



板块俯冲起始的蛇绿岩记录

熊庆*

中国地质大学(武汉)地质过程与成矿预测全国重点实验室, 武汉 430074

* 通讯作者, E-mail: xiongqing@cug.edu.cn

收稿日期: 2025-05-03; 收修改稿日期: 2025-06-02; 接受日期: 2025-06-09; 网络版发表日期: 2025-06-18

国家自然科学基金项目(42322303)和国家重点研发计划课题(2023YFF0804404)资助

1 引言

板块构造运动是宜居地球保持活力的重要过程, 其中俯冲作用作为板块构造运动的主要驱动方式, 诱发了地球不同圈层之间的物质循环和能量传输, 产生了一系列的地质、资源和环境效应(Plank和Manning, 2019; 郑永飞, 2023; Sun, 2024). 在板块俯冲的全过程中, 最为重要但了解最少的是如何启动板块的俯冲, 以及如何从短暂的俯冲起始体制转换为长期且能够自我维系的成熟俯冲过程(Stern, 2004; 冷伟和黄惊知, 2018; Stern和Gerya, 2018; Crameri等, 2020; Lallemand和Arcay, 2021; 郑永飞等, 2022; 李忠海等, 2023; Li, 2024).

针对上述问题, 前人开展了大量的天然观测、数值模拟以及物理实验模拟等研究, 对板块俯冲起始的方式、条件、动力来源和机制过程等进行了系统探索, 提出了复杂多样的模型(见Stern和Gerya, 2018). 不同学者将这些类型繁多的模型归纳为两种端元, 衍生出自发型和诱发型(Stern, 2004)、垂向驱动型和横向驱动型(Crameri等, 2020), 以及热起始型和冷起始型(Li, 2024)的划分, 分别侧重于俯冲起始的动力来源、主要动力的方向以及俯冲起始体制中的温度场特征. 然而, 如何通过天然观测结果来验证这些模型? 哪些天然观测结果能够被用以构建普适性指标, 来揭示俯

冲起始的机制和过程? 仍是值得深入思考的重要科学问题. 为此, 本文首先介绍俯冲起始研究领域的关键进展与主要难点, 再聚焦如何利用蛇绿岩来揭示俯冲起始的机制与过程, 最后提出对未来相关研究的思考与展望.

2 板块俯冲起始的研究进展与难点

通过近半个世纪的研究, 学者们提出了众多的板块俯冲起始模型(Stern和Gerya, 2018), 争议的焦点主要是俯冲起始的动力来源究竟是板块本身还是外力, 外力又可来自板块重组运动、软流圈地幔流动的拖曳、上覆沉积物质的过载、地幔柱-岩石圈相互作用, 甚至陨石撞击等; 其他的物理化学条件和影响因素, 比如: 板块的年龄、热状态、板块之间或内部有无薄弱带及其带内流体活动情况等, 同样会不同程度地影响板块俯冲起始(Stern和Gerya, 2018; Crameri等, 2020; van Hinsbergen等, 2021; 郑永飞等, 2022; Li, 2024; 李春峰等, 2025). 当然, 面对众多争议, 学者们也达成了一些重要共识, 比如: (1) 俯冲起始大多需要存在板块薄弱带(Stern和Gerya, 2018); (2) 相比成熟俯冲过程, 俯冲起始的时限是短暂的(Reagan等, 2019); (3) 俯冲起始的构造体制通常是从最初的挤压迅速转变为弧前伸展, 但并非所有的俯冲起始事件都能够发育到弧前

中文引用格式: 熊庆. 2025. 板块俯冲起始的蛇绿岩记录. 中国科学: 地球科学, 55(7): 2500–2505, doi: [10.1360/SSTe-2025-0124](https://doi.org/10.1360/SSTe-2025-0124)

英文引用格式: Xiong Q. 2025. Ophiolitic records of plate subduction initiation. Science China Earth Sciences, 68(7): 2404–2409, <https://doi.org/10.1007/s11430-025-1611-x>

伸展阶段(Whattam和Stern, 2011; Guilmette等, 2018; Agard等, 2020; Li, 2024).

当前, 能够验证上述模型的途径主要有两种, 一是对现今处于大洋俯冲初期的沟-弧-盆体系开展原位取样研究, 二是对地质历史时期“登陆”的蛇绿岩开展精细剖析(Whattam和Stern, 2011; Ishizuka等, 2014; Stern和Gerya, 2018; Agard等, 2020; 郑永飞等, 2022). 针对第一种途径, 国内外学者对西太平洋俯冲体系开展了一系列深海钻探工作, 提出了“Izu-Bonin-Mariana”(IBM)型大洋板块俯冲起始的岩浆动力演化模型, 并将其标定为“自发型”俯冲起始的典型范式(Reagan等, 2010, 2019; Arculus等, 2015; Li等, 2019; Li等, 2021). 针对第二种途径, 前人对全球不同时代、不同地区的蛇绿岩开展了对比研究, 特别是与西太平洋弧前地壳进行对比, 提出大多数俯冲型蛇绿岩似乎能够不同程度地保留俯冲起始的地质和地球化学记录, 并衍生出蛇绿岩“俯冲起始准则”的概念(Whattam和Stern, 2011; Ishizuka等, 2014; Xiong等, 2016; Guilmette等, 2018; Agard等, 2020; Zhang等, 2024).

然而, 这两种途径也存在不同的研究难点. 前者面临的重大挑战是取样难度大、成本高, 不仅难以涵盖所有类型的俯冲起始对象(比如复杂多样的诱发起始类型), 而且难以获取俯冲盘和上盘深部地幔的样品, 无法直接约束参与俯冲起始的两个板块交汇界面所记录的机制和过程. 后者面临的主要问题是不同时空背景下产出的蛇绿岩是否被完整保存, 并且其不同单元的成因关系和构造属性通常难以界定(Yang等, 2021). 值得注意的是, 利用构造属性明确且结构单元完整的蛇绿岩研究俯冲起始, 优势相当明显, 能够在低成本前提下同时获取俯冲盘(以变质底板为代表)和上盘岩石圈壳-幔单元的系统样品(例如欧亚大陆最南缘的雅江带蛇绿岩和阿曼蛇绿岩), 为探索板块俯冲起始提供了关键对象(Xiong等, 2016; Guilmette等, 2018; 郑建平等, 2019; Agard等, 2020; Zhou和Wada, 2021; Liu等, 2022; 郑永飞等, 2022).

3 蛇绿岩中岩浆作用与地幔增生对俯冲起始的指示

随着对西太平洋俯冲系统研究的深入, 特别是在深海钻探和原位取样工作的推动下, 学界对西太平洋

IBM俯冲带最近一次发生的俯冲起始过程有了全方位的认识(Reagan等, 2010; Arculus等, 2015; Li等, 2021), 提出利用大洋地壳属性的演变作为示踪俯冲起始的重要标志(图1), 具体表现如下: (1) 俯冲起始刚开始时, 板片尚未深入地幔(在<60km的弧前深度), 没有释放大流量流体, 仅小规模扰动软流圈地幔, 使其发生小尺度上涌和减压熔融, 产生类似洋中脊玄武岩的弧前玄武岩(FAB), 对应的熔融残余体是相对饱满的二辉橄榄岩地幔(Ishizuka等, 2014; Xiong等, 2016; Zhang等, 2024). 值得注意的是, 另外一种观点认为最早期的板片下沉不能显著扰动岩石圈地幔楔下方的软流圈, 进而无法产生软流圈上涌和减压熔融. 其原因是弧前地幔具有俯冲带中最冷的热结构(郑永飞等, 2022), 抑制了弧前深度地幔的熔融和弧前玄武岩的产生. 这种类似MORB的岩浆岩则可能起源于先前洋中脊阶段软流圈地幔减压熔融的产物. (2) 随着俯冲起始的持续, 俯冲板片深入地幔(一直到达80~160km的弧下深度), 释放大流量流体, 交代软流圈地幔楔, 导致在板片回撤控制下更易发生软流圈的强烈上涌和加水高度熔融, 这一系列过程能够产生玻安岩以及对应的熔融残余体(相对难熔的方辉橄榄岩地幔), 并伴随熔体抽取和熔岩反应形成局部纯橄岩地幔. 这种地幔楔熔融的变化, 实际上响应了俯冲起始构造体制从最早的挤压迅速转变为随后的持续伸展, 这种转变终止于大量玻安质岩浆的产生, 而且转变时限通常在10Myr之内(Ishizuka等, 2014; Xiong等, 2016; Stern和Gerya, 2018; Zhang等, 2024).

根据这些观察和推测, 大量学者重新将蛇绿岩中共存的拉斑质基性岩和玻安质岩石分别等同于IBM弧前地壳中发现的弧前玄武岩和玻安岩, 并将此作为蛇绿岩记录俯冲起始的标志性证据(Whattam和Stern, 2011; Ishizuka等, 2014; Lehmann等, 2025). 然而, 一些学者认为弧前玄武岩实际上是最早产生于洋中脊的洋底扩张阶段, 随后被构造置位到活动板块边缘(郑永飞等, 2022). 从证据链条的完整性上来看, 证实俯冲起始的存在至少需要同时查明与弧前玄武岩(或洋中脊玄武岩)和玻安岩分别对应的残余地幔(图1), 从时间、空间和成因联系上构建地幔熔融产生的熔体与残余体的内在关联. 类似的系统性研究还较少, 主要原因在于: (1) 记录俯冲起始的蛇绿岩, 其内部的多期次地幔和地壳单元保存完好的情况较为少见, 同时它们的空间关

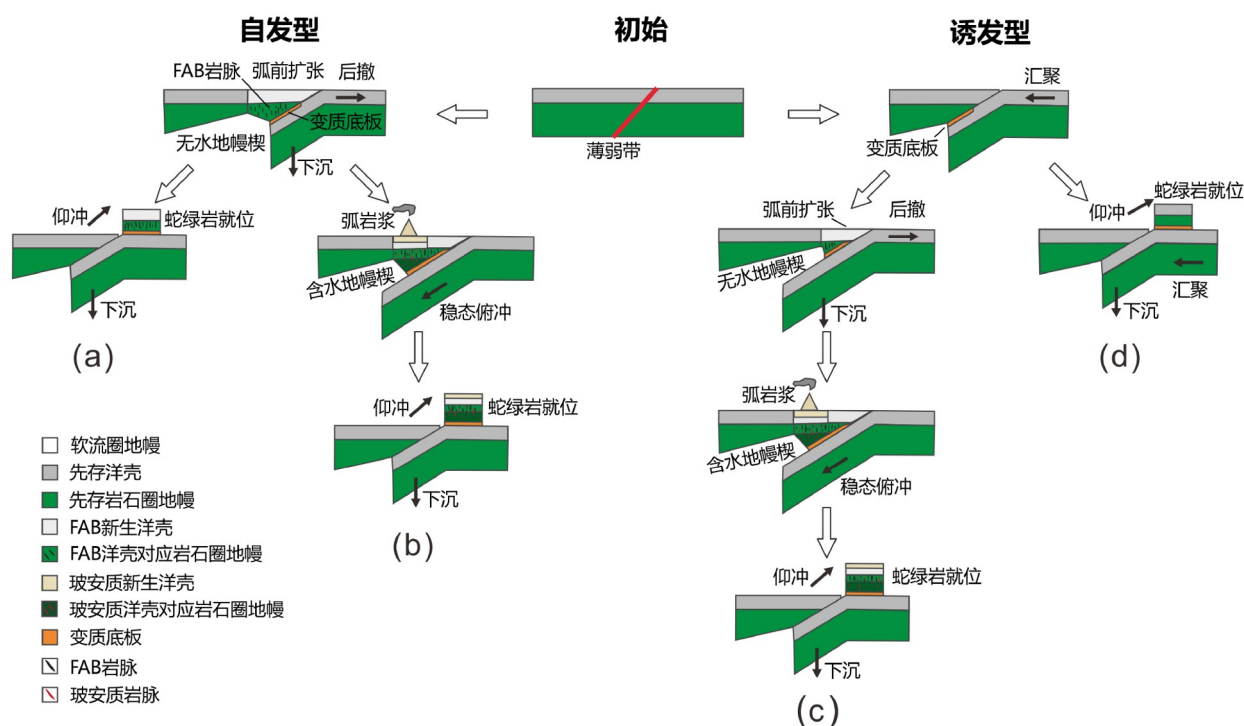


图1 板块俯冲起始的两种端元类型以及蛇绿岩记录的四种俯冲起始方式

修改自Xiong等(2016)、Stern和Gerya(2018)以及Guilmette等(2018)

系较难梳理清楚(Yang等, 2021), 即可能找不到; (2) 地幔岩石难以准确定年, 适合定年的样品和方法均较为苛刻(Xiong等, 2016), 即可能定不准; (3) 熔体与残余地幔分离之后, 在向上迁移过程中会与途经的地幔和地壳发生相互作用和成分分异(Xiong等, 2022), 进一步弱化熔融残余体与熔体的成因联系, 即可能分不清。

值得注意的是, 不少学者尝试从蛇绿岩地幔角度上探寻俯冲起始的记录。Miki等(2025)对阿曼蛇绿岩西北部的Fizh地块开展了详细地幔属性研究, 发现伴随俯冲起始最早期的地幔无水熔融和后来叠加的含水熔融记录, 分别与壳层早期MORB质岩浆和晚期玻安质岩浆相对应, 并识别出底部地幔记录的蛇纹石化和交代作用, 暗示俯冲起始期板片释放流体的影响。然而, 该研究尚未提供绝对时间的对等约束。Zhang等(2024)从蛇绿岩地幔中不同属性熔体与地幔相互作用产物的角度, 论证了俯冲起始不同阶段的地幔熔融动力学过程, 但对熔体-残余体以及熔体-反应体之间的关系仍缺少精确时空约束。

Xiong等(2016)对西藏最南缘的雅江带泽当蛇绿

岩尝试开展了熔融残余体与熔体之间的时空成因联系工作, 发现了上部接近地壳的方辉橄榄岩和下部二辉橄榄岩的双层地幔结构, 同时发现侵入上层地幔的辉绿岩脉体具有弧前玄武岩(类似洋中脊玄武岩)性质、结晶年龄为130~128Ma、Nd-Hf同位素显示亏损软流圈地幔起源, 下部的二辉橄榄岩地幔具有与辉绿岩脉体相匹配的饱满属性、Nd-Hf等时线年龄和同位素特征, 暗示上部基性脉体与下部饱满地幔构成了俯冲起始时期弧前玄武岩和地幔熔融残余体的成因关系。尽管该研究尚未识别出随后的玻安质岩浆和对应的地幔残余体, 但约束了上部方辉橄榄岩地幔可能与上一俯冲旋回(侏罗纪)的成熟俯冲过程有关, 表明蛇绿岩能够记录地幔多旋回增生过程。

实际上, 不少蛇绿岩在仰冲就位于大陆边缘之前, 无法发育到俯冲起始的弧前伸展阶段, 难以形成新生的弧前岩石圈(壳+幔), 比如西藏雅江带的日喀则蛇绿岩(Zhang等, 2019); 尽管一些俯冲型蛇绿岩能够发育到俯冲起始的弧前伸展阶段, 却难以保存俯冲起始最早期形成的减压熔融残余体和熔体, 大多数情况是保

留了稍后的玻安质岩浆活动痕迹, 比如西藏班怒带东部的怒江峡谷蛇绿岩, 系统性地保留了与玻安质岩浆平衡的壳层堆晶岩, 暗示早侏罗世拉萨地块被动陆缘被拉开后发生的俯冲起始事件(钱青等, 2025). 可见, 从蛇绿岩记录的岩浆作用和地幔增生过程两个视角同时约束其形成时代、空间关系和成因联系, 对系统揭示俯冲起始过程和机制具有重要意义.

4 蛇绿岩变质底板对俯冲起始的记录

蛇绿岩记录板块俯冲起始的另一个重要对象是变质底板(Metamorphic sole), 这是一套以团块或透镜条带状混杂于蛇绿岩体底部蛇纹岩或变沉积岩内部的角闪岩-石榴石角闪岩组合, 其原岩通常为俯冲盘的基性洋壳, 变质程度多达到高角闪岩相或麻粒岩相, 与典型的俯冲带洋壳的基性变质岩蓝片岩-榴辉岩不同, 变质底板中记录了俯冲起始期显著高的变质峰期温度和温压比特征(图2a; Guilmette等, 2018; Zhang等, 2019; Agard等, 2020). 数值模拟也重现了上述观察, 发现当自发起始类型以及诱发起始类型中存在十分年轻(<5Myr)的上盘板块时, 更容易形成具有高温低压特征的变质底板(Zhou和Wada, 2021; Zhong和Li, 2022).

此外, 与变质底板紧密接触的蛇绿岩底部地幔, 也是研究板块俯冲起始期间流体-熔体-地幔发生物理化学相互作用的关键对象, 它们共同构成了俯冲起始两

个板块交汇界面的一个缩影, 能够为探索大洋俯冲带的启动发育机制、壳幔物质循环规律以及岩浆-流体-变质-变形过程等提供关键约束(Agard等, 2020).

通过准确测定和对比变质底板峰期变质年龄和蛇绿岩形成年龄(包括岩石圈形成年龄和多期岩浆作用年龄), 可以有效区分板块俯冲起始的过程与机制(图1a~1d). (1) 当发生自发起始时, 变质底板的峰期变质年龄几乎等同于蛇绿岩(新生弧前岩石圈)的年龄, 且二者均小于变质底板的原岩年龄(图1a、1b、2b), 例如菲律宾的Palawan蛇绿岩(Keenan等, 2016); (2) 当发生诱发起始且产生新生弧前岩石圈时, 变质底板峰期变质年龄要老于蛇绿岩的年龄(图1c、2b), 例如阿曼蛇绿岩(Guilmette等, 2018; Soret等, 2022); (3) 当发生诱发起始但不产生新生弧前岩石圈时, 变质底板峰期变质年龄要小于蛇绿岩记录的上盘岩石圈最初形成时代, 但可能等同于蛇绿岩内部发育的基性岩脉或部分新增生洋壳的年龄, 这种情况在全球蛇绿岩中最为普遍(图1d、2b), 显示出蛇绿岩岩石圈形成过程的多期性和壳幔解耦特征, 例如西藏雅江带蛇绿岩(Xiong等, 2016; Zhang等, 2019; Yang等, 2021; Liu等, 2022).

5 结语

板块俯冲起始机制和过程是研究地球板块构造运动的首要问题. 越来越多学者意识到板块俯冲起始多

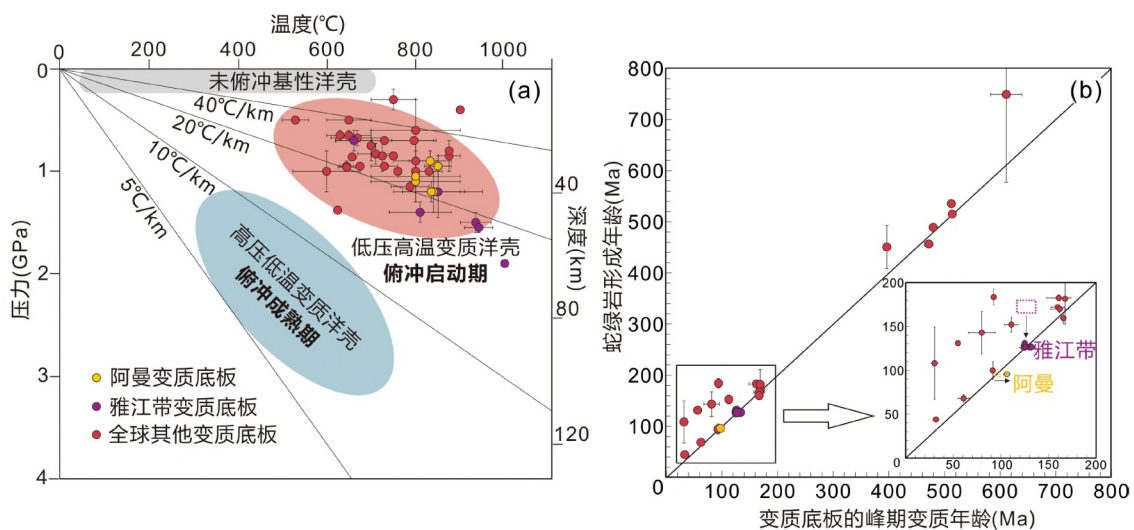


图2 全球蛇绿岩变质底板的温压条件(a)以及变质底板峰期变质年龄与蛇绿岩形成年龄对比(b)

数据来自笔者统计以及Zhou和Wada(2021)

与区域性甚至全球性重大地质事件和板块重组过程有关。比如西太平洋IBM俯冲带在52~50Ma的俯冲起始可能与太平洋板块的旋转运动以及印-亚碰撞有关(Sun等, 2020); 阿拉伯到巴基斯坦一带的新特提斯蛇绿岩记录的一系列105~90Ma俯冲起始事件, 可能是当时印度-马达加斯加-非洲大陆之间地幔柱活动导致板块旋转所诱发的结果(van Hinsbergen等, 2021); 西藏雅江带蛇绿岩记录的130~120Ma俯冲起始事件可能与东冈瓦纳大陆初始裂解以及同期全球板块重组有关(Xiong等, 2016), 值得注意的是同时期也是古太平洋俯冲诱发东亚大规模构造岩浆活动和板-幔相互作用的峰期, 雅江带的俯冲起始事件与同时期东亚的层圈相互作用有无关联, 仍值得深入研究。

本文概括的观察表明, 未来的研究更加需要通过大尺度、多学科的证据来系统揭示板块俯冲起始的复杂机制和过程。此外, 未来还需要对保存完整且新鲜的蛇绿岩开展深入研究, 准确揭示其壳幔单元结构与属性, 获取记录俯冲起始的时空关联证据, 剖析与变质底板紧密共生的蛇绿岩深部地幔过程, 系统研究蛇绿岩记录的板块俯冲起始时空演化过程与机制, 进一步揭示大洋俯冲带发育初期的圈层相互作用和物质循环规律。

致谢 感谢郑建平编委约稿。两位匿名审稿人和主编提出了宝贵修改建议, 李镒聪和薛龙飞协助制作本文图件, 在此一并致谢。

参考文献

- 冷伟, 黄惊知. 2018. 使用数值模型研究俯冲板块动力学的进展. 中国科学: 地球科学, 48: 1655–1669
- 李忠海, 崔峰源, 杨舒婷, 钟辛易. 2023. 特提斯演化的关键动力学过程与驱动力. 中国科学: 地球科学, 53: 2701–2722
- 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
- 钱青, 孙宝璐, 董飞羽. 2025. 藏东怒江峡谷蛇绿岩: 早侏罗世拉萨地块被动陆缘俯冲起始的记录? 中国科学: 地球科学, 55: 747–769
- 郑建平, 熊庆, 赵伊, 李文博. 2019. 俯冲带橄榄岩及其记录的壳幔相互作用. 中国科学: 地球科学, 49: 1037–1058
- 郑永飞. 2023. 21世纪板块构造. 中国科学: 地球科学, 53: 1–40
- 郑永飞, 陈伊翔, 陈仁旭, 戴立群. 2022. 汇聚板块边缘构造演化及其地质效应. 中国科学: 地球科学, 52: 1213–1242

- Agard P, Prigent C, Soret M, Dubacq B, Guillot S, Deldicque D. 2020. Slabification: Mechanisms controlling subduction development and viscous coupling. *Earth-Sci Rev*, 208: 103259
- Arculus R J, Ishizuka O, Bogus K A, Gurnis M, Hickey-Vargas R, Aljahdali M H, Bandini-Maeder A N, Barth A P, Brandl P A, Drab L, do Monte Guerra R, Hamada M, Jiang F, Kanayama K, Kender S, Kusano Y, Li H, Loudin L C, Maffione M, Marsaglia K M, McCarthy A, Meffre S, Morris A, Neuhaus M, Savov I P, Sena C, Tepley III F J, van der Land C, Yogodzinski G M, Zhang Z. 2015. A record of spontaneous subduction initiation in the Izu-Bonin-Mariana arc. *Nat Geosci*, 8: 728–733
- Crameri F, Magni V, Domeier M, Shephard G E, Chotalia K, Cooper G, Eakin C M, Grima A G, Gürer D, Király Á, Mulyukova E, Peters K, Robert B, Thielmann M. 2020. A transdisciplinary and community-driven database to unravel subduction zone initiation. *Nat Commun*, 11: 3750
- Guilmette C, Smit M A, van Hinsbergen D J J, Gürer D, Corfu F, Charette B, Maffione M, Rabeau O, Savard D. 2018. Forced subduction initiation recorded in the sole and crust of the Semail Ophiolite of Oman. *Nat Geosci*, 11: 688–695
- Ishizuka O, Tani K, Reagan M K. 2014. Izu-Bonin-Mariana forearc crust as a modern ophiolite analogue. *Elements*, 10: 115–120
- Keenan T E, Encarnación J, Buchwaldt R, Fernandez D, Mattinson J, Rasoazanamparany C, Luetkemeyer P B. 2016. Rapid conversion of an oceanic spreading center to a subduction zone inferred from high-precision geochronology. *Proc Natl Acad Sci USA*, 113: E7359
- Lallemant S, Arcay D. 2021. Subduction initiation from the earliest stages to self-sustained subduction: Insights from the analysis of 70 Cenozoic sites. *Earth-Sci Rev*, 221: 103779
- Lehmann W, Regelous M, Haase K, Keith M, Woelki D. 2025. Geochemistry of the sheeted dyke complex, Troodos Ophiolite (Cyprus): Evidence for the magmatic evolution during subduction initiation. *Chem Geol*, 681: 122743
- Li H Y, Taylor R N, Prytulak J, Kirchenbaur M, Shervais J W, Ryan J G, Godard M, Reagan M K, Pearce J A. 2019. Radiogenic isotopes document the start of subduction in the Western Pacific. *Earth Planet Sci Lett*, 518: 197–210
- 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
- Li Z H. 2024. Hot versus cold subduction initiation. *Natl Sci Rev*, 11: nwae012
- Liu C Z, Wu F Y, Liu T, Zhang C, Zhang W Q, Zhang Z Y, Zhang Z, Wei W, Lin Y Z. 2022. An origin of ultraslow spreading ridges for

- the Yarlung-Tsangpo ophiolites. *Fundamental Res*, 2: 74–83
- Miki Y, Takazawa E, Ueki K, Kuwatani T. 2025. Variable upper mantle geochemical processes constrained from independent component analysis of the Fizz Massif, Northern Oman Ophiolite. *Geochem Geophys Geosyst*, 26: e2024GC012134
- Plank T, Manning C E. 2019. Subducting carbon. *Nature*, 574: 343–352
- Reagan M K, Ishizuka O, Stern R J, Kelley K A, Ohara Y, Blichert-Toft J, Bloomer S H, Cash J, Fryer P, Hanan B B, Hickey-Vagas R, Ishii T, Kimura J I, Peate D W, Rowe M C, Woods M. 2010. Fore-arc basalts and subduction initiation in the Izu-Bonin-Mariana system. *Geochem Geophys Geosyst*, 11: Q03X12
- Reagan M K, Heaton D E, Schmitz M D, Pearce J A, Shervais J W, Koppers A A P. 2019. Forearc ages reveal extensive short-lived and rapid seafloor spreading following subduction initiation. *Earth Planet Sci Lett*, 506: 520–529
- Soret M, Bonnet G, Agard P, Larson K P, Cottle J M, Dubacq B, Kylander-Clark A R C, Button M, Rividi N. 2022. Timescales of subduction initiation and evolution of subduction thermal regimes. *Earth Planet Sci Lett*, 584: 117521
- Stern R. 2004. Subduction initiation: Spontaneous and induced. *Earth Planet Sci Lett*, 226: 275–292
- Stern R J, Gerya T. 2018. Subduction initiation in nature and models: A review. *Tectonophysics*, 746: 173–198
- 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 D. 2024. New perspectives on deep carbon cycling. *Sci China Earth Sci*, 67: 2411–2422
- van Hinsbergen D J J, Steinberger B, Guilmette C, Maffione M, Gürer D, Peters K, Plunder A, McPhee P J, Gaina C, Advokaat E L, Vissers R L M, Spakman W. 2021. A record of plume-induced plate rotation triggering subduction initiation. *Nat Geosci*, 14: 626–630
- Whattam S A, Stern R J. 2011. The ‘subduction initiation rule’: A key for linking ophiolites, intra-oceanic forearcs, and subduction initiation. *Contrib Miner Petrol*, 162: 1031–1045
- Xiong Q, Griffin W L, Zheng J P, O'Reilly S Y, Pearson N J, Xu B, Belousova E A. 2016. Southward trench migration at ~130–120 Ma caused accretion of the Neo-Tethyan forearc lithosphere in Tibetan ophiolites. *Earth Planet Sci Lett*, 438: 57–65
- Xiong Q, Dai H K, Zheng J P, Griffin W L, Zheng H D, Wang L, Reilly S Y O. 2022. Vertical depletion of ophiolitic mantle reflects melt focusing and interaction in sub-spreading-center asthenosphere. *Nat Commun*, 13: 6956
- Yang J S, Wu W W, Lian D Y, Rui H C. 2021. Peridotites, chromitites and diamonds in ophiolites. *Nat Rev Earth Environ*, 2: 198–212
- Zhang C, Liu C Z, Xu Y, Ji W B, Wang J M, Wu F Y, Liu T, Zhang Z Y, Zhang W Q. 2019. Subduction re-initiation at dying ridge of Neo-Tethys: Insights from mafic and metamafic rocks in Lhaze ophiolitic mélange, Yarlung-Tsangbo Suture Zone. *Earth Planet Sci Lett*, 523: 115707
- Zhang P F, Zhou M F, Robinson P T, Malpas J, Yumul Jr. G P, Wang C Y, Li J. 2024. Diversities of chromite mineralization induced by chemo-thermal evolution of the mantle during subduction initiation. *Nat Commun*, 15: 9385
- Zhong X, Li Z H. 2022. Formation of metamorphic soles underlying ophiolites during subduction initiation: A systematic numerical study. *J Geophys Res-Solid Earth*, 127: e2021JB023431
- Zhou X, Wada I. 2021. Differentiating induced versus spontaneous subduction initiation using thermomechanical models and metamorphic soles. *Nat Commun*, 12: 4632

(责任编辑: 郑永飞)