

# 高曲率班达俯冲带成因机制进展及展望

刘豫威<sup>1</sup>, 丁巍伟<sup>1, 2\*</sup>, 王春阳<sup>1</sup>, 童政毅<sup>3, 4</sup>, 闻翔天<sup>1</sup>

1. 海底科学与划界全国重点实验室, 自然资源部第二海洋研究所, 杭州, 310012

2. 上海交通大学海洋学院, 上海, 200030

3. 浙江大学地球科学学院, 杭州, 310027

4. 中国石油集团东方地球物理勘探有限责任公司, 西南物探研究院, 成都, 610213

**摘要:** 班达俯冲带位于东南亚环形俯冲体系的最东端, 以其近 180°的全球最高曲率和复杂的运动学模式而备受关注。其成因机制长期以来存在争议, 主要围绕“双板块模型”与“单一板块回滚模型”两种观点展开。前者强调多板块交互与微板块俯冲的作用, 而后者主张高曲率形态主要源自印度洋-澳大利亚板块的持续俯冲与板片回滚。近年来, 地震层析成像等地球物理观测进一步揭示了俯冲板片的连续弯折形态, 支持了板片回滚的主导作用。在动力学研究方面, 数值模拟与物理模拟已成为揭示深部过程与地表响应的重要手段, 但现有实验多基于规则的板块几何形态, 难以充分反映澳大利亚北缘不规则大陆边缘对俯冲过程的控制。本文系统总结了班达高曲率俯冲带成因机制方面的研究进展, 并指出未来需开展三维岩石圈尺度物理模拟, 通过构建符合实际地质条件的不规则板块形态与流变结构, 定量揭示大陆岩石圈几何形态、地幔流动与碰撞过程在弧形俯冲带形成中的协同作用, 从而为其动力学机制提供关键实验依据。

**关键词:** 班达俯冲带, 物理模拟, 板块俯冲, 动力学模式

**中图分类号:** P67

**收稿日期:** 2026-01-16

## Progress and Prospects on the Formation Mechanism of the High-Curvature

基金项目: 国家重点研发计划 (2023YFF0803404), 国家自然科学基金 (42476071), 浙江省自然科学基金资助项目 (LQK26D060003)

作者简介: 刘豫威 (1999-), 男, 硕士研究生, 主要从事俯冲带物理模拟研究. E-mail: ywliuocan@163.com, ORCID: 0009-0003-9836-7790.

\*通讯作者: 丁巍伟, E-mail: wwding@sio.org.cn, ORCID: 0000-0002-9944-2356.

# Banda Subduction Zone

Yuwei Liu<sup>1</sup>, Weiwei Ding<sup>1,2\*</sup>, Chunyang Wang<sup>1</sup>, Zhengyi Tong<sup>3,4</sup>, Xiangtian Wen<sup>1</sup>

*1. State Key Laboratory of Submarine Geoscience, Second Institute of Oceanography, MNR, Hangzhou, 310012, China*

*2. School of Oceanography, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai, 200030, China*

*3. School of Earth Sciences, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China*

*4. Southwest Geophysical Research Institute, BGP, CNPC, Chengdu, 610213, China*

**Abstract:** The Banda subduction zone lies at the eastern end of the Southeast Asian Curved Subduction System. It is notable for its nearly 180° curvature, among the greatest documented worldwide, and for its complex kinematics. The origin of this curvature remains under debate. Two main models have been proposed. The “dual-plate model” emphasizes interactions among multiple plates and the subduction of microplates. The “single-plate rollback model” links the strong curvature to continued subduction and rollback of the Indo-Australian plate. Recent geophysical observations, including seismic tomography, image a laterally continuous and strongly curved slab. These results further support slab rollback as a primary control. Numerical and analogue modeling are widely used to investigate mantle dynamics and surface responses. However, most existing models assume simple plate geometries. They therefore cannot fully represent the role of the irregular continental margin along the northern Australian plate. This paper reviews recent progress on the highly curved Banda subduction zone and outlines priorities for future work. In particular, it calls for three-dimensional, lithosphere-scale analogue modeling with realistic plate geometry and rheological structure. Such models can quantify how continental lithospheric geometry, mantle flow, and collision jointly shape arcuate subduction zones. They can also provide key experimental constraints on the underlying dynamics.

**Key words:** Banda Subduction Zone; Physical Simulation; Plate Subduction; Dynamic Models

## 引言

俯冲作用既是驱动板块构造的关键动力来源，也是将地表岩石圈物质输送至地幔深处的主要通道(宁杰远, 1996; Stern, 2002; O'Neill et al., 2007; Korenaga, 2013; Gerya et al., 2015)。此外，俯冲作用是引发地震、火山喷发与海啸等一系列重要自然灾害的关键地质过程之一(宁杰远, 1996; Stern, 2002; Zheng and Zhao, 2017)。俯冲过程及其引发的各种地质事件所释放的物质与能量不仅直接改变地表形态，还能通过火山气体排放、尘埃扩散等方式介入全球气候系统的调节，进而对地球的宜居性产生深远影响(Bebout et al., 2018; 徐义刚等, 2024; 苏懿等, 2025)。东南亚位于欧亚、澳大利亚和太平洋板块交汇处，是全球地质活动最为活跃的区域之一(Li et al., 2021)。自中生代以来，新特提斯洋、太平洋和印度洋向该地区的多向持续俯冲汇聚，塑造了由西南侧的苏门答腊-爪哇-班达俯冲带以及东侧的菲律宾俯冲带共同构成的环形俯冲系统(Ding et al., 2023)。其中，环形俯冲体系东南段的班达俯冲带尤为独特，其曲率高达  $180^\circ$ ，并展现出复杂的板块运动学特征（图 1）。与以洋-陆俯冲为主的苏门答腊和爪哇俯冲带不同，班达俯冲带的演化受到弧-陆碰撞的显著控制(Li et al., 2024)，伴随强烈的构造变形与岩浆活动，为深入探究高曲率弧形俯冲带的形成机制及其动力学过程提供了关键天然实验室，对理解板块汇聚边界的构造演化具有重要的科学意义。



2013), 前人已开展一系列研究以阐释海沟弯曲的机制。一类机制与板片后撤及地幔环流有关。以斯科舍俯冲带为例, 其板块宽度较窄(约 800 km), 在发生板片后撤时, 板块边缘诱发的地幔环流在板块中部更为集中, 从而共同塑造了该俯冲带的弧形形态(Schellart et al., 2007)。

另一类机制涉及正浮力体(如无震海脊或洋底高原)的俯冲。这类构造的密度通常略低于周围洋壳(Tetreault and Buiter, 2014), 使得包含此类正浮力单元的岩石圈能够局部阻碍俯冲板片拖拽和板块后撤作用, 其间正常大洋岩石圈因具有较强负浮力, 易于发生俯冲与后撤, 进而在三维空间上影响海沟运动, 在平面特征上则主要表现为海沟的弯曲(Hsui and Youngquist, 1985)。例如, 存在于秘鲁下方和智利中北部的两个主要平板俯冲段, 可能分别对应纳斯卡海脊与胡安·费尔南德斯海脊的斜向俯冲作用, 这些过程不仅导致局部俯冲角度变缓, 也引发了海沟的弯曲与分段现象(图 2)(Martinod et al., 2013)。此外, 海沟弯曲还可能受岩石圈年龄沿海沟走向的不均一性、俯冲板块强度以及岩石圈几何形态等多种因素影响(Morra et al., 2006; Schellart, 2010; Moresi et al., 2014)。

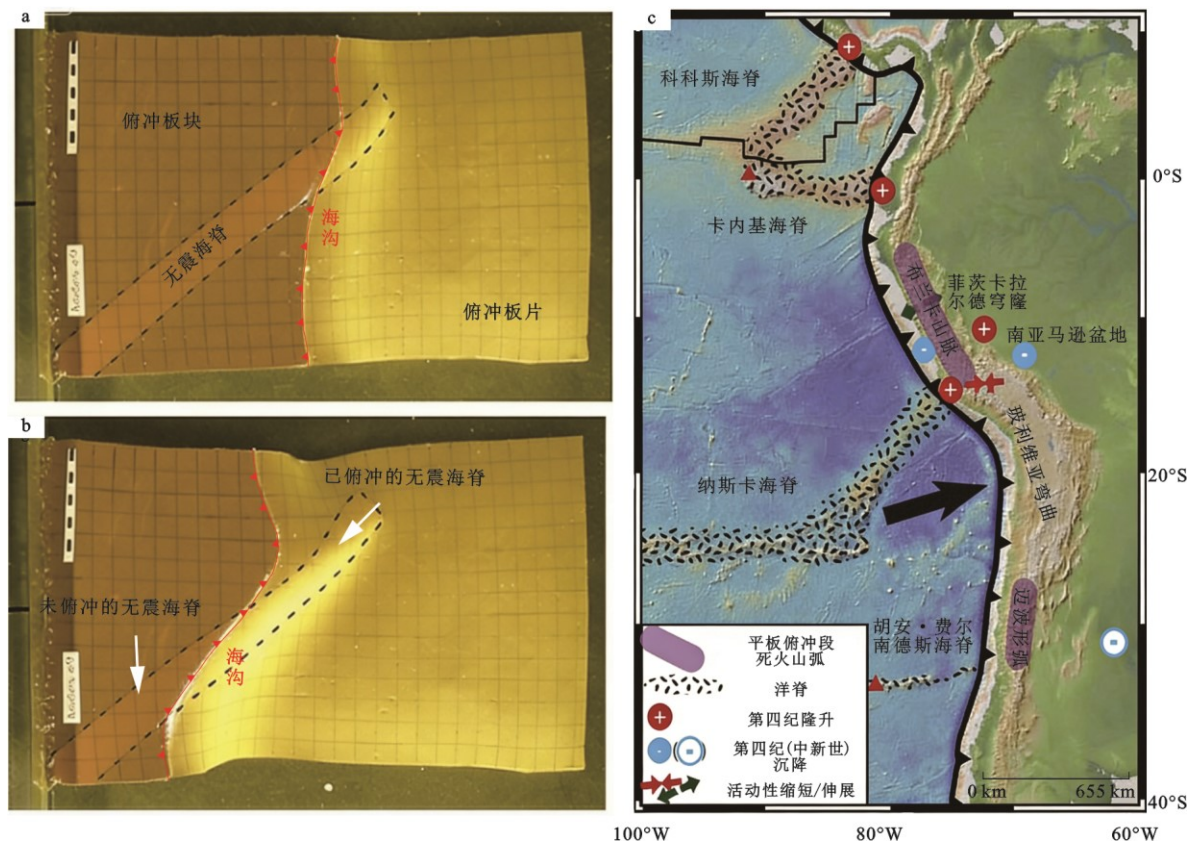


图2 无震海脊俯冲过程的物理模拟（俯视图）及其在南美洲下方的实际俯冲实例

Fig.2 Analog modeling (top view) of aseismic ridge subduction and a natural example beneath South America

a-b: 展示了斜向正浮力海脊在自由俯冲条件下海沟的弯曲形态，可见无震海脊的俯冲对海沟整体形态具有显著控制作用。c: 图中黑色箭头标示了纳斯卡板块相对于南美板块的 N75°E 向运动矢量。图中进一步揭示，秘鲁-智利俯冲带的宏观弯曲与纳斯卡海岭、胡安·费尔南德斯海岭的俯冲作用密切相关，其形态特征与 a-b 中的模拟结果高度相似。此外，研究还表明，由海岭俯冲所引发的地形响应（如亚马逊盆地的沉降与菲茨卡拉尔德穹窿的抬升）与斜向海岭俯冲的地形演化模型相吻合。

（据 Martinod et al., 2013 修改）

针对班达俯冲带，前人亦已展开一系列相关研究。Hatherton 和 Dickinson(1969)通过分析安山岩钾含量与地震带深度的关系，揭示了俯冲带下方地震活动与火山地球化学特征之间的关联，为理解该区域火山与地震的相互作用提供了重要依据。McKenzie(1969)提出的模型进一步指出，俯冲板片在岛弧区域会引起显著的热流异常，并通过地幔对流影响板块运动，从

而为解释班达俯冲带的热流分布和地震活动提供了理论支撑。此外，Isacks(1968)团队的研究系统描述了下沉岩石圈板块与地幔的相互作用机制，阐释了其在不同深度触发地震和火山活动的方式。这些早期研究分别从地球化学、热力学和地震学等角度，为理解班达高曲率俯冲带的形成机制奠定了早期的地质与地球物理基础。

## 1. 高曲率班达俯冲带的形成：双板块模型

班达俯冲带的高曲率形成机制研究始于 Cardwell 和 Isacks(1978)提出的“双板块模型”。该模型认为，该区域曾存在两个俯冲系统：一条沿爪哇海沟 (Java Trench) -帝汶海槽 (Timor Trough) -阿鲁海槽 (Aru Trough) 延伸，另一条位于斯兰海槽 (Seram Trough)，两者通过塔雷拉-阿杜纳断裂带 (Tarera-Aiduna Fault Zone) 连接。他们结合地震活动分析与铅片模拟实验指出，班达俯冲带东端的弯曲源于印度-澳大利亚板块与东南亚的持续相互作用，而非板块断裂 (Cardwell and Isacks, 1978)。此后多项研究从不同角度支持并丰富了这一“双板块模型”模型，并得到了后续不少工作的支持 (如 McCaffrey, 1988; McCaffrey and Abers, 1991)。McCaffrey(1989)综合深浅地震分布、震源机制与波速特征，进一步确认了印度-澳大利亚板块 (Indian-Australian plate) 向北俯冲与鸟头地块 (Bird's Head) 向西南俯冲的双重系统，并强调二者主要通过走滑断裂 (塔雷拉-阿杜纳断裂带) 和碰撞变形 (新几内亚褶皱冲断带, New Guinea fold-and-thrust belt) 相互调节。Das(2004)通过震源重新定位研究，揭示了班达弧中深源地震带在走向和深度上均呈显著非均匀分布，并发现在不同区段存在明显的地震活动空区。该结果从地震活动性角度为班达俯冲带下方的“双板块模型”提供了关键证据。Hinschberger et al.(2005)班达俯冲带的形成是一个多因素相互作用的复杂过程，不仅涉及印度-澳大利亚板块在巽他海沟 (Sunda Trench) 和班达海沟 (Banda Trench) 的俯冲，还包括可能存在的“帝汶-塞兰洋 (Timor - Seram Ocean)”微板块的全面俯冲，以及澳大利亚板块与班达弧

的碰撞，这些事件共同促成了该地区双俯冲系统的形成（图 3）。Špičák et al.(2013)通过对浅源地震（<100 km）的精细分析，划分出 11 个独立地震域，识别出南侧北倾的班达浅部瓦氏-贝尼奥夫带（Banda shallow Wadati-Benioff zone）与北侧南倾的塞兰浅部瓦氏-贝尼奥夫带（Seram shallow Wadati-Benioff zone），二者之间被一条长约 600 公里的左行走滑带塔雷拉-阿杜纳断裂带所分隔，且该区域呈现走滑-拉张特征，无向西俯冲的证据。这一结果从浅部构造活动的分区性与不连续性角度，进一步证实了班达弧下方存在两个独立的、现今活动的俯冲带。目前，支持“双板块模型”的地质证据主要依赖于地震学观测，来自地球化学、岩石学或大地测量学等其他学科的证据尚有待补充。

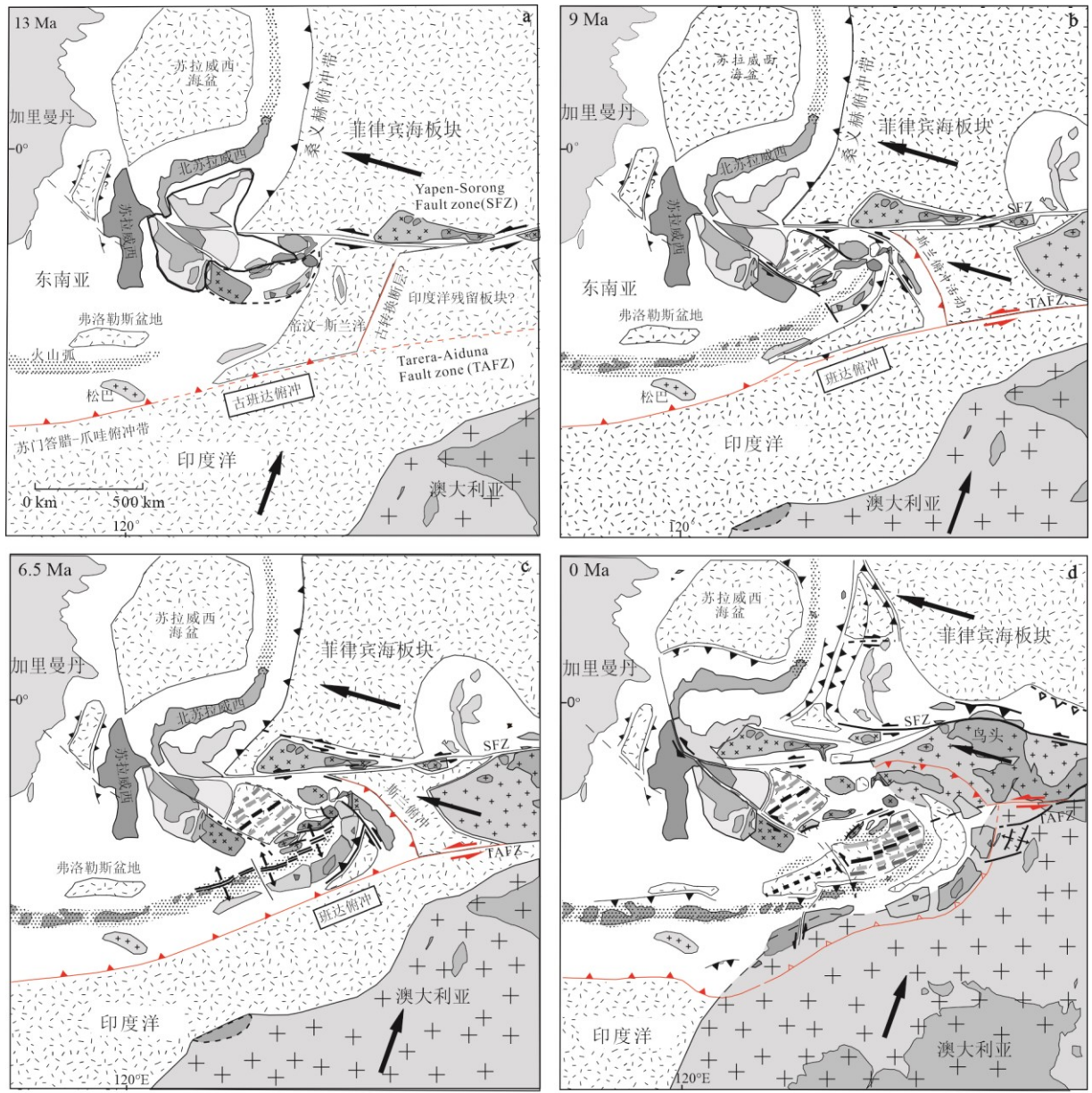


图 3 基于双板块模型的区域演化模式图

Fig.3 Regional Evolutionary Model Diagram Based on a Dual-Plate Model

本系列图展示东印度尼西亚地区在 13 Ma (a)、9 Ma (b)、6.5 Ma (c) 及现今 (0 Ma, d) 四个阶段的板块重建格局。黑色箭头代表板块运动方向。图中展示了，现今班达俯冲带的形成是自 13 Ma 以来，印度洋—澳大利亚板块向北俯冲与一个印度洋残留微板块向西俯冲（“双板块”机制）共同作用的结果。两个独立的俯冲带在演化过程中由 Tarera-Aiduna 断层相连，共同塑造了该区域的构造格局。据(Hinschberger et al., 2005)修改

## 2. 高曲率班达俯冲带的形成：单板块模型

尽管“双板块模型”在一段时间内被广泛接受，但仍有一些研究认为“双板块模型”过于复杂，单一的板块俯冲后撤即可以形成高曲率的弧形结构(Fitch and Molnar, 1970; Bowin et al., 1980; Xie et al., 2024)。随着探测手段的进步，特别是地震层析成像在地学领域的广泛应用，班达俯冲带下方的地幔结构得到了更加清晰的展示。Widiyantoro 和 Hilst(1997)利用该技术对班达俯冲带下方的地幔结构进行了成像，揭示了俯冲板片的“勺形”结构特征，虽然有一定的弯曲，但并未发生间断，为进一步理解班达俯冲带的俯冲特性和复杂几何形态提供了关键证据，后续东南亚地区的层析成像研究均支持这一观测(如 Wu et al., 2016)。Spakman 和 Hall(2010)结合地震层析成像和区域板块构造重建技术，深入研究了班达俯冲带区域内的板块俯冲与地幔相互作用过程，提出了“单一板块回滚模型”(图 4)，即班达俯冲带的高角度弯曲是印度洋-澳大利亚板块北移过程中，北侧的班达板片向南东方后撤回滚所导致的。在这一回滚过程中，地幔阻力不断增大，使下沉的板片逐渐发生弯曲，并引起强烈的地壳变形。该模型得到多方面地质证据的支持，其中尤为关键的是俯冲后撤导致上盘拉张并形成一系列伸展构造，南、北班达盆地的打开即是班达俯冲带持续后撤引发伸展的直接表现(Hall, 2017)。除此之外，Pownall et al.(2013)指出，塞兰(Seram)与安汶(Ambon)地区存在强烈的南北向伸展，其中塞兰岛中部的 Kawa 剪切带虽以左旋走滑为主，但其内部的蛇纹石化橄榄岩透镜体揭示该带原为低角度伸展拆离断层，后期被走滑改造，说明伸展作用早于走滑运动并主导该区构造演化。Pownall et al.(2016)进一步强调，韦伯深渊(Weber deep)的形成直接归因于俯冲后撤引发的弧前岩石圈伸展。Yang et al.(2021)对 Kumawa 走滑断层的研究也支持这一机制，指出该断层主要形成于过去 2 Ma 以来班达板块后撤导致的前弧伸展，其与班达拆离带在走向、时代、扩展方向及低地震活动性等方面的相似性，进一步印证了俯冲后撤的主导作用。此外，Hall(2017)重新阐释塞兰海槽并非海沟，而是板块后撤驱动斜向汇聚形成的褶皱

冲断带变形前缘; Zhang et al.(2024)揭示阿鲁 (Aru) 海槽自 3 Ma 以来由班达板块后撤引发的俯冲板块伸展启动, 并在斜向弧—陆碰撞与走滑断裂共同作用下持续演化。另一项关键证据来自岩石学与年代学研究。Pownall et al.(2014)在塞兰岛发现了 16 Ma 前的超高温 (UHT) 麻粒岩, 是地球上已知最年轻的 UHT 岩石, 其形成被解释为板块后撤诱发岩石圈伸展, 导致热的地幔折返并加热上覆地壳的结果。锆石 U-Pb 与角闪石  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  定年结果均显示, 该变质事件的发生时间 (约 16 Ma) 与班达板块后撤的起始时间 (约 15 Ma) 高度一致, 为两者之间的成因关联提供了直接约束(Pownall, 2015)。这一发现不仅从热—构造机制上支持了板片回滚模式, 也进一步巩固了班达俯冲带属于“单板块”俯冲系统的认识 (图 5)。最近的研究同样表明, 班达俯冲带之下的板片呈现连续、统一的弯曲形态, 并未发生破裂或分段这一发现支持了“单一板块回滚模型”。(Li et al., 2024; Xie et al., 2024)。

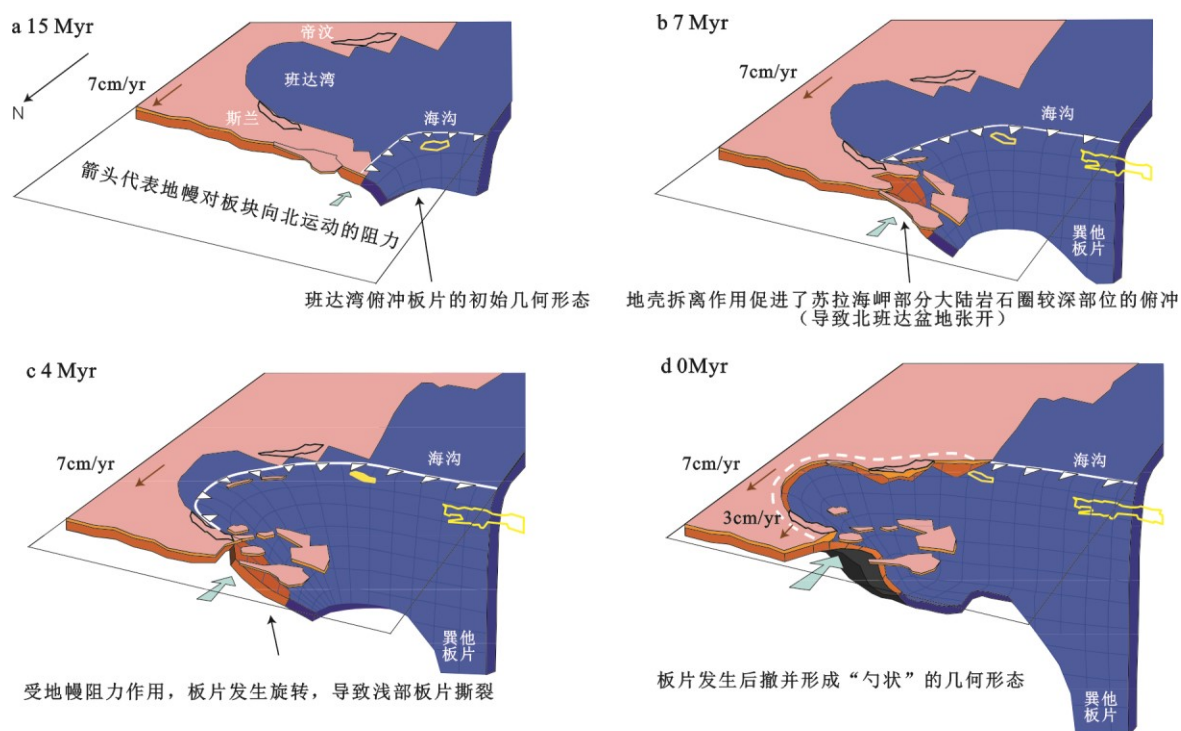


图 4 单板块模型班达俯冲带演化过程

Fig.4 Evolutionary Process of the Banda Subduction Zone Based on a Single-Plate Model

该系列图展示了 15 Myr、7 Myr、4 Myr 及现今 (0 Myr) 时期的班达区域的构造状态。黑色箭头代表了

印度洋-澳大利亚板块的运动方向，并标注了速度。约 15 Myr 前开始，班达湾板片的后撤导致苏拉岬的岩石圈发生拆离，使地壳碎片残留在苏拉威西部分地区及南北班达海盆周围 (b, c, d); 而自 4 Myr 以来，由于地幔阻力增大 (图中蓝色箭头所示)，板片进一步下沉并发生弯曲 (c, d)。现今，帝汶-塞兰海槽 (虚线标示) 已成为活跃的拆离作用发生区 (d)。整体的板片后撤作用形成了一近乎平躺的板片，该板片停滞于约 660 km 深度的上-下地幔边界面上。据 (Spakman and Hall,2010) 修改

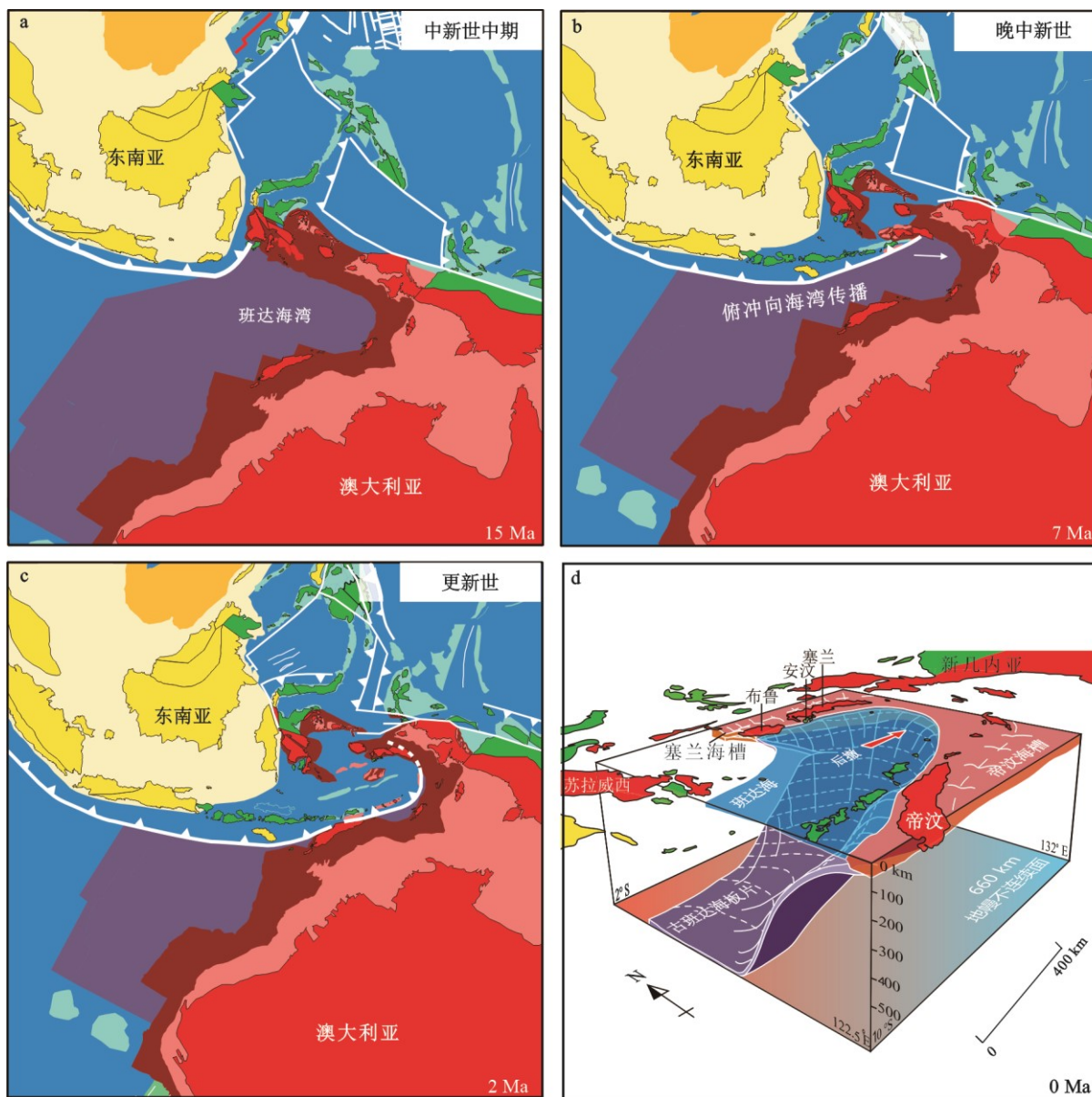


图 5 基于单板块模型的区域演化模式图

Fig.5 Regional Evolutionary Model Diagram Based on a Single-Plate Model

基于 Hall (2012) 的构造重建，展示了 15 Ma 以来澳大利亚与东南亚之间的碰撞过程及班达俯冲体系的后

续演化。绿色区域代表板块边缘形成的岛弧、蛇绿岩及增生楔；蓝色区域代表年轻洋壳；紫色区域代表古老洋壳；青色填充区表示海底岛弧地体、热点火山产物及海台；东南亚大陆地壳以不同深浅的黄色表示；源自侏罗纪冈瓦纳大陆的陆壳碎片以不同红色色调标注。a: 15 Ma 时期的构造重建。b: 7 Ma 时期的构造重建，白色箭头代表了海沟的运动方向。c: 2 Ma 时期的构造重建。d: 根据地震震源分布与地震层析成像重建的原班达海板片三维结构。(参考 Pownall et al., 2014)

### 3. 班达俯冲带动力学模拟进展及展望

对俯冲动力学过程的理解，无法仅依靠地质与地球物理的观测。地震层析成像等观测技术为揭示班达俯冲带的深部结构提供了关键约束，但只能反映现今的状态。相比之下，动力学模拟可基于此类深部结构约束，直观地动态再现并量化驱动构造演化的动力学过程(Strak and Schellart, 2016; Van Zelst et al., 2022)。动力学模拟可在一定程度上弥补自然观测的缺点，它对观测数据的依赖性较低，比自然观测更节省人力、物力和时间，且模拟结果具有较高的可复现性及物理学上的可行性(Gerya, 2019; Tong et al., 2024)。其具体方法包括实验室物理/相似模拟 (physical/analog modeling) 和计算机数值模拟 (numerical modelling)。物理模拟与数值模拟互为补充，各具优势。相较于物理模拟，数值模拟在参数控制方面更为精细，能够综合模拟热-化学-岩石学等多种效应，而物理模拟常受材料性质匹配与实验条件限制(Ueda et al., 2008; Schellart and Strak, 2016; Kiss et al., 2020; Reber et al., 2020); 数值模拟的结果也更容易量化与可视化，虽然计算效率随高性能计算发展显著提升，但在三维大尺度模拟的分辨率方面还存在一定局限(Yoshida and Santosh, 2011; Gerya, 2019)。反之，物理模拟基于自然物理定律构建，物理过程自洽性强，避免了数值方法中因方程设置、网格划分等人为因素导致的偏差(Gerya, 2019); 其天然三维特性适用于复杂结构与流变行为的研究，且模型直观、分辨率高，易于理解。两者在模拟真实性、复杂问题处理及表达方式上形成有效互补。目前，动力学模拟已被广泛应用于俯冲带研究的一系列核心过程，包括板块几何形

态对俯冲运动学的影响(Strak and Schellart, 2016)、海沟迁移规律(Funiciello et al., 2008)、地幔流响应(Stegman et al., 2006; Geffroy et al., 2023)、弧后扩张(Schellart et al., 2002)、板片断离(Fernández-García et al., 2019)以及俯冲带间相互作用(Király et al., 2021; Wang et al., 2026)等。

然而，目前针对班达俯冲带形成机制的动力学模拟研究非常匮乏。仅有的相关数值模拟重现了自约 24.3 Ma 以来印度-澳大利亚板块与东南亚板块从碰撞前至今的汇聚与俯冲过程，并成功再现了板片后撤及嵌入班达湾这一关键动力学行为（图 6）。然而，该研究主要关注俯冲过程中地幔流动对地表构造的响应机制，例如韦伯深渊的异常深度与俯冲板片局部质量异常的集聚相关，以及澳大利亚北部大陆架所经历的动态沉降等现象(Husson et al., 2022)。另一项物理模拟研究了被动大陆边缘几何形态对板块断离过程的影响，其中一组实验与班达俯冲带的条件具有一定程度的类比性，这为了解班达俯冲带深部可能发生的板片撕裂与断离过程提供了力学类比和过程启示（图 7）(Fernández-García et al., 2019)。综合而言，目前尚未有研究专门针对班达高曲率俯冲带的形成原因展开动力学模拟。

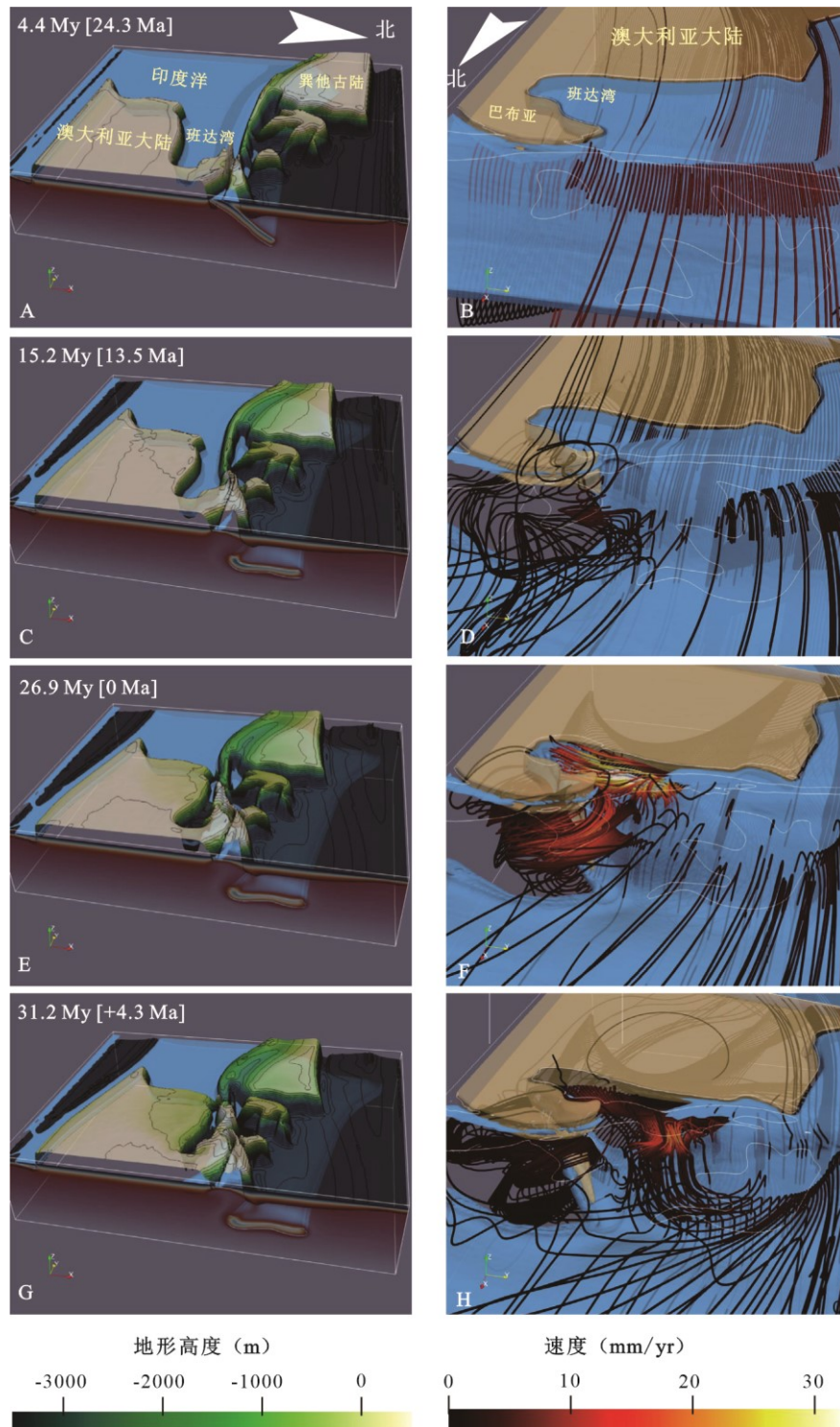


图 6 印度洋-澳大利亚板块俯冲的模拟结果

Fig.6 Simulation Results of the Indian Ocean-Australian Plate Subduction

a, c, e, g 为大陆地形与印度洋岩石圈（蓝色界面及其热结构）的西向视图（东侧视角）。b, d, f, h 为班达俯冲带特写，南向视图。其中印度洋岩石圈以蓝色界面表示，大陆单元中澳大利亚为棕色，流线表示地幔

流动方向。据(Husson et al., 2022)修改

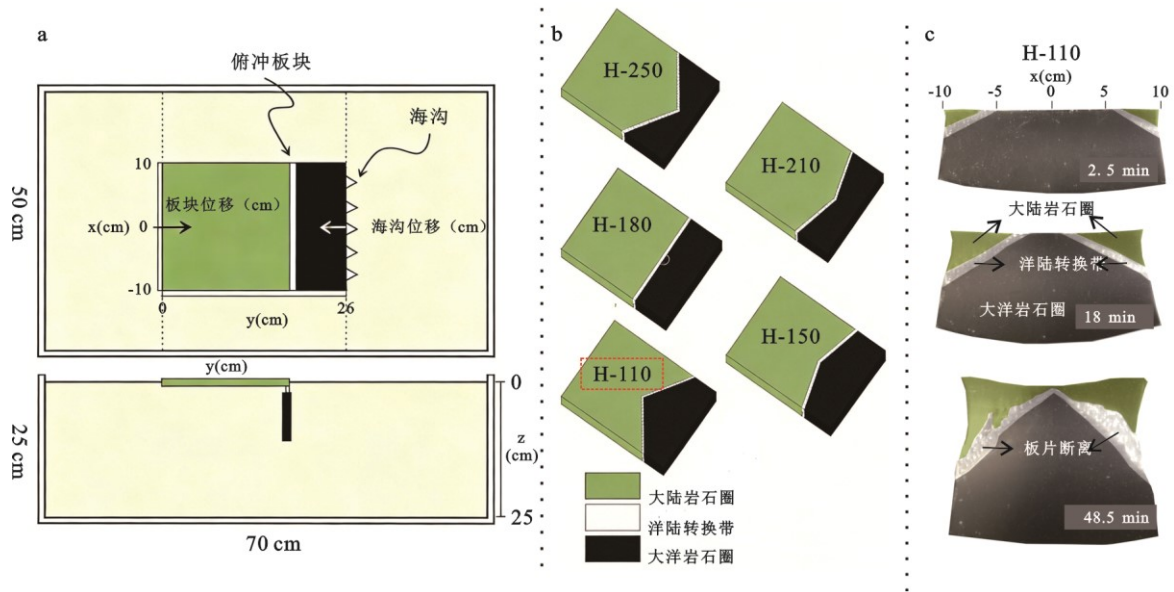


图 7 物理模拟模型的实验设计图及结果

Fig.7 Experimental Setup and Results of the Analogue Model

a 俯冲起始阶段的俯视图及洋陆过渡带 (OCT) 俯冲后的侧视图 ( $x=0$  cm 处)。虚线表示作为测量板块位移或海沟位移参考的坐标轴。b 实验中设置的大陆岩石圈的几何形态, 其中 H-110 和班达俯冲带情况类似。c H-110 在不同演化阶段的正面视图。各图中所示时间为洋陆过渡带 (OCT) 抵达海沟后的时间。第一行展示 OCT 及大陆岩石圈抵达海沟的情景。第二行对应模型中 OCT 逐渐抵达海沟的过程。第三行展示板片断裂的侧向传播过程。据(Fernández-García et al., 2019)修改

对于班达俯冲带这类具有高曲率和复杂相互作用特征的动力学系统, 其演化过程必须在三维空间中加以刻画。数值模拟虽广泛应用, 但在处理三维问题时仍面临计算难度高、资源消耗大等挑战。相比之下, 近年来物理模拟在定量化技术方面取得显著进展, 已能够更精细地控制实验参数并实现高精度数据采集(Bose et al., 2023; Wang et al., 2024; Xue et al., 2024)。因此, 物理模拟在还原此类独特构造体系的演化过程方面展现出明确潜力。现有研究已为此奠定基础, 例如通过分层材料模拟并借助外部驱动力, 研究了板块撕裂、地壳隆升与高压变质岩折返等过程(Chemenda et al., 1995, 1996, 2000; Shemenda, 1993; Regard et al.,

2003)。近年来发展的自由俯冲实验模型，更通过密度差实现自我驱动，贴近自然俯冲的动力学本质，已成功用于研究大陆俯冲深度、弧前变形及平板俯冲的地形效应(Bose et al., 2023; Xue et al., 2024)。

然而，既有实验通常采用规则的板块几何形态，而班达俯冲带的成因可能与其复杂且独特的大陆岩石圈形态密切相关(Spakman and Hall, 2010)。前人对于全球板块重建工作表明(如 Zhu et al., 2022)，现今班达俯冲带北侧和西侧鸟头 (Bird's head) 至新几内亚等诸多微陆块在三叠纪仍然是澳大利亚大陆的一部分，其后发生裂离，并发生顺时针旋转，自白垩纪以来一直保持东侧相接，西侧打开的不规则喇叭口形态。经过 90-45 Ma 期间的停滞，在 45 Ma 开始澳大利亚大陆开始向北运动，并最终在 20 Ma 左右与东南亚的印尼陆块发生碰撞(Ding et al., 2023)。现有实验中通常采用规则的大陆岩石圈形态进行模拟，这种简化难以全面反映澳大利亚陆块北侧不规则大陆岩石圈导致的复杂地质构造特征。

因此，尽管物理模拟在探索地壳动力学和板块交互方面具有显著优势，若要深入探讨班达俯冲带的成因，仍需进一步优化实验设计。具体而言，为精确再现班达俯冲带的地质环境及其演化过程，尤其是探究古班达海湾的形态对班达弧形俯冲带的控制作用，模型设计需充分贴合其实际构造特征，尤其是大陆形态的不规则性。因此，未来的实验应突破现有模型的几何简化局限，重点构建更符合真实情况的不规则大陆岩石圈边界，并精细设定材料的流变属性与层圈耦合关系。通过系统研究初始形态、侧向边界约束和深部地幔流动之间的协同作用，有望在实验室中定量重现高曲率弧形俯冲带的形成与演化全过程，从而为阐明班达俯冲带高曲率特征形成的影响因素及其动力学机制，尤其是揭示古班达海湾的形态对班达弧形俯冲带的控制作用，提供关键的物理实验证据。

## 4. 结论

班达俯冲带以其近  $180^\circ$  的全球最高曲率著称，其形成与演化涉及板块弯曲、板片回滚、地幔流重组及弧-陆碰撞等一系列复杂且相互耦合的动力学过程(Spakman and Hall, 2010)。单一的地球物理观测或地质重建方法难以完整揭示这些过程的相互作用与时空序列，而物理模拟实验通过缩尺类比与过程可视化，能够系统性地再现关键动力学环节，有效弥补了大规模高分辨率三维数值模拟在计算成本与局部变形刻画方面的局限，为理论模型和动力学解释提供了关键的实验约束与验证。

对班达俯冲带形成机制的深入研究，不仅可完整揭示该高曲率俯冲-碰撞系统的独特性与演化路径，更能为全球类似复杂弧形俯冲体系的动力学研究提供重要类比与理论参考。通过精细设计的物理模拟，能够定量探讨不规则大陆边缘形态、深部地幔粘度结构等因素对海沟迁移、板片形态演变及地表构造响应的控制作用，从而为理解板块汇聚边界的深部动力学过程提供不可替代的研究视角与实验途径。

## Reference

- Bebout, G. E., Scholl, D. W., Stern, R. J., et al., 2018. Twenty Years of Subduction Zone Science: Subduction Top to Bottom 2 (ST2B-2). *GSA Today*: 4-10. <http://doi.org/10.1130/GSATG354A.1>.
- Bose, S., Schellart, W. P., Strak, V., et al., 2023. Sunda subduction drives ongoing India-Asia convergence. *Tectonophysics*, 849: 229727. <http://doi.org/10.1016/j.tecto.2023.229727>.
- Bowin, C., Purdy, G. M., Johnston, C., et al., 1980. Arc-Continent Collision in Banda Sea Region1. *AAPG Bulletin*, 64(6): 868-915. <http://doi.org/10.1306/2F9193CD-16CE-11D7-8645000102C1865D>.
- Cardwell, R. K., Isacks, B. L., 1978. Geometry of the subducted lithosphere beneath the Banda Sea in eastern Indonesia from seismicity and fault plane solutions. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 83(B6): 2825-2838. <http://doi.org/10.1029/JB083iB06p02825>.
- Chemenda, A. I., Burg, J. P., Mattauer, M., 2000. Evolutionary model of the Himalaya-Tibet system: geopoembased on new modelling, geological and geophysical data. *Earth and Planetary Science Letters*, 174(3-4): 397-409. [http://doi.org/10.1016/S0012-821X\(99\)00277-0](http://doi.org/10.1016/S0012-821X(99)00277-0).
- Chemenda, A. I., Mattauer, M., Bokun, A. N., 1996. Continental subduction and a mechanism for exhumation of high-pressure metamorphic rocks: new modelling and field data from Oman. *Earth and Planetary Science Letters*, 143(1-4): 173-182. [http://doi.org/10.1016/0012-821X\(96\)00123-9](http://doi.org/10.1016/0012-821X(96)00123-9).
- Chemenda, A. I., Mattauer, M., Malavieille, J., et al., 1995. A mechanism for syn-collisional rock exhumation and associated normal faulting: Results from physical modelling. *Earth and Planetary Science Letters*, 132(1-4): 225-232. [http://doi.org/10.1016/0012-821X\(95\)00042-B](http://doi.org/10.1016/0012-821X(95)00042-B).
- Ding, W. W., Zhu, R. X., Wan, B., et al., 2023. Geodynamic processes of the southeastern Neo-Tethys Ocean and the formation mechanism of the curved subduction system in Southeast Asia. *Science China Earth Sciences*, 66(4): 703-717. <http://doi.org/10.1007/s11430-022-1071-4>.
- Fernández-García, C., Guillaume, B., Brun, J. P., 2019. 3D slab breakoff in laboratory experiments. *Tectonophysics*, 773: 228223. <http://doi.org/10.1016/j.tecto.2019.228223>.

- Fitch, T. J., Molnar, P., 1970. Focal mechanisms along inclined earthquake zones, in the Indonesia-Philippine region. *Journal of Geophysical Research*, 75(8): 1431-1444. <http://doi.org/10.1029/JB075i008p01431>.
- Funiciello, F., Faccenna, C., Heuret, A., et al., 2008. Trench migration, net rotation and slab–mantle coupling. *Earth and Planetary Science Letters*, 271(1-4): 233-240. <http://doi.org/10.1016/j.epsl.2008.04.006>.
- Geffroy, T., Guillaume, B., Simoes, M., et al., 2023. Role of Mantle Drag on the Tectonics of Subduction Zones: Insights From Laboratory Models. *Tectonics*, 42(12): e2023TC008018. <http://doi.org/10.1029/2023TC008018>.
- Gerya, T., 2019. Introduction to Numerical Geodynamic Modelling. 2nd ed. Cambridge University Press. <http://doi.org/10.1017/9781316534243>.
- Gerya, T. V., Stern, R. J., Baes, M., et al., 2015. Plate tectonics on the Earth triggered by plume-induced subduction initiation. *Nature*, 527(7577): 221-225. <http://doi.org/10.1038/nature15752>.
- Hall, R., 2012. Late Jurassic–Cenozoic reconstructions of the Indonesian region and the Indian Ocean. *Tectonophysics*, 570-571: 1-41. <http://doi.org/10.1016/j.tecto.2012.04.021>.
- Hall, R., 2017. Southeast Asia: New Views of the Geology of the Malay Archipelago. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 45(1): 331-358. <http://doi.org/10.1146/annurev-earth-063016-020633>.
- Hatherton, T., Dickinson, W. R., 1969. The relationship between andesitic volcanism and seismicity in Indonesia, the Lesser Antilles, and other island arcs. *Journal of Geophysical Research*, 74(22): 5301-5310. <http://doi.org/10.1029/JB074i022p05301>.
- Hinschberger, F., Malod, J. A., Réhault, J. P., et al., 2005. Late Cenozoic geodynamic evolution of eastern Indonesia. *Tectonophysics*, 404(1-2): 91-118. <http://doi.org/10.1016/j.tecto.2005.05.005>.
- Hsui, A. T., Youngquist, S., 1985. A dynamic model of the curvature of the Mariana Trench. *Nature*, 318(6045): 455-457. <http://doi.org/10.1038/318455a0>.
- Husson, L., Riel, N., Aribowo, S., et al., 2022. Slow Geodynamics and Fast Morphotectonics in the Far East Tethys. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 23(1): e2021GC010167. <http://doi.org/10.1029/2021GC010167>.
- Isacks, B., Oliver, J., Sykes, L. R., 1968. Seismology and the new global tectonics. *Journal of Geophysical Research (1896-1977)*, 73(18): 5855-5899. <http://doi.org/10.1029/JB07>

3i018p05855.

- Király, Á., Funicello, F., Capitanio, F. A., et al., 2021. Dynamic interactions between subduction zones. *Global and Planetary Change*, 202: 103501. <http://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2021.103501>.
- Kiss, D., Candiotti, L. G., Duretz, T., et al., 2020. Thermal softening induced subduction initiation at a passive margin. *Geophysical Journal International*, 220(3): 2068-2073. <http://doi.org/10.1093/gji/ggz572>.
- Korenaga, J., 2013. Initiation and Evolution of Plate Tectonics on Earth: Theories and Observations. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 41(1): 117-151. <http://doi.org/10.1146/annurev-earth-050212-124208>.
- Li, J. B., Ding, W. W., Lin, J., et al., 2021. Dynamic processes of the curved subduction system in Southeast Asia: A review and future perspective. *Earth-Science Reviews*, 217: 103647. <http://doi.org/10.1016/j.earscirev.2021.103647>.
- Li, S. J., Kong, F. S., Liu, K. H., et al., 2024. Layered Mantle Flow Field Associated With Plate Kinematics and Slab Modulation Underneath the Horseshoe-Shaped Banda Arc-Islands. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 129(3): e2023JB027694. <http://doi.org/10.1029/2023JB027694>.
- Martinod, J., Guillaume, B., Espurt, N., et al., 2013. Effect of aseismic ridge subduction on slab geometry and overriding plate deformation: Insights from analogue modeling. *Tectonophysics*, 588: 39-55. <http://doi.org/10.1016/j.tecto.2012.12.010>.
- McCaffrey, R., 1988. Active tectonics of the Eastern Sunda and Banda Arcs. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 93(B12): 15163-15182. <http://doi.org/10.1029/JB093iB12p15163>.
- McCaffrey, R., 1989. Seismological constraints and speculations on Banda arc tectonics. *Netherlands Journal of Sea Research*, 24(2-3): 141-152. [http://doi.org/10.1016/0077-7579\(89\)90145-2](http://doi.org/10.1016/0077-7579(89)90145-2).
- McCaffrey, R., Abers, G. A., 1991. Orogeny in arc-continent collision: The Banda arc and western New Guinea. *Geology*, 19(6): 563. [http://doi.org/10.1130/0091-7613\(1991\)019<0563:OIACT>2.3.CO;2](http://doi.org/10.1130/0091-7613(1991)019<0563:OIACT>2.3.CO;2).
- McKenzie, D. P., 1969. Speculations on the Consequences and Causes of Plate Motions. *Geophysical Journal International*, 18(1): 1-32. <http://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1969.tb00259.x>.

- Moresi, L., Betts, P. G., Miller, M. S., et al., 2014. Dynamics of continental accretion. *Nature*, 508(7495): 245-248. <http://doi.org/10.1038/nature13033>.
- Morra, G., Regenauer-Lieb, K., Giardini, D., 2006. Curvature of oceanic arcs. *Geology*, 34(10): 877. <http://doi.org/10.1130/G22462.1>.
- Ning, J. Y., 1996. Review on the subduction dynamics. *Progress in Geophysics*, 11(4): 1-19 (in Chinese with English abstract)
- O'Neill, C., Jellinek, A. M., Lenardic, A., 2007. Conditions for the onset of plate tectonics on terrestrial planets and moons. *Earth and Planetary Science Letters*, 261(1-2): 20-32. <http://doi.org/10.1016/j.epsl.2007.05.038>.
- Patria, A., 2017. The Origin and Significance of The Seram Trough, Indonesia//Proc. Indon. Petrol. Assoc., 41st Ann. Conv., 2017. Indonesian Petroleum Association (IPA). <http://doi.org/10.29118/IPA.50.17-19-G>.
- Pownall, J. M., 2015. UHT metamorphism on Seram, eastern Indonesia: reaction microstructures and  $P$ - $T$  evolution of spinel-bearing garnet-sillimanite granulites from the Kobipoto Complex. *Journal of Metamorphic Geology*, 33(9): 909-935. <http://doi.org/10.1111/jmg.12153>.
- Pownall, J. M., Hall, R., Armstrong, R. A., et al., 2014. Earth's youngest known ultrahigh-temperature granulites discovered on Seram, eastern Indonesia. *Geology*, 42(4): 279-282. <http://doi.org/10.1130/G35230.1>.
- Pownall, J. M., Hall, R., Lister, G. S., 2016. Rolling open Earth's deepest forearc basin. *Geology*, 44(11): 947-950. <http://doi.org/10.1130/G38051.1>.
- Pownall, J. M., Hall, R., Watkinson, I. M., 2013. Extreme extension across Seram and Ambon, eastern Indonesia: evidence for Banda slab rollback. *Solid Earth*, 4(2): 277-314. <http://doi.org/10.5194/se-4-277-2013>.
- Reber, J. E., Cooke, M. L., Dooley, T. P., 2020. What model material to use? A Review on rock analogs for structural geology and tectonics. *Earth-Science Reviews*, 202: 103-107. <http://doi.org/10.1016/j.earscirev.2020.103107>.
- Regard, V., Faccenna, C., Martinod, J., et al., 2003. From subduction to collision: Control of deep processes on the evolution of convergent plate boundary. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 108(B4): 2002JB001943. <http://doi.org/10.1029/2002JB001943>.
- Schellart, W. P., 2010. Evolution of Subduction Zone Curvature and its Dependence on the

- Trench Velocity and the Slab to Upper Mantle Viscosity Ratio. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 115(B11): 2009JB006643. <http://doi.org/10.1029/2009JB006643>.
- Schellart, W. P., Freeman, J., Stegman, D. R., et al., 2007. Evolution and diversity of subduction zones controlled by slab width. *Nature*, 446(7133): 308-311. <http://doi.org/10.1038/nature05615>.
- Schellart, W. P., Lister, G. S., Jessell, M. W., 2002. Analogue modeling of arc and backarc deformation in the New Hebrides arc and North Fiji Basin. *Geology*, 30(4): 311-314. [http://doi.org/10.1130/0091-7613\(2002\)030<0311:AMOAAB>2.0.CO;2](http://doi.org/10.1130/0091-7613(2002)030<0311:AMOAAB>2.0.CO;2).
- Schellart, W. P., Rawlinson, N., 2013. Global correlations between maximum magnitudes of subduction zone interface thrust earthquakes and physical parameters of subduction zones. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 225: 41-67. <http://doi.org/10.1016/j.pepi.2013.10.001>.
- Schellart, W. P., Strak, V., 2016. A review of analogue modelling of geodynamic processes: Approaches, scaling, materials and quantification, with an application to subduction experiments. *Journal of Geodynamics*, 100: 7-32. <http://doi.org/10.1016/j.jog.2016.03.009>.
- Shemenda, A. I., 1993. Subduction of the lithosphere and back arc dynamics: Insights from physical modeling. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 98(B9): 16167-16185. <http://doi.org/10.1029/93JB01094>.
- Spakman, W., Hall, R., 2010. Surface deformation and slab–mantle interaction during Banda arc subduction rollback. *Nature Geoscience*, 3(8): 562-566. <http://doi.org/10.1038/ngeo917>.
- Stegman, D. R., Freeman, J., Schellart, W. P., et al., 2006. Influence of trench width on subduction hinge retreat rates in 3-D models of slab rollback. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 7(3): 2005GC001056. <http://doi.org/10.1029/2005GC001056>.
- Stern, R. J., 2002. Subduction zones. *Reviews of Geophysics*, 40(4)[2026-02-02]. <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2001RG000108><http://doi.org/10.1029/2001RG000108>.
- Strak, V., Schellart, W. P., 2016. Control of slab width on subduction-induced upper mantle flow and associated upwellings: Insights from analog models. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 121(6): 4641-4654. <http://doi.org/10.1002/2015JB012545>.

- Su, Y., Li, S. N., Chen, R. X., et al., 2025. Deep Carbon Cycle during Tectonic Evolution from Oceanic Subduction through Continental Collision to Post-Collisional Reworking at Convergent Plate Margins. *Earth Science*, 50(8): 3085-3116 (in Chinese with English abstract)
- Tetreault, J. L., Buitter, S. J. H., 2014. Future accreted terranes: a compilation of island arcs, oceanic plateaus, submarine ridges, seamounts, and continental fragments. *Solid Earth*, 5(2): 1243-1275. <http://doi.org/10.5194/se-5-1243-2014>.
- Tong, Z. Y., Ding, W. W., Wang, C. Y., et al., 2024. Analogue modelling of subduction initiation: a review and perspectives. *International Geology Review*, 66(11): 2123-2165. <http://doi.org/10.1080/00206814.2023.2272273>.
- Ueda, K., Gerya, T., Sobolev, S. V., 2008. Subduction initiation by thermal–chemical plume: Numerical studies. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 171(1-4): 296-312. <http://doi.org/10.1016/j.pepi.2008.06.032>.
- Van Zelst, I., Cramer, F., Pusok, A. E., et al., 2022. 101 geodynamic modelling: how to design, interpret, and communicate numerical studies of the solid Earth. *Solid Earth*, 13(3): 583-637. <http://doi.org/10.5194/se-13-583-2022>.
- Wang, C. Y., Ding, W. W., Schellart, W. P., et al., 2024. Effects of Along-Trench Asymmetric Subduction Initiation on Plate Rotation and Trench Migration: A Laboratory Modeling Perspective. *Tectonics*, 43(1): e2023TC007941. <http://doi.org/10.1029/2023TC007941>.
- Wang, C. Y., Ding, W. W., Schellart, W. P., et al., 2026. A new subduction initiation mechanism induced by lateral subduction propagation. *Earth and Planetary Science Letters*, 675: 119768. <http://doi.org/10.1016/j.epsl.2025.119768>.
- Widiyantoro, S., Hilst, R., 1997. Mantle structure beneath Indonesia inferred from high-resolution tomographic imaging. *Geophysical Journal International*, 130(1): 167-182. <http://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1997.tb00996.x>.
- Wu, J., Suppe, J., Lu, R., et al., 2016. Philippine Sea and East Asian plate tectonics since 52 Ma constrained by new subducted slab reconstruction methods. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 121(6): 4670-4741. <http://doi.org/10.1002/2016JB012923>.
- Xie, F., Wang, Z. W., Zhao, D. P., et al., 2024. Tilting-Axis Anisotropic Tomography and Subduction Dynamics of the Java-Banda Arc. *Geophysical Research Letters*, 51(5): e2023GL107720. <http://doi.org/10.1029/2023GL107720>.

- Xu, Y. G., Huang, X. H., Wang, Q., et al., 2024. Earth's habitability driven by deep processes. *Chinese Science Bulletin*, 69 (2): 169-183 (in Chinese with English abstract)
- Xue, K., Schellart, W. P., Strak, V., 2024. Geodynamic models of Indian continental flat slab subduction with implications for the topography of the Himalaya-Tibet region. *Scientific Reports*, 14(1): 2365. <http://doi.org/10.1038/s41598-024-52709-w>.
- Yang, X. D., Luan, X. W., Zhu, L. Y., et al., 2026. Active faulting and crustal deformation along the East Sunda-Banda Arc: Implications for Regional Geohazards. *Global and Planetary Change*, 259: 105326. <http://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2026.105326>.
- Yang, X. D., Singh, S. C., Deighton, I., 2021. The Margin-Oblique Kumawa Strike-Slip Fault in the Banda Forearc, East Indonesia: Structural Deformation, Tectonic Origin and Geohazard Implication. *Tectonics*, 40(4): e2020TC006567. <http://doi.org/10.1029/2020TC006567>.
- Yoshida, M., Santosh, M., 2011. Supercontinents, mantle dynamics and plate tectonics: A perspective based on conceptual vs. numerical models. *Earth-Science Reviews*, 105(1-2): 1-24. <http://doi.org/10.1016/j.earscirev.2010.12.002>.
- Zhang, Z. W., Yang, X. D., Mooney, W. D., et al., 2024. An Integrated Study of Age and Formation of the Aru Trough, Eastern Banda Arc, Indonesia: Implications for Seismic Hazards. *Tectonics*, 43(9): e2024TC008449. <http://doi.org/10.1029/2024TC008449>.
- Zheng, Y. F., Zhao, Z. F., 2017. Introduction to the structures and processes of subduction zones. *Journal of Asian Earth Sciences*, 145: 1-15. <http://doi.org/10.1016/j.jseaes.2017.06.034>.
- Zhu, R. X., Zhao, P., Zhao, L., 2022. Tectonic evolution and geodynamics of the Neo-Tethys Ocean. *Science China Earth Sciences*, 65(1): 1-24. <http://doi.org/10.1007/s11430-021-9845-7>.

#### 附中文参考文献

- 宁杰远, 1996. 俯冲动力学研究综述. *地球物理学进展*, 11(4): 1-19.
- 苏懿, 李姝宁, 陈仁旭, 等, 2025. 汇聚板块边缘从大洋俯冲经大陆碰撞到碰撞后再造过程中的碳循环. *地球科学*, 50(8): 3085-3116.
- 徐义刚, 黄小龙, 王强, 等, 2024. 地球宜居性的深部驱动机制. *科学通报*, 69(2): 169-183.