

DOI: 10.16788/j.hddz.32-1865/P.2024.08.004

引文格式: 卞昊达, 刘仲兰, 冯书铭, 王元. 2024. 板块扩张中心的构造缩短[J]. 华东地质, 45(4): 381-386. (BIAN H D, LIU Z L, FENG S M, WANG Y. 2024. Tectonic shortening at plate spreading centers[J]. East China Geology, 45(4): 381-386.)

板块扩张中心的构造缩短

卞昊达, 刘仲兰, 冯书铭, 王元

(吉林大学地球科学学院, 吉林 长春 130061)

摘要: 洋中脊是地球上重要的火山-地震带之一, 也是多圈层相互作用以及能量和物质交换的重要构造位置。洋中脊作为板块构造理论中典型的离散板块边界, 伸展构造以及与其相关的正断层活动是其变形的主旋律。然而, 2022年年底北大西洋 54°N 段发生了一次逆冲断层地震活动。文章主要报道并简述与这次地震事件相关的且发表在 2024 年 4 月 Nature 期刊上的一篇研究论文。该论文通过地震观测、地质分析及数值模拟等多学科综合研究, 详细报道了在典型离散板块边界发生的逆冲地震活动, 深入分析了短时间尺度内地震事件在海底地貌上的记录, 并对伸展构造背景下挤压应力区的发育机制进行了论证。以上研究挑战了离散板块边界只发育伸展构造的传统观点, 也证实了多学科综合作业以及多时间尺度地质过程耦合分析等手段对开展固体地球科学研究的必要性。

关键词: 洋中脊; 地震活动; 地形地貌; 地球动力学

中图分类号: P541

文献标识码: A

文章编号: 2096-1871(2024)04-381-06

洋中脊作为地球上最显著的地质构造之一, 是离散板块边界的典型代表, 其在海底的延伸极为壮观, 总长度超过 65 000 km。若将弧后扩张形成的洋盆计算在内, 大洋扩张中心的总长度可扩展至 80 000 km, 且遍布全球各大洋底。洋中脊与转换断层、俯冲碰撞带构成了板块构造理论的 3 种关键板块边界类型。洋中脊是地质活动最剧烈的位置之一, 发育着在世界范围绵延的火山链。尽管洋中脊地区地震活动的震级和破坏性相对较低, 但其发生的频率却极高, 反映了地球内部能量在持续释放。洋中脊也是岩石圈、水圈和生物圈相互激烈作用的场所, 在地球系统科学研究中扮演着至关重要的角色。在洋中脊, 板块的分离和新洋壳的生成, 驱动了海水循环、热液循环以及生物地球化学过程, 对地球的气候、生态和资源分布产生了深远的影响。

根据板块构造理论, 构造伸展及其伴随的正断层活动是洋中脊发生变形的主要原因。然而, 最近一项联合地震观测、地形构造解译和地球动

力学数值模拟的合作研究成果挑战了这一传统观点, 认为离散板块边界也可能发生构造缩短。学者们报道了发生在北大西洋 54°N 段对称型慢速扩张洋中脊发生的一次逆冲断层地震事件(Reverse-faulting earthquakes), 分析了这种短时间尺度的地震事件在长时间尺度的海底地貌上留下的构造遗迹, 并探讨了在离散板块边界发生逆冲断层地震活动的动力学机制。该项成果于 2024 年 4 月 10 日全文在线发表在 Nature 期刊(<https://www.nature.com/articles/s41586-024-07247-w>)。本文主要对该成果进行简要报道和评述, 详细成果请读者参见原文。

1 短时间尺度的地震记录: 慢速洋中脊附近的逆冲断层地震事件

洋中脊地震带是全球最主要的地震活动带。在洋中脊, 地震活动主要集中在狭窄的脊轴带内, 除了在超慢速扩张洋中脊(全扩张速率 < 20 mm/yr)

* 收稿日期: 2024-08-04 修订日期: 2024-10-03 责任编辑: 谭桂丽

第一作者简介: 卞昊达, 2001 年生, 男, 硕士研究生, 主要从事地球动力学数值模拟研究工作。Email: hdbian23@mails.jlu.edu.cn。

通信作者简介: 刘仲兰, 1991 年生, 男, 教授, 博士生导师, 主要从事地球动力学和构造地质学研究和教学工作。

Email: zliu1991@jlu.edu.cn。

(Schlindwein and Schmid, 2016)以及转换断层内(Wolfe et al., 1993)报道的少数几处深源地震外,大多数为浅源地震,震源深度通常不超过 10 km。地震活动对板块构造理论的发展,尤其在确认海底扩张假说方面做出了重要贡献。20 世纪 60 年代,洋中脊地震震源机制的分析(Sykes, 1967)为海底扩张学说提供了除海底磁异常条带(Opdyke, 1966)之外的另一项有力证据。震矩释放在转换断层上,比释放在板块扩张中心上高出 1~2 个数量级,且随着扩张速率的增加,转换断层对总地震能量的贡献也相应增加(Rundquist and Sobolev, 2002)。地震震源深度与洋中脊扩张速率的关系较明显,扩张中心的最大地震深度随着洋中脊扩张速率的增加而变浅(Huang and Solomon, 1988),这反映了洋中脊附近的弹性-脆性层的厚度与洋中脊扩张速率之间的规律性变化(Liu and Buck, 2020)。通过部署海底地震仪等先进设备进行微地震监测实验,可以显著地降低可记录的最大震级阈值和定位的不确定性,使人们能够捕捉到数量庞大的微地震事件(Yu et al., 2024)。

总体而言,地震震源机制与板块构造理论相符,转换断层以走滑断层机制为主,而扩张中心以正断层机制为主。关于洋中脊逆冲断层地震活动的报道非常少,其均处于特殊的构造环境:如在洋中脊与转换断层的交汇处, Wolfe et al. (1993)发现在 Owen 转换断层和 St. Paul 转换断层附近均发生过逆冲地震,认为逆冲地震的形成可能与压缩挠曲(compressional bend)有关,在这些转换断层与洋中脊的交汇处,断层的走向发生了变化,导致应力状态发生改变。另外,慢速洋中脊大型低角度拆离断层的下盘也发生过逆冲地震活动,如 Parnell-Turner et al. (2017)开展了北大西洋 13°20′拆离断层附近的局部微地震研究,观测到地震活动频率异常高,这些地震大多数是逆冲断层地震事件,主要发生在海底以下 3~7 km 的深度,认为这些逆冲地震事件与拆离断层下盘的挠曲有关。

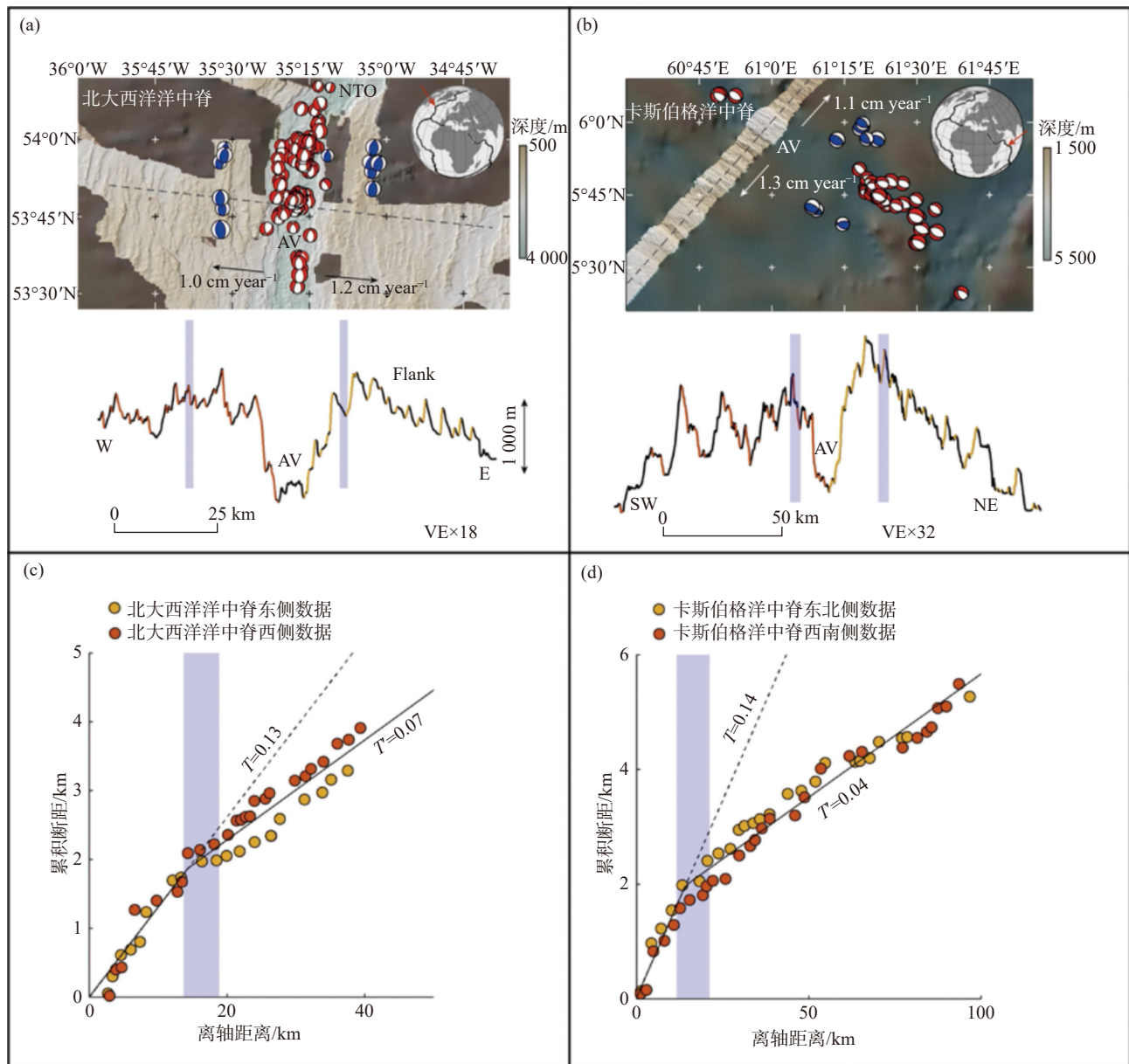
然而,2022 年 9 月 26 日,位于北纬 54°的北大西洋洋中脊发生了一次震级 > 5 级的逆断层地震活动(Cesca et al., 2023; Jackson and McKenzie, 2023; Olive et al., 2024)。该区域的全扩张速率约为 22 mm/yr,对称的地形特征表明其为岩浆活动频繁的脊段,其中包括一个深度约为 1.3 km 的脊轴

谷底(axial valley)以及两侧的山脊肩部,并发育间距为 2~4 km 的正断层(图 1(a))。在地震事件发生的最初三天内,经过重新定位的地震活动显示,地震活动沿轴向南迁移了约 45 km,且这些地震全部是由 EW 向的伸展作用引发的。这种正断层地震活动持续了 27 天,没有表现出进一步向南迁移的迹象。在该地震事件向南迁移的过程中,在距离脊轴以东 15 km 处的一个断层面上发生了一次 5.1 级的逆断层地震活动。在 2022 年 9 月 29 日—2023 年 1 月 4 日,该区又发生了 11 次震级高达 5.9 级的逆断层地震事件,这些地震活动对称地分布在脊轴两侧大约 15 km 处的两个狭窄区域内(图 1(a))。受该次地震活动的启发,作者们发现在 2014 年 11 月,西北印度洋的卡尔斯伯格洋中脊也发生过类似的地震序列(图 1(b))。

2 长时间尺度的地质证据:构造缩短在海底地貌上的证据

为了检验短时间尺度地震事件在长时间尺度地质数据上留下的痕迹,原文作者进一步通过海底地形解译分析了构造应变量与离轴距离之间的关系。由于洋中脊远离陆地,外生地质作用较弱,其附近的地形地貌特征能够较好地保留断层作用等内动力地质作用留下的痕迹(Escartín et al., 1999; Fan et al., 2019)。在大西洋洋中脊和卡尔斯伯格洋中脊,断层累积断距随着离轴距离增加的斜率在离轴大约 15 km 处出现了显著变化,这一变化的位置与逆冲地震带大致吻合(图 1(c)、(d))。这种斜率的变化与构造伸展因子 T (断层作用发生时的伸展作用占整个洋中脊伸展作用的比值)的减少有关,反映了洋中脊附近的正断层的断距在不断减小。在北大西洋 54°N 段,伸展因子 T 从 0.13 减小至 0.07(图 1(c)),这相当于断层断距从大约 400 m 减小到 200 m。原文作者对整个超慢速扩张的西南印度洋洋中脊、慢速扩张的大西洋洋中脊和卡尔斯伯格洋中脊,以及中速扩张的东南印度洋洋中脊等代表性的地形剖面进行系统分析,发现在 10~30 km 的离轴距离范围内, T 值均发生了 0.02~0.18 幅度的减小。

值得注意的是,除了断层作用外,沉积-剥蚀等地表过程也可能造成了 T 值的减小。然而,远



(a).北大西洋洋中脊的地震分布与地形地貌特征；(b).卡斯伯格洋中脊的地震分布与地形地貌特征；(c).北大西洋洋中脊构造伸展量与离轴距离关系；(d).卡斯伯格洋中脊构造伸展量与离轴距离关系

图1 发生在慢速扩张洋中脊的逆冲地震活动以及附近的地形特征(Olive et al., 2024)

Fig. 1 Thrust earthquake and topographic feature in slowly expanding mid ocean ridge(Olive et al., 2024)

洋沉积物的平均沉积速率仅为 5 m/Ma。因此, 沉积物充填很难解释断层断距发生 30 m 左右减小的这一现象。此外, 如果是地表过程导致断层 d 的断距减小, 在全球范围内洋中脊都应该表现出相似的特征, 然而原文作者发现这种特征只表现在具有洋中脊谷地的中速洋中脊和慢速洋中脊上, 而具有洋中脊高地(axial high)的快速扩张洋中脊, 如东太平洋洋隆在离轴约 17 km 处, T 值反而发生

了一定幅度的增大, 进一步证实了地表过程对于断层断距减小的贡献有限。

3 动力学机制: 离散板块边界的挤压应力从哪里来?

从短时间尺度的地震记录和长时间尺度的海底地貌分析来看, 对称型慢速洋中脊的正断层地

震活动发育在洋脊谷地,这些断层随着岩石圈板块离开洋脊谷地并到达脊肩顶部的时候发生了逆向再活化。这种正断层的逆向再活化显然需要一定的挤压应力,那么在构造伸展最活跃的离散板块边界,挤压应力是如何形成的?

为此,原文作者进一步开展了二维地球动力学数值模拟研究。在数值模拟中,考虑了岩浆侵入与地形变化之间的相互作用,岩浆侵位的速率即是随着地形演化的函数(Liu and Buck, 2018,

2020)。模拟结果显示,对于一个具有中央裂谷的对称型洋中脊,新生洋壳在中央裂谷内发生挠曲(bending),随着新生洋壳在中心轴处的不断生成,相对较老的地壳发生了从裂谷中心向裂谷肩部的离轴运动,这种挠曲作用随之释放(unbending),从而产生一个水平压缩区域(图2)。在该区域内,水平偏应力超过约 10 MPa,达到压缩莫尔-库伦破裂阈值,应力峰值位于离轴约 15 km 处,与发生逆冲地震的空间位置重叠。

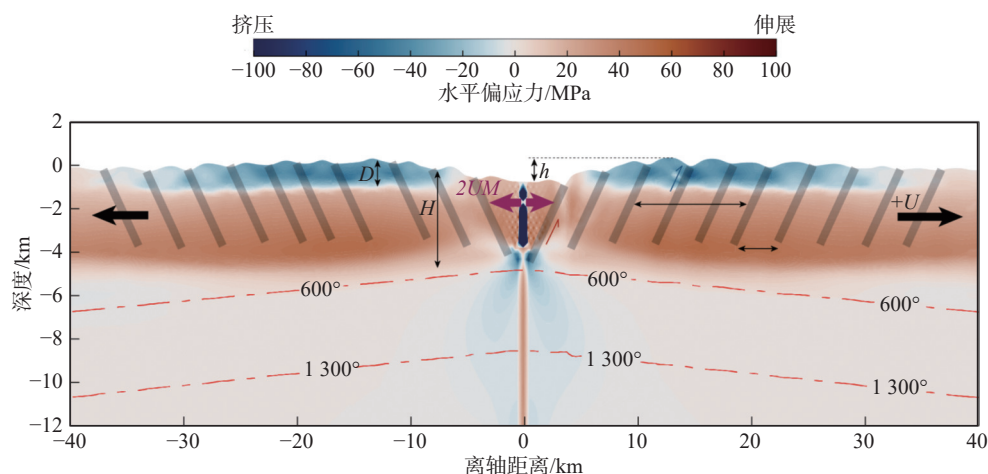


图2 离散板块边界挤压应力区的形成机制(Olive et al., 2024)

Fig. 2 Formation mechanism of compression stress zones in divergent plate boundaries(Olive et al.,2024)

4 启示及未来可能的研究方向

原文作者通过地震观测、地质分析及数值模拟等多学科综合研究,详细报道了在典型离散板块边界发生的逆冲地震活动,深入分析了这些短时间尺度内地震事件在海底地貌上的记录过程,并对在伸展构造背景下挤压应力区的发育机制进行了论证。该研究不仅彰显了多学科联合作业在固体地球科学领域研究中的重要性与优势,同时也揭示了地球科学的迷人之处以及未来研究的广阔前景:即便是在构造活动和岩性相对简单的大洋中脊,也常出现颠覆传统认识的地质现象。

该项研究并非终点,而是诸多有趣科学问题的起点。例如,逆冲地震活动是如何在伸展板块中通过挠曲作用孕育的?早期伸展正断层的性质(如断层带内的孔隙压力),与逆冲地震的规模及其发展深度有何关联?在伸展构造背景下有多少通过挠曲形成的挤压应力是通过地震活动释放的?为了解答这些问题,除了需要收集更多、更精确

的观测数据,将观测与理论模型有机结合外(Liu et al., 2022; 欧洋等, 2022; 朱红兵等, 2022),也需要加强长时间尺度地质过程与短时间尺度地震及火山喷发过程之间相互作用的理论研究(Liu and Buck, 2022)。

致谢: 感谢《华东地质》编辑部执行主编陈志洪研究员的邀稿。

References

- CESCA S, METZ M, BÜYÜKAKPINAR P, DAHM T. 2023. The energetic 2022 seismic unrest related to magma intrusion at the North Mid-Atlantic Ridge[J]. *Geophysical Research Letters*, 50(13): e2023GL102782.
- ESCARTÍN J, COWIE P A, SEARLE R C, ALLERTON S, MITCHELL N C, MACLEOD C J, SLOOTWEG A P. 1999. Quantifying tectonic strain and magmatic accretion at a slow spreading ridge segment, Mid-Atlantic Ridge, 29°N[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 104(B5): 10421-10437.

- FAN Q K, LI J H, LIU Z L, LIU C H. 2019. A quantitative method for active fault migration distance assessment on both sides of Mid - Ocean ridges—based on Multi - beam data[J]. *Acta Geologica Sinica (English Edition)*, 93(4): 810-819.
- JACKSON J, MCKENZIE D. 2023. Reverse-faulting earthquakes and the tectonics of slowly-spreading mid-ocean ridge axes[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 618: 118279.
- LIU Z L, BUCK W R. 2018. Magmatic controls on axial relief and faulting at mid-ocean ridges[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 491: 226-237.
- LIU Z L, BUCK W R. 2020. Global trends of axial relief and faulting at plate spreading centers imply discrete magmatic events[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 125(8): e2020JB019465.
- LIU Z L, BUCK W R. 2022. Magmatic sill formation during dike opening[J]. *Geology*, 50(4): 407-411.
- LIU Z L, PÉREZ-GUSSINÉ M, RÜPKE L, MULDAŠEV I A, MINSHULL T A, BAYRAKCI G. 2022. Lateral coexistence of ductile and brittle deformation shapes magma-poor distal margins: an example from the West Iberia-Newfoundland margins[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 578: 117288.
- OLIVE J A, EKSTRÖM G, BUCK W R, LIU Z L, ESCARTÍN J, BICKERT M. 2024. Mid-ocean ridge unroofing revealed by magmatic intrusions[J]. *Nature*, 628(8009): 782-787.
- OPDYKE N D, GLASS B, HAYS J D, FOSTER J. 1966. Paleomagnetic study of antarctic deep-sea cores: paleomagnetic study of sediments in a revolutionary method of dating events in Earth's history[J]. *Science*, 154(3747): 349-357.
- OU Y, ZHANG J, FENG J, LIU D M, JIA D Y, YANG F, HU Z P, LIN Z Z. 2022. 3D visualization modeling of geological and geophysical data and its application: A case study of Xiong'an New Area[J]. *East China Geology*, 43(3): 286-296.
- PARNELL-TURNER R, SOHN R A, PEIRCE C, RESTON T J, MACLEOD C J, SEARLE R C, SIMÃO N M. 2017. Oceanic detachment faults generate compression in extension[J]. *Geology*, 45(10): 923-926.
- RUNDQUIST D V, SOBOLEV P O. 2002. Seismicity of mid - oceanic ridges and its geodynamic implications: a review[J]. *Earth - Science Reviews*, 58(1-2): 143-161.
- SCHLINDWEIN V, SCHMID F. 2016. Mid-ocean-ridge seismicity reveals extreme types of ocean lithosphere[J]. *Nature*, 535(7611): 276-279.
- SOLOMON S C, HUANG P Y, MEINKE L. 1988. The seismic moment budget of slowly spreading ridges[J]. *Nature*, 334(6177): 58-60.
- SYKES L R. 1967. Mechanism of earthquakes and nature of faulting on the mid-oceanic ridges[J]. *Journal of Geophysical Research*, 72(8): 2131-2153.
- WOLFE C J, BERGMAN E A, SOLOMON S C. 1993. Oceanic transform earthquakes with unusual mechanisms or locations: relation to fault geometry and state of stress in the adjacent lithosphere[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 98(B9): 16187-16211.
- YU Z Y, LI J B, DING W W. 2024. Microearthquake reveals the lithospheric structure at mid-ocean ridges and oceanic transform faults[J]. *Journal of Oceanology and Limnology*, 42(3): 697-700.
- ZHU H B, CHEN G G, ZHAO D D, ZHANG B S, DI B Y, YU L, YUAN P F. 2022. Application of microtremor survey method in the study of stratum structure: A case study of Binhai New Town, Fuzhou City[J]. *East China Geology*, 43(3): 297-305.

附中文参考文献

- 欧洋, 张杰, 冯杰, 刘东明, 贾定宇, 杨峰, 胡志鹏, 林振洲. 2022. 地质-地球物理三维可视化建模及其应用——以雄安新区为例[J]. *华东地质*, 43(3): 286-296.
- 朱红兵, 陈国光, 赵东东, 张宝松, 邸兵叶, 于雷, 袁平峰. 2022. 微动探测技术在地层结构研究中的应用——以福州滨海新城核心区为例[J]. *华东地质*, 43(3): 297-305.

Tectonic shortening at plate spreading centers

BIAN Haoda, LIU Zhonglan, FENG Shuming, WANG Yuan

(College of Earth Sciences, Jilin University, Changchun 130061, Jilin, China)

Abstract: The mid-ocean ridge is a remarkable feature of our planet, renowned as one of Earth's most vital zones for volcanic and seismic activity. It serves as a crucial setting for the transfer of energy and materials between the ocean and lithosphere. As the archetypal divergent plate boundary, mid-ocean ridges are primarily sculpted by extensional tectonics and the associated development of normal faults. However, in a surprising twist, a thrust seismic event was detected in late 2022 along the 54°N segment of the Atlantic mid-ocean ridge. This article focuses on summarizing a recent paper that addresses this seismic event, featured in the prestigious journal *Nature* (<https://www.nature.com/articles/s41586-024-07247-w>). The research, integrating seismic observations, geological analyses, and numerical simulations across multiple disciplines, provides a detailed account of the thrust seismic activity at a classical divergent plate boundary. It delves into the imprint of these short-lived seismic events on the landscape's topography and geomorphology, elucidating the mechanisms behind the formation of compression stress zones within an extensional tectonic setting. The study not only challenges the long-held assumption that divergent plate boundaries are solely associated with extensional tectonics but also underscores the indispensable role of interdisciplinary collaboration and the integration of geological processes across different timescales in advancing solid Earth science research.

Key words: mid-oceanic ridge; seismic activity; topographic features; geodynamics