



卡罗琳板块与穆绍海沟俯冲

孙卫东^{1,2,3*}, 张天羽^{2*}

1. 中国科学院海洋研究所深海极端环境与生命过程研究中心, 中国科学院海洋观测预报全国重点实验室, 青岛 266071

2. 崂山实验室, 青岛 266237

3. 中国科学院大学, 北京 100049

* 通讯作者, E-mail: weidongsun@qdio.ac.cn(孙卫东), tyzhang@qnlm.ac(张天羽)

收稿日期: 2024-10-25; 收修改稿日期: 2024-12-06; 接受日期: 2024-12-19; 网络版发表日期: 2025-01-07

国家自然科学基金项目(42249583、92258303)和崂山实验室项目资助

1 引言

西太平洋俯冲带有太平洋中最古老的洋壳, 年龄最老达到了200Ma。有意思的是, 紧邻太平洋老洋壳的南缘有一个新生代形成的小板块——卡罗琳板块。

卡罗琳板块的东侧为穆绍海沟。穆绍海沟呈现北端封闭的盲肠状, 即北面尚未开始俯冲。由北向南俯冲发育的程度逐渐加强。李春峰等(2025)通过综合地球物理分析等研究方法, 刻画了穆绍海沟的结构, 发现距离旋转极点越远, 变形越大, 由此提出卡罗琳板块的逆时针旋转导致了穆绍海沟的俯冲起始。这个新模型对研究穆绍海沟的俯冲起始机制有启发意义, 促进了我们对相关科学问题的思考: 卡罗琳板块是如何形成的? 作为一个小板块, 其逆时针旋转的动力是什么? 旋转的力量有多大? 是否可以引起穆绍海沟的俯冲?

2 卡罗琳板块

卡罗琳板块是西太平洋一个独特的小板块, 其洋壳绝大部分为约50Ma以后形成的(图1), 面积仅为 $1.3 \times 10^6 \text{ km}^2$ 。但是结构复杂, 三面是俯冲带。

卡罗琳板块北边是地幔柱和板块扩张共同形成的卡罗琳高原。该高原中央有洋隆和具有剪切、拉张性质的索罗尔海槽(Zhang等, 2021)。再往北是皮加费特(Pigafett)海盆, 该海盆保存了整个太平洋板块中最古老的洋壳(Kendrick等, 2022)。

卡罗琳板块的西边界南段有阿育海槽(Ayu trough)。残余的阿育海槽约600km长。其西为菲律宾海板块。前人根据地球物理与地形调查认为阿育海槽打开于25Ma, 打开速度接近于慢速扩张洋脊。其脊上裂谷被沉积物覆盖, 沉积物厚度显示其扩张速率在2.5Ma开始降低(Fujiwara等, 1995)。

卡罗琳板块南面与北俾斯麦板块交界处是马努斯海沟(Manus Trench), 这是一条在上新世以后(~5Ma)新形成的俯冲带, 俯冲活动在1Ma以前就已停止, 但马努斯海沟东南延伸部位仍处于活跃状态(Hall和Spakman, 2002)。其俯冲形成了结构复杂的马努斯弧后盆。该弧后盆东部是著名的帕克马努斯海盆, 弧后热液成矿系统发育(Sun等, 2004)。

在卡罗琳板块的中央, 呈南北向延伸的尤里匹克(Eauripik)隆起将其分为东、西两个海盆(图2), 该隆起北面与卡罗琳高原相连。Eauripik海隆形成于先前存在的转换断层(Gaina和Müller, 2007)。

中文引用格式: 孙卫东, 张天羽. 2025. 卡罗琳板块与穆绍海沟俯冲. 中国科学: 地球科学, 55(2): 655–659, doi: 10.1360/SSTe-2024-0297

英文引用格式: Sun W, Zhang T. 2025. The Caroline Plate and plate subduction along the Mussau Trench. Science China Earth Sciences, 68(2): 639–642, <https://doi.org/10.1007/s11430-024-1496-2>

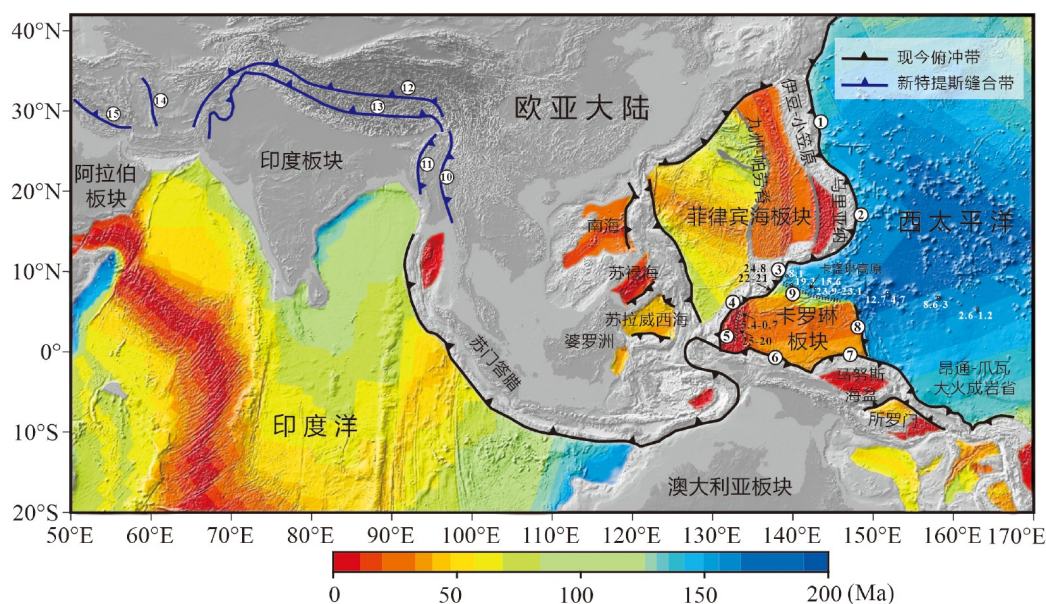


图1 卡罗琳板块及其周围洋壳年龄及构造简图

海盆年龄依据磁异常条带, 数据来自Seton等(2020). 卡罗琳岛链年龄数据来自Zhang等(2020)及其参考文献, 雅浦海沟的年龄数据来自Zhang和Zhang(2020), 阿育海槽年龄数据来自张臻等(2022). ①伊豆-小笠原海沟; ②马里亚纳海沟; ③雅浦海沟; ④帕劳海沟; ⑤阿育海槽; ⑥新几内亚海沟; ⑦马努斯海沟; ⑧穆绍海沟; ⑨索罗尔海槽; ⑩Shan Scraps缝合带; ⑪印度-缅甸缝合带; ⑫班公湖-怒江缝合带; ⑬雅鲁藏布江缝合带; ⑭Waras-Panjaw缝合带; ⑮扎格罗斯缝合带. 卡罗琳板块位于新特提斯缝合带与西太平洋俯冲带交汇处, 西太平洋俯冲带的发育导致新特提斯缝合带东缘发生弯折, 形成山弯构造

3 卡罗琳板块的成因

从年龄分布图看, 卡罗琳板块像西太平洋板块上的一块补丁(图1). 从构造背景看, 卡罗琳板块的形成于特提斯构造域向太平洋构造域转折的结合部位. 新特提斯洋闭合过程中, 约53Ma起, 印度板块和澳大利亚板块与欧亚板块发生硬碰撞, 其向北漂移的速度迅速降低, 导致西太平洋发生转向、新生代伊豆-小笠原-马里亚纳俯冲起始(Sun等, 2020; Li等, 2021). 新生的西太平洋俯冲体系与正在闭合的新特提斯俯冲带呈现近90°的夹角. 西太平洋新生代俯冲起始过程中, 强烈的挤压及拉拽会导致新特提斯俯冲带在夹角处发生拼贴、张裂和弯折等过程, 进而形成山弯构造. 因此该区域发育大量山弯构造(Cawood等, 2011). 在山弯构造形成过程中, 伴随的大量拉张和挤压环境导致众多小洋盆的打开和闭合(Xiao等, 2015). 在此过程中, 形成了大量的拉张和挤压. 我们认为, 正是山弯构造形成过程中, 局部的拉张形成了卡罗琳板块. 东南亚和西太平洋多岛洋的很多小洋盆可能均与山弯构造有关(图1).

4 穆绍海沟

卡罗琳板块的东缘有一个婴儿期的俯冲带, 穆绍海沟俯冲带(Mussau Trench). 目前穆绍海沟的地震活动相对平静, 并且其东侧的莱拉海槽显示出伸展松弛, 表明该俯冲带已经夭折了. 穆绍海沟位于卡罗琳海盆的东部边界(图1), 呈盲肠状, 其端点在北面, 靠近卡罗琳高原, 向南开口. 南端沿马努斯海沟俯冲到马努斯弧后盆. 海沟深度从北面的5500m变化到南面约7200m. 海沟西侧为东倾卡罗琳洋壳, 东侧为高耸的海底山脊, 水深从2600m到600m, 显示典型的沟弧结构. 由南向北依次变新的特点为研究板块俯冲起始机制提供了天然实验室.

磁异常显示穆绍海沟东侧的岩石圈与卡罗琳板块明显不同, 可能是白垩纪的太平洋洋壳(图1), 地形较为平缓. 初步推断, 该海沟形成于年轻的卡罗琳板块向东部老的太平洋板块俯冲(李春峰等, 2025). 再向东为莱拉海槽(Lyra Trough), 其成因目前尚不清楚, 可能与卡罗琳板块类似, 也是西太平洋板块俯冲过程中应力不均衡而形成的局部拉张.

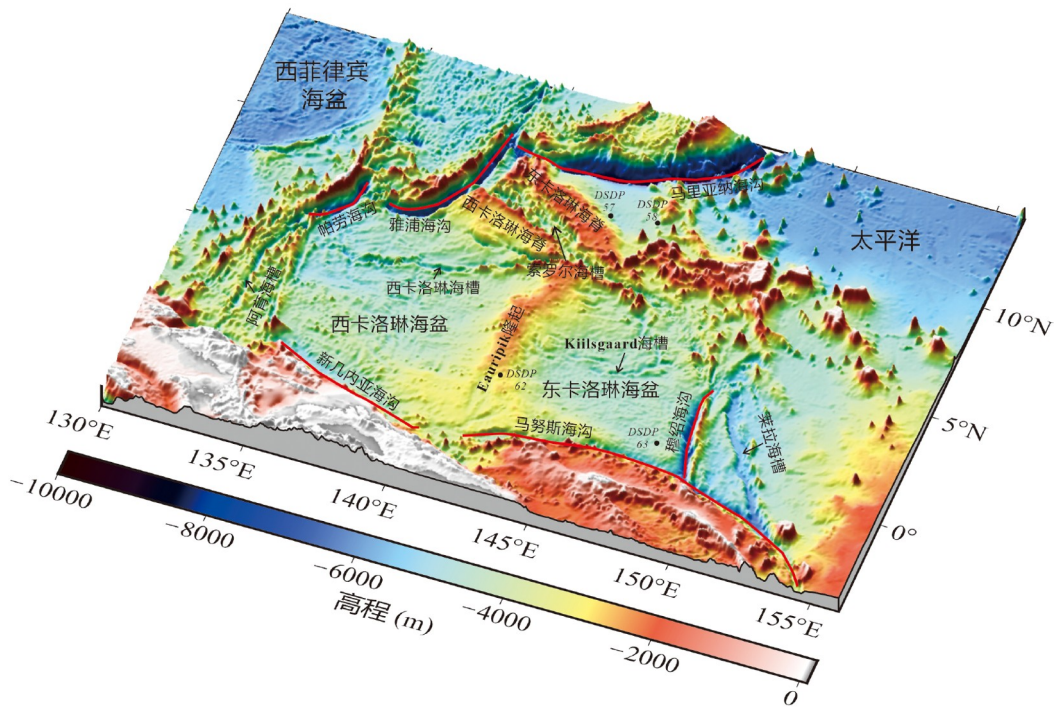


图2 卡罗琳板块及其邻区地形和构造单元图

水深数据来自 ETOPO1 Global Relief Model(<https://ngdc.noaa.gov/mgg/global/global.html>)

穆绍海沟的形成时代目前也有不同观点。前人认为该俯冲带形成于约1Ma(Hegarty等, 1983)。最近研究认为其形成时代约为25Ma(Zhang等, 2023), 且由南向北逐渐变年轻。李春峰等(2025)通过近海沟沉积速率估算了海沟盆地沉积单元的沉积时间, 并与卡罗琳板块DSDP 63站位的局部基底年龄对比, 计算了研究区初始俯冲的时间9~10Ma至约16.8Ma。考虑到马努斯俯冲带的年龄为5Ma, 而穆绍海沟整体沿马努斯海沟俯冲, 穆绍海沟南端的年龄应该远老于5Ma。国家自然科学基金委583航次初步结果显示, 穆绍海沟盲肠端很多岩石裸露地表, 暗示其停止俯冲的年龄可能很小。

5 穆绍海沟成因

穆绍海沟的俯冲显然是从南面起始, 并不断向北拓展到现今的盲肠部位。李春峰等(2025)根据水深、重力异常、增生楔规模、海沟沉积单元的厚度以及地震成像资料, 提出水平压缩作用在穆绍俯冲带形成过程中起到了重要的作用。他们认为这可能与卡罗琳板块逆时针旋转一致(Weissel和Anderson, 1978; Kim等,

2009), 即距离旋转极点越远, 变形越大(李春峰等, 2025)。根据他们的模型, 在俯冲启动前, 穆绍海沟已经经历了强烈的压缩和隆起。但是, 由于中生代太平洋板块较硬, 难以挠曲, 而罗琳海板块先在一端发生挠曲, 向太平洋板块俯冲。随后逐渐迁移, 形成了穆绍海沟。至于挤压的动力来源, 他们认为是卡罗琳板块的逆时针旋转来解释从俯冲到非俯冲的快速转变(李春峰等, 2025)。

前人利用太平洋-菲律宾和菲律宾-卡罗琳板块之间相对运动速度推断卡罗琳板块曾经发生过旋转, 旋转中心在13°N、144°E, 旋转速率为0.7°/Ma(Weissel和Anderson, 1978)。但是, 根据“岩浆引擎”假说, 板块运动的能量来自地球内部的热能。热能通过岩浆用有序释放, 将热能转化为势能, 进而引发运动(孙卫东, 2019)。卡罗琳板块很小, 板块内部的年龄差不足40Ma, 很难产生足够的坡度来引发板块旋转。考虑到卡罗琳板块位于特提斯构造域与太平洋构造域的转折端, 其旋转更可能是被动的。

前人关于卡罗琳板块旋转的原因有多种观点。一种观点认为可能与卡罗琳高原与雅浦海沟的碰撞

(Stern, 2004)或卡罗琳板块沿马努斯海沟(新几内亚海沟)的俯冲有关. 另一种观点则认为碰撞可能将更多的晚期变形集中在东边界的穆绍海沟. 而西向的运动停止只是“放大了卡罗琳板块逆时针旋转的成分”(李春峰等, 2025). 由此可见, 卡罗琳板块的旋转和穆绍海沟的俯冲起始均是区域内挤压、碰撞的产物. 问题是, 卡罗琳高原沿雅浦海沟与菲律宾海板块碰撞的时间是22Ma(Zhang和Zhang, 2020), 似乎晚于穆绍海沟起始的时间. 更重要的是, 该碰撞发生于该板块的北缘, 应该导致卡罗琳板块的顺时针旋转. 同理, 如果是该碰撞导致穆绍海沟的形成, 则穆绍海沟北侧应该先俯冲.

6 结束语

微板块的命运往往受控于大板块. 在整个太平洋向北西运动的大背景下, 卡罗琳板块受到挤压, 在薄弱部位产生俯冲. 因此, 卡罗琳板块三面是俯冲带. 阿育海槽是一个年轻的扩张洋脊, 目前沿九州帕劳洋脊的南延向西俯冲到菲律宾海板块之下. 该俯冲带没有经历伊豆-小笠原-马里亚纳沟弧盆体系的一系列弧后拉张, 表明该俯冲起始较晚. 本文认为卡罗琳板块是在山弯构造演化过程中不断拉张形成新的小板块. 在伊豆小笠原马里亚纳俯冲起始时, 卡罗琳板块还没有形成. 随着西太平洋俯冲带的演化, 山弯构造导致频繁的挤压-拉张转换, 卡罗琳板块逐渐与菲律宾板块产生挤压, 导致了穆绍海沟的形成. 而西边沿阿育海槽西边的俯冲起始后, 引起穆绍海沟俯冲的挤压力减弱, 俯冲就停止了.

综上所述, 卡罗琳板块位于新特提斯构造域的东延. 理解卡罗琳板块的演化历史是解析新特提斯构造域向太平洋构造域转化的过程的一个重要的切入点, 同时也有助于揭示板块俯冲起始机制等重大科学问题.

致谢 本文的撰写过程中得到了张丽鹏、田凡凡、袁帅、王鲲、郝禹霏等的帮助, 谨此致谢.

参考文献

李春峰, 邓永康, 吴涛, 董冬冬, 张国良, 张佳政, 刘宇涛, 李亚清, 唐富贵, 章露露. 2025. 卡罗琳板块在穆绍海沟的拓展型俯冲起始. 中国科学: 地球科学, 55: 255–271

孙卫东. 2019. “岩浆引擎”与板块运动驱动力. 科学通报, 64: 2988–3006

张臻, 李三忠, 王光增, 索艳慧, 汪刚, 王鹏程. 2022. 加罗林板块边界过程研究. 中国科学: 地球科学, 52: 1749–1763

Cawood P A, Pisarevsky S A, Leitch E C. 2011. Unraveling the New England orocline, east Gondwana accretionary margin. *Tectonics*, 30: 2011TC002864

Fujiwara T, Tamaki K, Fujimoto H, Ishii T, Seama N, Toh H, Koizumi K, Igarashi C, Segawa J, Kobayashi K, Kido M, Seno T, Kinoshita H. 1995. Morphological studies of the Ayu Trough, Philippine Sea-Caroline Plate boundary. *Geophys Res Lett*, 22: 109–112

Gaina C, Müller D. 2007. Cenozoic tectonic and depth/age evolution of the Indonesian gateway and associated back-arc basins. *Earth-Sci Rev*, 83: 177–203

Hall R, Spakman W. 2002. Subducted slabs beneath the eastern Indonesia-Tonga region: Insights from tomography. *Earth Planet Sci Lett*, 201: 321–336

Hegarty K A, Weissel J K, Hayes D E. 1983. Convergence at the Caroline-Pacific Plate Boundary: Collision and Subduction, The Tectonic and Geologic Evolution of Southeast Asian Seas and Islands: Part 2. *Geophys Monogr Ser*, 27: 326–348

Kendrick M A, Zhao J, Feng Y. 2022. Early accretion and prolonged carbonation of the Pacific Ocean’s oldest crust. *Geology*, 50: 1270–1275

Kim Y M, Lee S M, Okino K. 2009. Comparison of gravity anomaly between mature and immature intra-oceanic subduction zones in the western Pacific. *Tectonophysics*, 474: 657–673

Li H, Arculus R J, Ishizuka O, Hickey-Vargas R, Yogodzinski G M, McCarthy A, Kusano Y, Brandl P A, Savov I P, Tepley Iii F J, Sun W. 2021. Basalt derived from highly refractory mantle sources during early Izu-Bonin-Mariana arc development. *Nat Commun*, 12: 1723

Seton M, Müller R D, Zahirovic S, Williams S, Wright N M, Cannon J, Whittaker J M, Matthews K J, McGirr R. 2020. A global data set of present-day oceanic crustal age and seafloor spreading parameters. *Geochem Geophys Geosyst*, 21: e2020GC009214

Stern R. 2004. Subduction initiation: Spontaneous and induced. *Earth Planet Sci Lett*, 226: 275–292

Sun W, Zhang L, Li H, Liu X. 2020. The synchronic Cenozoic subduction initiations in the west Pacific induced by the closure of the Neo-Tethys Ocean. *Sci Bull*, 65: 2068–2071

Sun W, Arculus R J, Kamenetsky V S, Binns R A. 2004. Release of gold-bearing fluids in convergent margin magmas prompted by magnetite crystallization. *Nature*, 431: 975–978

Weissel J K, Anderson R N. 1978. Is there a Caroline plate? *Earth Planet Sci Lett*, 41: 143–158

- Xiao W, Windley B F, Sun S, Li J, Huang B, Han C, Yuan C, Sun M, Chen H. 2015. A tale of amalgamation of three permo-triassic collage systems in central Asia: Oroclines, sutures, and terminal Accretion. *Annu Rev Earth Planet Sci*, 43: 477–507
- Zhang G, Zhang J, Wang S, Zhao J. 2020. Geochemical and chronological constraints on the mantle plume origin of the Caroline Plateau. *Chem Geol*, 540: 119566
- Zhang G, Yao J, Xu F, Wu T, Li C F, Wang S. 2023. Origin of the Mussau Trench in the Western Pacific: Geochemical and mineralogical constraints from basalts and serpentinized peridotites. *Chem Geol*, 642: 121798
- Zhang J, Zhang G. 2020. Geochemical and chronological evidence for collision of proto-Yap arc/Caroline plateau and rejuvenated plate subduction at Yap trench. *Lithos*, 370-371: 105616
- Zhang Z, Dong D, Sun W, Zhang G, Bai Y. 2021. Investigation of an oceanic plateau formation and rifting initiation model implied by the Caroline Ridge on the Caroline Plate, western Pacific. *Int Geol Rev*, 63: 193–207

(责任编辑: 李三忠)