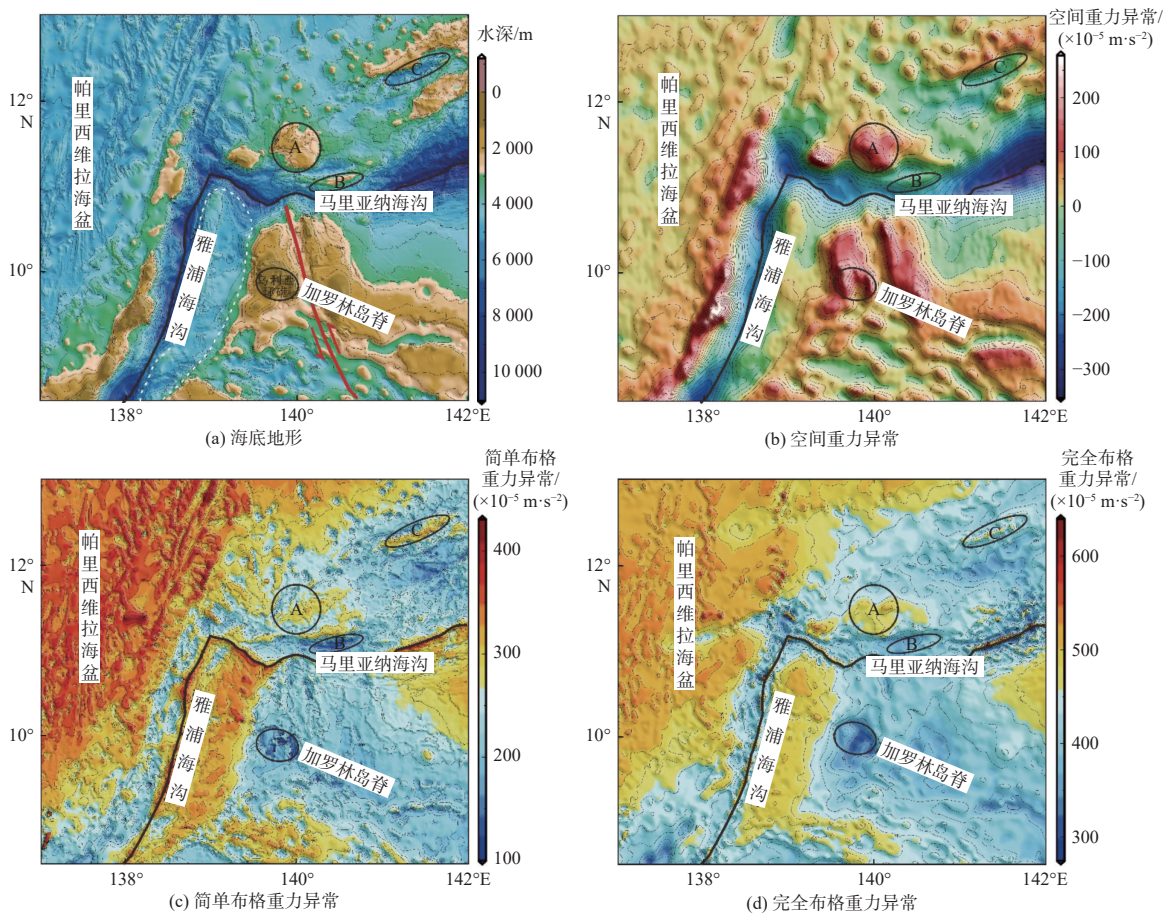
2.1 数据来源及处理方法

本文采用的水深数据来自分辨率为 15"×15"的全球地形模型 GEBCO_2020^[18-19]。空间重力异常数据源自

美国加州大学圣地亚哥分校 Scripps 海洋研究所发布的最新的 $1' \times 1'$ 卫星测高反演重力数据^[20-21]。简单布格异常是使用 ETOPO1 全球数据库中的海底地形信息^[22] 和卫星测高仪得出的空间重力异常基于三维地形校正得到的。假设地壳密度为 $2\ 670\text{ kg/m}^3$, 海水密度为 $1\ 030\text{ kg/m}^3$ 。完全布格异常采用的是全球重力场 BGI 发布的 $1' \times 1'$ 分辨率的重力异常数据。本文采用的震源信息来自于美国地质调查局(United States Geological Survey) 国家地震信息中心。用于分析研究区应力场特征的震源机制解数据来源于哈佛大学矩心矩张量(Centroid Moment Tensor)地震目录^[23-24]。

2.2 海底地形特征

加罗林岛脊在海底地形上表现为一明显的海底高地, 平均水深比周边浅 2 km , 中间被一 NW 向延伸的走滑断裂分割开来, 断裂两侧的浅点分别为西部的乌利西环礁和东部的法斯岛。西侧对应的雅浦海沟北段沿北偏东 10° 延伸, 轴部水深为 $6\ 500 \sim 7\ 500\text{ m}$, 在雅浦海沟与加罗林岛脊之间的过渡带上发育一南北长约 100 km 、东西宽约 50 km 、与加罗林岛脊相对高差为 $1 \sim 2\text{ km}$ 的垒塹构造带(图 2a), 该构造带由一系列正断层组成, 北宽南窄, 向南逐渐尖灭于西加罗林隆起西侧。



注: 图 a 等值线间隔为 500 m ; 图 b~图 d 中等值线间隔为 $50 \times 10^{-5}\text{ m/s}^2$ 。

图 2 加罗林洋脊俯冲带的海底地形和地球物理特征

Fig. 2 Seafloor topography and geophysical characteristics of the Caroline Ridge subduction zone

加罗林岛脊北侧对应的马里亚纳海沟西南端整体呈近 E—W 向延伸, 海沟在海沟轴($139^\circ 56'\text{E}$, $10^\circ 58'\text{N}$) 发生了明显的转向, 在加罗林岛脊向马里亚纳海沟俯冲的位置, 海沟轴向海沟陆侧坡弯曲。马里亚纳海沟水深在加罗林岛脊俯冲区域明显变浅, 海沟在 $139^\circ 56' \sim 141^\circ 00'\text{E}$, 轴部水深为 $5\ 500 \sim 6\ 000\text{ m}$, 该段西侧

和东侧海沟轴部水深均大于 7 000 m。垒堑构造带北缘海沟洋侧坡发育一组与海沟轴斜交的断裂构造。

2.3 重力异常特征

2.3.1 空间重力异常

研究区的空间重力异常与海底地形变化趋势相同(图 2b)。加罗林岛脊、雅浦岛弧和马里亚纳岛弧等高地表现为正高空间重力异常,雅浦海沟等负地形则表现为负高空间重力异常,并且空间重力异常最低值往往出现在海沟轴部。加罗林岛脊表现为区域正异常,乌利西环礁和法斯岛表现为高异常圈闭,最高值出现在乌利西环礁,异常值约 $195 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$ 。加罗林岛脊向北迅速过渡为马里亚纳海沟的负异常,异常梯度变化大,在乌利西环礁对应的俯冲方向存在负异常圈闭,最低值可达 $-195 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$ 。加罗林岛脊向西并没有迅速变为负异常值,而是由于垒堑构造带的存在,表现为异常零值过渡带。雅浦海沟和马里亚纳海沟西南端轴部空间重力异常等值线与海沟走向平行,在海沟轴部形成负重力异常圈闭。

2.3.2 布格重力异常

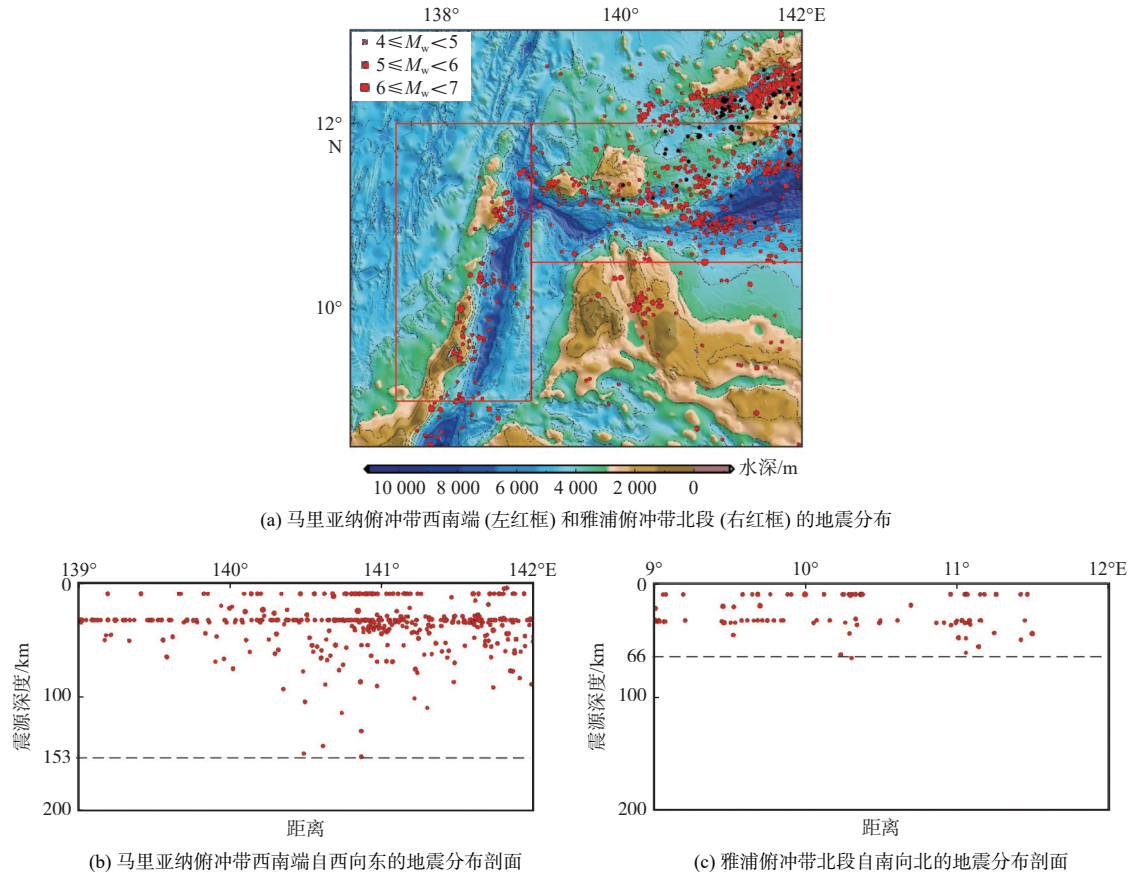
研究区的简单布格异常与海底地形呈近似镜像关系(图 2c)。通常来讲,俯冲带地区的布格重力异常高峰值和低峰值一般分别出现在海沟轴部和岛弧上^[25],从而能够反映海沟较薄的地壳和岛弧较厚的地壳。马里亚纳海沟和雅浦海沟的轴部简单布格异常表现为高异常带,但是马里亚纳岛弧南段和雅浦岛弧基本呈条带状高异常值。并且,马里亚纳岛弧最南端,远离海沟的海底高地(图 2a 中区域 A)简单布格异常比靠近海沟的海底高地(图 2a 中区域 B)高近 $100 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$,但是区域 A 水深却比区域 B 浅 1 000 m 以上,并没有表现出简单布格异常与海底地形的近似镜像关系。加罗林岛脊表现为布格异常低值,但是西侧的垒堑构造带表现为布格异常高值带。

在海底地形相对平坦或者水深变化较小的区域只做简单布格校正得到简单布格重力异常,可用来解释地壳厚度和物质密度。但是在海底地形变化剧烈的区域,不经过地形校正的重力异常必然会影响解释结果。因此,对简单布格重力异常经过地形改正后得到的完全布格重力异常能够更加真实地反映地壳密度变化以及构造信息^[26]。由图 2d 可看出,马里亚纳海沟和雅浦海沟完全布格异常表现为串珠状高异常值条带,异常等值线与海沟走向平行,在海沟轴部形成多个高布格异常圈闭,反映了海沟地壳较薄。加罗林岛脊上的乌利西环礁表现为布格异常低值圈闭,表明该处地壳厚度较大。在马里亚纳岛弧南端地形相对较高的区域 A,完全布格异常仍然高于区域 B ($50 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$) 以上,弧后区域 C 为布格异常高值。加罗林岛海脊与海沟之间的垒堑构造带完全布格重力异常明显高于东侧,推测是由该区域拉张断裂、地壳减薄所致。

2.4 地震活动特征

本文采用了 1976 年 1 月 1 日—2020 年 12 月 31 日震级大于或等于 4 级的 914 个地震的震源信息。由图 3a 可以看出,马里亚纳俯冲带西南端~雅浦俯冲带北段地震空间和数量的区域分布规律。雅浦俯冲带北段的地震活动性较弱,地震数量较少,震源深度较浅,基本小于 60 km,最深的震源深度为 66 km,缺乏中、深源地震。马里亚纳俯冲带西南端 92% 的地震震源深度小于 70 km,中源地震占地震总数的 8%,最深的震源深度为 153 km,缺乏深源地震。

此外,由图 3b 和图 3c 可知,在加罗林岛脊俯冲的区域,中、深源地震减少或缺失。在俯冲过程中,俯冲的海底高地地形会增强板间的局部耦合,俯冲板块的非均质性也与地震活动密切相关,海山和洋脊等高地形进入板块的不均一性被认为是影响板块边界周围地震活动的因素。无震海脊、海山、海台等高地形的俯冲导致俯冲带地震活动性弱并且缺乏高震级地震,构造侵蚀产生的大量破碎物质形成破碎带,利于流体的大量流入^[27],从而使得破碎带表现为低黏度的蠕变性质,吸收板片之间的部分构造应力,从而抑制了地震,特别是大地震的发生。这也印证了海山在俯冲带的俯冲有利于形成无震蠕动和小地震,但不利于形成大型地震的观点^[28-29]。



注: 红框区域为地震剖面的地震选取范围, ●表示震中位置。

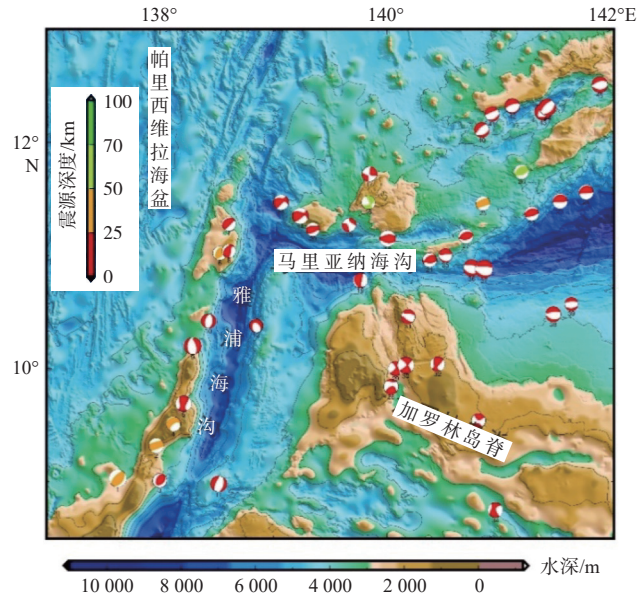
图 3 研究区的地震分布

Fig. 3 Earthquakes distribution of the study area

2.5 应力场特征

在 1976 年 1 月 1 日—2021 年 1 月 1 日期间 M_w (矩震级) ≥ 5 的全球震源机制解(CMT)目录中^[27-28], 本研究区共有 141 个断层面解, 本文选取了 45 个典型事件(图 4)。震源机制主要有以下 7 种类型: ①雅浦海沟俯冲带的浅层逆冲挤压(事件 1~8); ②雅浦海沟俯冲带的浅层拉张(事件 9~12); ③加罗林海脊碰撞引发的雅浦海沟南段和马里亚纳海沟西南端的走滑事件(事件 13~17); ④马里亚纳俯冲带浅层逆冲挤压(事件 18~27); ⑤索罗尔海槽断裂带的左旋走滑(事件 28~34); ⑥马里亚纳俯冲带南端的浅层拉张(事件 35~39); ⑦马里亚纳弧后的拉张(事件 40~45)。

震源机制解表明加罗林洋脊俯冲带的应力特征相对复杂, 在雅浦海沟和马里亚纳海沟存在应力差异。其中, 加罗林岛脊以西的雅浦俯冲带拉张和挤压状态并存, 雅浦岛弧最北端和索罗尔海槽以西的岛弧应力场为俯冲挤压型, 主要是加罗林岛脊与雅浦岛弧的碰撞引起的挤压效应, 岛脊与岛弧的碰撞也得到了地球物理和地球化学的证实^[12,14,16]。垒堑构造带内和雅浦岛弧的局部区域处于拉张状态, 应力场呈现俯冲拉张型, 主要是由于俯冲板片的弯曲产生了张性应力场, 这也解释了琳岛海脊西侧的正断层、裂隙、基底垮塌以及俯冲板块的沉积序列等伸展性特征^[30]。加罗林岛脊西北部以及索罗尔海槽内的地震都表现为走滑性质, 这与太平洋板块和加罗林板块之间的相对运动有关。马里亚纳俯冲带南端的应力特征较雅浦俯冲带更为复杂, 除了岛脊与岛弧碰撞产生的俯冲挤压型应力场和俯冲板片弯曲产生的张性应力场之外, E—W 向展布的马里亚纳海沟西南端震源机制解具有较大的走滑分量, 推测是加罗林海脊碰撞引起的动力学效应。



注：沙滩球的大小表征震级的大小，沙滩球的压缩象限颜色表示震源深度。

图 4 研究区 45 个典型事件的震源机制解

Fig. 4 The CMT solutions of 45 typical events in the study area

3 讨论

3.1 马里亚纳俯冲带西南端与雅浦俯冲带北段的地球物理差异及成因机制

岩石学和地球化学证据表明雅浦海沟是由古马里亚纳-雅浦海沟演化而来的^[17,31-32]，并且二者的俯冲动力学环境相似，都是受加罗林岛脊俯冲影响的俯冲带，但是二者在海底地形、重力异常、地震活动等方面却表现出显著的差异(表 1)。

在海底地形方面，雅浦俯冲带最显著的特点是海沟外缘发育一南北长 100 km、东西宽约 50 km 的新月形垒堑构造带^[15]，而在马里亚纳海沟西南端外缘没有发育垒堑构造带。Dong 等^[12]利用简单的力学模型分析得知俯冲的海底高地形表面张力更大，周边更容易形成正断层，说明该垒堑构造带与加罗林海脊的俯冲碰撞以及深部俯冲板片的拖曳作用引起的俯冲板片弯折拉张作用密切相关。而马里亚纳海沟西南端外缘没有发育垒堑构造带可能是由加罗林岛脊相对于菲律宾海板块斜向俯冲造成的。

马里亚纳海沟西南端水深表现出明显的分段特征，在加罗林岛脊俯冲区域，水深明显变浅，并且在岛脊俯冲的最前端形成了明显的凹角，上述变形特征与加罗林岛脊的俯冲密切相关，前人对海山俯冲产生的变形特征研究中也发现了类似的地形特征^[33-34]。雅浦海沟的水深变化相对较小，基本在 6 500 m 以深，可能是由垒堑构造带的存在所致，并且雅浦俯冲带当前处于极慢速俯冲中。

雅浦俯冲带北段和马里亚纳俯冲带西南端的布格重力异常变化规律相似，布格异常高值出现在海沟轴部，海沟弧侧坡布格异常值降低，而岛弧又变为布格异常高值。雅浦岛弧北段高布格异常值反映出强烈的构造侵蚀可能导致火山弧地壳缺失，雅浦岛弧之下高密度物质上涌^[15]。研究区内的马里亚纳岛弧除了区域 A 均表现为布格异常低值，表明马里亚纳岛弧南端除了区域 A 均为正常的火山弧地壳。区域 A 的布格重力异常相对较高，并且高于俯冲的加罗林岛脊，说明区域 A 的岛弧地壳厚度小于加罗林岛脊或者岛弧之下有高密度物质上涌。而菲律宾海地区的地壳厚度研究表明，马里亚纳岛弧西南端的地壳厚度大于加罗林岛

脊^[35], 因此区域 A 岛弧可能类似于雅浦岛弧北段, 遭受了强烈的构造侵蚀, 高密度物质上涌。区域 B 弧后区域 C 是马里亚纳海槽扩张中心的最南端, 该扩张中心以每年厘米级的速度扩张, 并拥有一个活跃的热液系统^[36-39], 因此具有较高的布格异常值。

表 1 马里亚纳俯冲带西南端与雅浦俯冲带北段的地球物理差异

Table 1 Differences in geophysical characteristics between the southwestern end of the Mariana subduction zone and the northern part of the Yap subduction zone

区 域	海沟走向	海底地形特征	海沟轴部水深	空间重力异常/($\times 10^{-5} \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$)	布格重力异常/($\times 10^{-5} \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$)
雅浦俯冲带北段	北偏东 30°	发育垒堑构造带	6 500~7 500 m	异常变化梯度大, 海沟与加罗林岛海脊之间存在异常零值过渡区	岛弧区布格重力异常相对较高
马里亚纳俯冲带西南端	近 E—W	未发育垒堑构造带	5 500~11 000 m, 分段明显	典型的俯冲带空间重力异常特征	岛弧区布格重力异常相对较高
区 域	地震活动性	岛弧地壳厚度/km	应力场	俯冲方向	俯冲速率/($\text{mm}\cdot\text{a}^{-1}$)
雅浦俯冲带北段	均为低震级地震, 震级<7; 震源深度小于 70 km	15~20 ^[35]	俯冲拉张型、俯冲挤压型	WNW	6 ^[36]
马里亚纳俯冲带西南端	均为低震级地震, 震级<7; 平均震源深度大于雅浦俯冲带北段, 部分可达 150 km	10~15 ^[35]	俯冲拉张型、俯冲挤压型、右旋走滑型	WNW	21 ^[36]

海山和洋脊等高地形进入板块的不均一性被认为是影响板块边界周围地震活动的重要因素^[40-42]。雅浦俯冲带北段和马里亚纳俯冲带西南端地震活动性弱并且缺乏高震级地震, 本文认为是由于加罗林岛脊的俯冲阻塞大大降低了俯冲带的构造活动性, 导致地震活动减少。马里亚纳俯冲带西南端与雅浦俯冲带北段均缺乏中、深源地震可能是加罗林岛脊的碰撞导致俯冲停滞或减缓, 使得其构造应力集中的深度较浅。这种现象在许多洋脊俯冲带地区存在, 例如北马里亚纳岛弧、九州弧前以及北安第斯边缘等^[43-45]。马里亚纳俯冲带西南端存在少量的中源地震, 表明该区域板片俯冲深度比雅浦俯冲带北段更深。

马里亚纳俯冲带西南端与雅浦俯冲带北段的应力状态也存在差异。在马里亚纳俯冲带西南端存在一组表现为走滑机制的地震, 其震源机制解具有较大的走滑分量, 本文认为该走滑事件与加罗林板块的倾斜俯冲、加罗林岛脊的倾斜碰撞有关, 同时也可以解释位于马里亚纳海沟西南端轴部、呈阶梯状分布的深渊的方向和形态。另外, 马里亚纳西南端弧后区域处于拉张应力, 是由于此处为马里亚纳海槽最南端的扩张中心, 随着马里亚纳海沟的后撤, 该区域正以每年几厘米的速度扩张。

马里亚纳俯冲带西南端的相对运动速率比雅浦俯冲带北段高得多, 因为雅浦俯冲带北段是加罗林板块俯冲至菲律宾海板块之下, 并且受加罗林岛脊的碰撞影响, 俯冲速率极低; 而马里亚纳俯冲带西南端是古老的太平洋板块俯冲至菲律宾海板块之下, 并且加罗林岛脊在此处是倾斜俯冲, 虽受碰撞阻塞影响, 但是对其影响相对较弱。

3.2 加罗林岛脊的俯冲过程及其动力学效应

加罗林洋脊在晚渐新世时期由热点作用形成于加罗林板块和太平洋板块之上^[4-5](图 5a), 随着加罗林板块和太平洋板块 NW 向运动, 并于 21 Ma 与古马里亚纳海沟发生碰撞, 导致岛弧火山活动停止^[46], 帕里西维拉海盆的部分洋壳逆冲至雅浦岛弧之上, 使得雅浦岛弧上出现了大量帕里西维拉海盆的辉绿岩和变质岩。扩张中心靠近岛弧并逐渐与俯冲带交叉, 导致弧后盆地中玻安岩的形成。帕里西维拉海盆最南端岩石学特征以及复杂的海底地形和重力异常表明该构造形成期间发生了强烈的岩浆活动^[47], 这可能也与加罗林岛脊的碰撞作用相关。年轻的、具有较大浮力的加罗林洋脊减缓了加罗林板块向菲律宾海板块的俯冲进程, 同

时也会阻碍海沟的后撤。随着北部马里亚纳海沟的不断后撤, 加罗林洋脊碰撞点南北两侧存在横向迁移差异, 导致古马里亚纳岛弧在加罗林洋脊碰撞区域形成凹点(图 5b)。

随着横向迁移差异的不断增大, 雅浦岛弧从古马里亚纳岛弧中分离出来。太平洋板块逐渐沿着近 E—W 向的马里亚纳海沟南端倾斜俯冲至菲律宾海板块之下。马里亚纳海沟南端俯冲的太平洋板片是地球上最老的洋壳, 所以马里亚纳海沟最南端俯冲的太平洋板块会引发垂直于海沟的张应力, 从而使得加罗林洋脊撕裂^[48], 形成加罗林岛脊、西加罗林隆起和索罗尔海槽(图 5c)。加罗林洋脊裂解过程中, 地幔组分被动上涌并部分熔融, 形成索罗尔海槽现今的玄武岩基底^[49]。

雅浦海沟北段与马里亚纳海沟最南端逐渐形成垂直交叉的形态, 从而形成了两种俯冲状态: 上驮西加罗林隆起的加罗林板块向北西沿雅浦海沟俯冲至雅浦岛弧之下, 上驮加罗林岛脊的太平洋板块沿雅浦海沟北段近乎垂直俯冲至雅浦岛弧之下, 沿马里亚纳海沟西南端倾斜俯冲至马里亚纳岛弧之下。洋壳更老的太平洋板块俯冲解释了加罗林板块与菲律宾海板块相对运动速率沿雅浦海沟呈北高南低的现状(图 5d)。

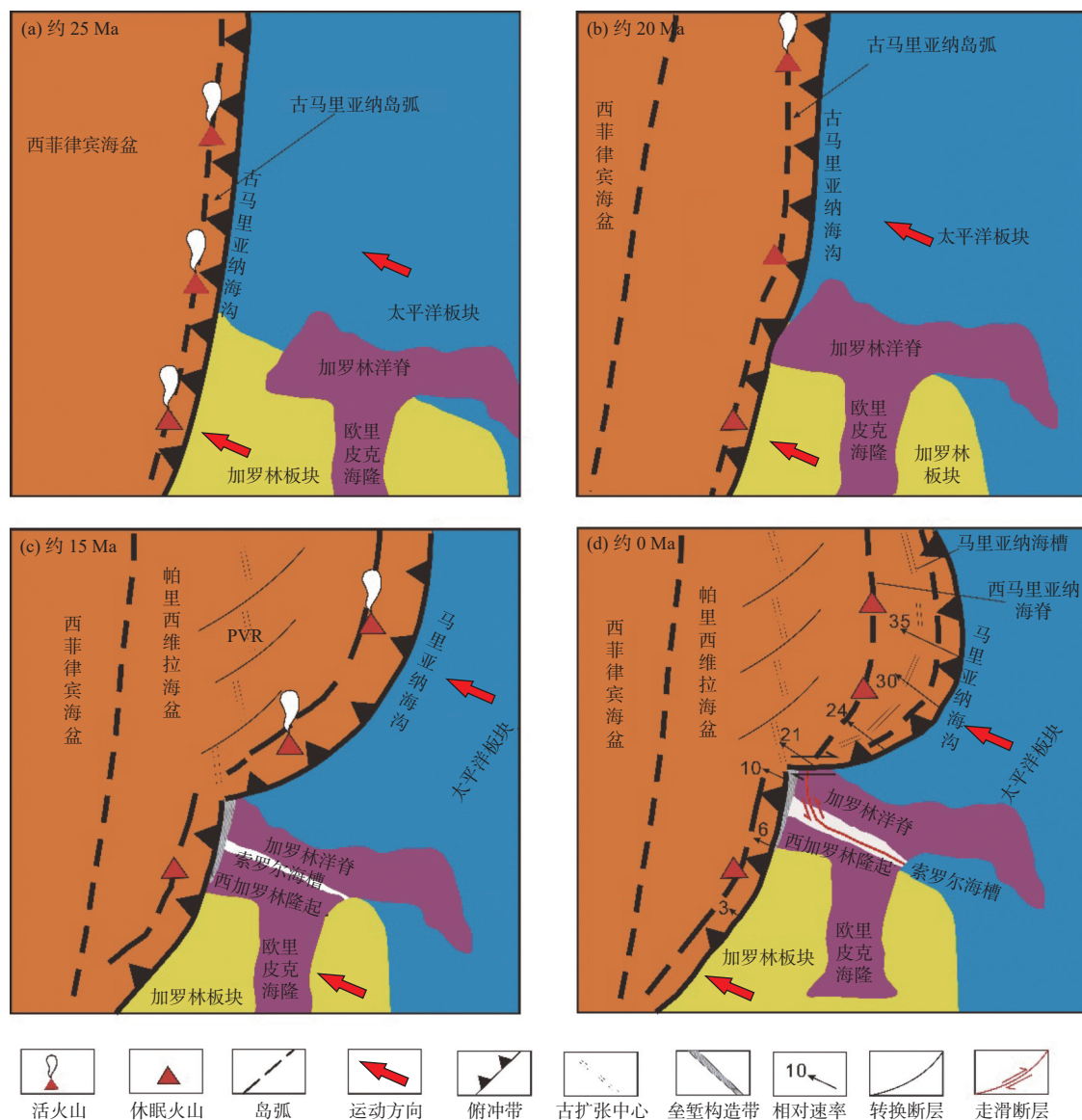


图 5 加罗林岛脊的形成及俯冲过程^[15,50-51]

Fig. 5 Formation and subduction process of the Caroline Ridge^[15,50-51]

洋脊等高地形与岛弧的碰撞会导致弧前持续旋转^[52], 在一定距离范围内, 距离碰撞点越远, 旋转弧度越大。K-Ar 测年和古生物研究表明, 塞班岛和关岛上的火山岩年龄相近, 但是古地磁研究表明早渐新世以来, 塞班岛和关岛分别顺时针旋转了 35° 和 50° ^[46]。本文认为加罗林洋脊碰撞引发的菲律宾海板块的旋转是塞班岛和关岛旋转的重要原因, 但却无法解释距离碰撞点更近的关岛旋转角度更大。GPS 证据表明, 现今加罗林洋脊的碰撞不再影响现今南马里亚纳岛弧的旋转^[52]。因此, 马里亚纳南端俯冲板片可能发生撕裂或者形成了转换断层, 从而减弱了加罗林洋脊的碰撞对马里亚纳岛弧旋转的影响。沿 E—W 向马里亚纳海沟俯冲的太平洋板块是地球上最老的洋壳, 因此, 马里亚纳岛弧南部转换边界的下拉力差异导致关岛发生了更大的旋转^[53-54]。

马里亚纳岛弧南部转换边界的存在导致马里亚纳海沟南端的俯冲板片和仰冲板块之间主要为横向移动, 而垂直拉张作用减弱, 使得索罗尔海槽拉张减弱或者停止, 成为一非成熟的扩张盆地^[48]。

4 结 论

本文利用公开的综合地球物理数据详细分析了马里亚纳俯冲带西南端与雅浦俯冲带北段的地球物理差异, 并进一步探讨了加罗林岛脊的俯冲过程及其对马里亚纳俯冲带西南端与雅浦俯冲带北段的影响, 得到以下结论。

1) 雅浦俯冲带北段和马里亚纳俯冲带西南端俯冲动力学环境相似, 都是受上驮加罗林岛脊的太平洋板块俯冲影响, 但是二者却在海底地形、重力异常、地震活动、应力状态等方面表现出显著的差异。这是由加罗林岛脊相对于海沟的俯冲角度不同导致的, 加罗林岛脊的俯冲方向近乎垂直于雅浦海沟北段走向, 而在马里亚纳海沟西南端, 加罗林岛脊 NW 向倾斜俯冲。

2) 加罗林岛脊西侧发育垒堑构造带, 北侧未发育垒堑构造带。但加罗林岛脊在马里亚纳海沟俯冲区域水深明显变浅, 加罗林岛脊俯冲的最前端形成了明显的凹角。雅浦岛弧北段和马里亚纳岛弧西南端加罗林岛脊俯冲区域高布格异常值反映了强烈的构造侵蚀可能导致火山弧地壳缺失, 岛弧之下高密度物质上涌。雅浦俯冲带北段和马里亚纳俯冲带西南端地震活动性弱并且缺乏高震级地震, 说明加罗林海脊岛脊的俯冲阻塞降低了俯冲带的构造活动性; 马里亚纳俯冲带西南端存在少量的中源地震, 表明该区域板片俯冲深度比雅浦俯冲带北段更深。马里亚纳俯冲带西南端的地震存在更多的走滑分量, 与太平洋板块的倾斜俯冲、加罗林岛脊的倾斜碰撞有关。

3) 加罗林岛脊的俯冲碰撞减缓了俯冲板片的后撤速率, 导致碰撞区域南北两侧的横向张裂程度差异逐渐增大, 使得雅浦岛弧从古马里亚纳岛弧中分离出来, 并最终造成了马里亚纳海沟西南端 E—W 向延伸, 并形成转换边界。

参考文献 (References):

- [1] DAS S, WATTS A B. Effect of subducting seafloor topography on the rupture characteristics of great subduction zone earthquakes[M]//LALLEMAND S, FURNICIELLO F. Subduction zone geodynamics. Berlin: Springer-Verlag, 2009: 103-118.
- [2] MASON W G, MORESI L, BETTS P G, et al. Three-dimensional numerical models of the influence of a buoyant oceanic plateau on subduction zones[J]. Tectonophysics, 2010, 483(1/2): 71-79.
- [3] 鄢全树, 石学法. 无震脊或海山链俯冲对超俯冲带处的地质效应[J]. 海洋学报, 2014, 36(5): 107-123. YAN Q S, SHI X F. Geological effects of aseismic ridges or seamount chains subduction on the supra-subduction zone[J]. Haiyang Xuebao, 2014, 36(5): 107-123.
- [4] HEGARTY K A, WEISSEL J K. Complexities in the development of the Caroline Plate region, western equatorial Pacific[M]//NAIM M A E, STEHLI F G. The ocean basins and margins. Boston: Springer-Verlag, 1988: 277-301.
- [5] KEATING B H, MATTEY D P, HELSLEY C E, et al. Evidence for a hot spot origin of the Caroline Islands[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 1984, 89(NB12): 9937-9948.
- [6] 宋永东, 马小川, 张广旭, 等. 西太平洋雅浦海沟区海底热流原位测量[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2016, 36(4): 51-56. SONG Y D, MA X C,

- ZHANG G X, et al. Heat flow in-situ measurement at Yap Trench of the Western Pacific[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2016, 36(4): 51-56.
- [7] 董冬冬, 张广旭, 钱进, 等. 西太平洋雅浦俯冲带的地貌及地层结构特征[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2017, 37(1): 23-29. DONG D D, ZHANG G X, QIAN J, et al. Geomorphology and stratigraphic framework of The Yap subduction zone, Western Pacific[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2017, 37(1): 23-29.
- [8] 瞿洪宝, 郑彦鹏, 刘晨光, 等. 晚始新世以来雅浦海沟-岛弧构造演化模式[J]. *海洋科学进展*, 2017, 35(2): 249-257. QU H B, ZHENG Y P, LIU C G, et al. Model of tectonic evolution for Yap trench-arc since Late Eocene[J]. *Advances in Marine Science*, 2017, 35(2): 249-257.
- [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 Z Y, DONG D D, ZHANG G X, 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] 张臻, 李三忠. 雅浦沟-弧体系构造演化过程[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2019, 39(5): 138-146. ZHANG Z, LI S Z. Tectonic evolution of the Yap trench-arc system[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2019, 39(5): 138-146.
- [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, ZHANG Z, BAI Y, et al. Topographic and sedimentary features in the Yap subduction zone and their implications for the Caroline Ridge subduction[J]. *Tectonophysics*, 2018, 722(1): 410-421.
- [13] YANG Y, WU S, GAO J, et al. Geology of the Yap Trench: new observations from a transect near 10°N from manned submersible Jiaolong[J]. *International Geology Review*, 2017: 1-13.
- [14] ZHANG Z Y, DONG D D, SUN W D, et al. Subduction erosion, crustal structure, and an evolutionary model of the Northern Yap Subduction Zone: new observations from the latest geophysical survey[J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2019(20): 166-182.
- [15] XIA C, ZHENG Y, LIU B, et al. Geological and geophysical differences between the north and south sections of the Yap trench-arc system and their relationship with Caroline Ridge subduction[J]. *Geological Journal*, 2020, 55(12): 7775-7789.
- [16] ZHANG J, ZHANG G. Geochemical and chronological evidence for collision of proto-Yap arc/Caroline plateau and rejuvenated plate subduction at Yap trench[J]. *Lithos*, 2020: 105616.
- [17] KOBAYASHI K. Origin of the Palau and Yap trench-arc systems[J]. *Geophysical Journal International*, 2004, 157(3): 1303-1315.
- [18] WEATHERALL P, TOZER B, ARNDT J E, et al. The GEBCO_2019 Grid - a continuous terrain model of the global oceans and land[DS]. British Oceanographic Data Centre, National Oceanography Centre, NERC, UK, 2020. Doi: 10.5285/836f016a-33be-6ddc-e053-6c86abc0788e. https://www.bodc.ac.uk/data/published_data_library/catalogue/10.5285/836f016a-33be-6ddc-e053-6c86abc0788e/.
- [19] TOZER B, SANDWELL D T, SMITH W H, et al. Global bathymetry and topography at 15arcsec: SRTM15+[J]. *Earth and Space Science*, 2019, 6(10): 1847-1864.
- [20] SANDWELL D T, MULLER R D, SMITH W H, et al. New global marine gravity model from CryoSat-2 and Jason-1 reveals buried tectonic structure[J]. *Science*, 2014, 346(6205): 65-67.
- [21] SMITH W H, SANDWELL D T. Global sea floor topography from satellite altimetry and ship depth soundings[J]. *Science*, 1997, 277(5334): 1956-1962.
- [22] AMANTE C, EAKINS B W. ETOPO1 1 arc-minute global relief model: procedures, data sources and analysis[C]// NOAA Technical Memorandum NESDIS NGDC-24, 2009. DOI: 10.7289/V5C8276M.
- [23] DZIEWONSKI A M, CHOU T A, WOODHOUSE J H. Determination of earthquake source parameters from waveform data for studies of global and regional seismicity[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1981, 86(B4): 2825-2852.
- [24] EKSTRÖM G, NETTLES M, DZIEWOŃSKI A M. The global CMT project 2004–2010: centroid-moment tensors for 13, 017 earthquakes[J]. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 2012(200/201): 1-9.
- [25] FUJIMOTO H, TOMODA Y. Lithospheric thickness anomaly near the trench and possible driving force of subduction[J]. *Tectonophysics*, 1985, 112(1/4): 103-110.
- [26] 陈泽满. 菲律宾海板块地壳结构重力、地震反演研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2015. CHEN Z M. Gravity and seismic inversion of tectonic structure of Philippine Sea plate[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2015.
- [27] 李三忠, 赵淑娟, 刘鑫, 等. 洋-陆转换与耦合过程[J]. *中国海洋大学学报*, 2014, 44(10): 113-133. LI S Z, ZHAO S J, LIU X, et al. Processes of ocean-continent transition and coupling[J]. *Periodical of Ocean University of China*, 2014, 44(10): 113-133.
- [28] WANG K L, BILEK S L. Do subducting seamounts generate or stop large earthquakes?[J]. *Geology*, 2011, 39(9): 819-822.
- [29] GAO X, WANG K L. Strength of stick-slip and creeping subduction megathrusts from heat flow observations[J]. *Science*, 2014, 345(6200): 1038-1041.
- [30] KROENKE L W, MOBERLY R, JR W, et al. Lithologic interpretation of continuous reflection profiling, deep sea drilling project, Leg 7[R]. WINTERER E L, RIEDEL W R, BRONNIMANN P, et al. Initial Reports of the Deep Sea Drilling Project VII, Part 2. Washington DC: US Government Printing Office, 1971: 1161-1226.

- [31] 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.
- [32] 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): 35-53.
- [33] DOMINGUEZ S, LALLEMAND S E, MALAVIEILLE J, et al. Upper plate deformation associated with seamount subduction[J]. *Tectonophysics*, 1998, 293(3/4): 207-224.
- [34] SMOOT N C, OGASAWARA P. Multi-beam sonar bathymetry and possible tectonic implications[J]. *The Journal of Geology*, 1983, 91(5): 591-598.
- [35] YEN H Y, LO Y T, YEH Y L, et al. The crustal thickness of the Philippine Sea Plate derived from gravity data[J]. *Terrestrial Atmospheric and Oceanic Sciences*, 2015, 26(3): 253-259.
- [36] SENO T, STEIN S, GRIPP A E. A model for the motion of the Philippine Sea plate consistent with NUVEL-1 and geological data[J]. *Journal of Geophysical Research Solid Earth*, 1993, 98(B10): 17941-17948.
- [37] MASUDA H, LUTZ R A, MATSUMOTO S, et al. Topography and geochemical aspects on the most recent volcanism around the spreading axis of the southern Mariana Trough at 13°N[R]. *JAMSTEC J. Deep Sea Res.*, 1994, 10: 176-185.
- [38] TAYLOR B. Backarc basin[M]. New York: Plenum Press, 1995: 237-279.
- [39] FRYER P, FUJIMOTO H, SEKINE M, et al. Volcanoes of the southwestern extension of the active Mariana island arc: new swath mapping and geochemical studies[J]. *The Island Arcs*, 1998, 7(3): 596-607.
- [40] MARTINEZ F, FRYER P, BECKER N. Geophysical characteristics of the southern Mariana Trough[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2000, 105(16): 591-607.
- [41] YAMAMOTO Y, OBANA K, TAKAHASHI T, et al. Imaging of the subducted Kyushu-Palau Ridge in the Hyuga-nada region, western Nankai Trough subduction zone[J]. *Tectonophysics*, 2013(589): 90-102.
- [42] KONG X C, LI S Z, WANG Y M, et al. Causes of earthquake spatial distribution beneath the Izu-Bonin-Mariana Arc[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2018(151): 90-100.
- [43] VOGT P R, LOWRIE A, BRACEY D, et al. Subduction of Aseismic Oceanic Ridges: effects on shape, seismicity, and other characteristics of Consuming Plate Boundaries[J]. *Special Paper of the Geological Society of America*, 1976(172): 1-59.
- [44] ISHIHARA K, YOSHIDA A. Configuration of the Philippine Sea Slab and seismic activity in and around Kyushu[J]. *Zisin*, 1992, 45(1): 45-51.
- [45] GUTSCHER M A, MALAVIEILLE J, LALLEMAND S, et al. Tectonic segmentation of the North Andean margin: impact of the Carnegie Ridge collision[J]. *Earth & Planetary Science Letters*, 1999, 168(3/4): 255-270.
- [46] MCCABE R, UYEDA S. Hypothetical model for the bending of the Mariana Arc[C]// American Geophysical Union. *The Tectonic and Geologic Evolution of Southeast Asian Seas and Islands: Part 2*, 1983: 281-293.
- [47] 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): 213-228.
- [48] HAWKINS J, BATIZA R. Metamorphic rocks of the Yap arc-trench system[J]. *Earth & Planetary Science Letters*, 1977, 37(2): 216-229.
- [49] 闫施帅, 鄢全树, 袁龙, 等. 索罗尔海槽俯冲前缘基底的岩石学和矿物学研究[J]. *海洋科学进展*, 2021, 39(4): 519-534. YAN S S, YAN Q S, YUAN L, et al. Petrology and mineral geochemistry of basement basalts in Sorol Trough subducting[J]. *Advances in Marine Science*, 2021, 39(4): 519-534.
- [50] 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.
- [51] 夏成龙. 雅浦海沟-岛弧-弧后盆地体系的地球物理特征及构造演化过程[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2021. XIA C L. Geophysical characteristics and tectonic evolution of Yap trench-arc-basin system[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2021.
- [52] WALLACE L M, ELLIS S, MANN P. Collisional model for rapid fore-arc block rotations, arc curvature, and episodic back-arc rifting in subduction settings[J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2009, 10(5): Q05001.
- [53] LARSON E E, REYNOLDS R L, OZIMA M, et al. Paleomagnetism of miocene volcanic rocks of Guam and the curvature of the Southern Mariana Island Arc[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 1975, 86(3): 346-350.
- [54] KARIG D E, ANDERSON R N, BIBEE L D. Characteristics of back arc spreading in the Mariana Trough[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1978, 83(B3): 1213.

Analysis of Geophysical Field and Tectonic Citivity in the Northern Yap Subduction Zone

HAN Xiao^{1,2}, FU Yong-tao¹

(1. *Key Laboratory of Marine Geology and Environment, Institute of Oceanology, CAS, Qingdao 266071, China;*

2. *University of Chinese Academy of Science, Beijing 100049, China*)

Abstract: Both of northern part of the Yap Trench and the southwestern end of the Mariana Trench are affected by the subduction of Caroline Island Ridge, but the geophysical characteristics for these two regions show significant differences. Based on a comprehensive analysis including the submarine topography, gravity anomaly, seismic activity and stress field, this study compared the geophysical characteristics of these two regions. Results shows that, ①There is a structural belt of horsts and grabens at the outer edge of the northern part of the Yap Trench. The depth of the southwestern end of the Mariana Trench where the Caroline Island Ridge being subducted is shallower than that of the surrounding area. And a concave angle is formed at the subduction front of the Ridge. ②The high Bouguer anomaly in the northern part of the Yap Arc and the southwestern end of the Mariana Arc corresponding to the Caroline Island Ridge suggest that the strong tectonic erosion may lead to the loss of volcanic arc crust, which indicates that high-density materials upwell underlie the arc. ③The seismic activities of the northern part of the Yap subduction zone and the southwestern end of the Mariana subduction zone are weak, and there is a lack of high magnitude earthquakes, suggesting that the Caroline Island Ridge subduction inhibits the tectonic activity of the subduction zone. There are a few moderate earthquakes in the southwestern end of the Mariana subduction zone, indicating that the slab subduction depth in the region is deeper than that in the northern part of the Yap subduction zone. ④The earthquakes at the southwestern end of the Mariana subduction zone have more strike-slip components, which are related to the oblique subduction of the Caroline plate and the oblique collision of the Caroline Island Ridge. ⑤The subduction angle of the Caroline Island Ridge relative to the trench strike is the key factor for leading to the differences in geophysical characteristics between the northern part of the Yap subduction zone and the southwestern end of the Mariana subduction zone.

Key words: Caroline Ridge; topographic feature; geophysical differences; subduction process

Received: January 30, 2022