



大陆岩石圈形变驱动力

曹泽斌, 刘丽军*

中国科学院地质与地球物理研究所岩石圈演化与环境演变全国重点实验室, 北京 100029

* 通讯作者, E-mail: ljliu@mail.iggcas.ac.cn

收稿日期: 2024-07-22; 收修改稿日期: 2024-10-25; 接受日期: 2024-11-06; 网络版发表日期: 2024-11-12

中国科学院战略性先导科技专项项目(XDB0710000)和国家自然科学基金项目(92355302)资助

1 引言

岩石圈作为地球圈层结构重要的一环, 其受力状态和形变机制不仅对理解地球的构造演化至关重要(Ghosh和Holt, 2012), 也对自然资源的利用与管理有重要意义(Heidbach等, 2018). 由于板块之间持续的相对运动, 经典的板块构造理论预测岩石圈会在板块边界附近发生强烈的形变. 与之相反, 板块内部通常被认为是刚性的, 不易发生形变的. 然而, 地质与地球物理资料表明, 在距离板块边界数百甚至上千公里的板内区域, 尤其是大陆板块内部, 也发育有大规模的岩石圈形变, 其背后的驱动力尚不明确.

大陆岩石圈形变通常会引发陆内地震. 在青藏高原及邻区、地中海地区、亚洲东部和北美西部等大陆变形区, 陆内地震多发于人口稠密地带, 对人类社会有着极大的影响. 因此, 研究大陆岩石圈的应力与应变状态对防震减灾工作有重要意义.

岩石圈形变受控于其受力状态与流变结构(Ghosh和Holt, 2012), 而岩石圈的受力状态与其自身的密度结构、三维形态紧密相关(Cao和Liu, 2021, 2024). 对大陆岩石圈而言, 其复杂的三维结构对其形变有何影响尚不明晰. 本文旨在介绍基于不同研究方法对岩石圈结构得到的对大陆岩石圈形变驱动力的认识, 并就未来可能的研究方向进行展望.

2 大陆岩石圈应力与应变观测

自板块构造理论诞生以来, 岩石圈的应力与应变状态一直是固体地球科学关注的重点问题. 对大陆岩石圈而言, 其内部应力状态是三种应力相互作用的结果: (1) 自身密度不均一与地表地形引起的内部体力, (2) 板块边界应力; (3) 地幔流施加于大陆岩石圈底部的应力(Cao和Liu, 2021).

目前对岩石圈应力状态的直接观测集中于近地表. 根据断层类型与走向、钻井数据、震源机制等资料, 可定量确定浅部地壳的两个水平主应力方向和相对大小(Heidbach等, 2018). 与之类似, 对岩石圈应变状态的直接观测也集中于近地表. 根据断层滑移记录、地震释放的应变以及全球定位系统(Global Positioning System, GPS)测得的地表相对运动等资料, 可定量获得地表速度场和浅部地壳应变率.

值得注意的是, 由于目前缺乏对岩石圈深部应力与应变状态的直接观测, 且岩石圈物理性质存在很强的三维不均一性, 对观测到的浅部应力与应变能否代表岩石圈的平均状态这一问题至今仍存争议. 因此, 利用多种不同的观测资料, 例如地形、地震波各向异性, 对岩石圈及其下方软流圈的三维应力与应变状态进行约束就显得尤为重要(Bird等, 2008; Cao和Liu, 2021, 2024).

中文引用格式: 曹泽斌, 刘丽军. 2024. 大陆岩石圈形变驱动力. 中国科学: 地球科学, 54(12): 3999–4004, doi: 10.1360/SSTe-2024-0206

英文引用格式: Cao Z, Liu L. 2024. Driving forces of continental lithospheric deformation. Science China Earth Sciences, 67(12): 3950–3956, <https://doi.org/10.1007/s11430-024-1458-y>

3 大陆岩石圈形变驱动力

大陆岩石圈形变过程受控于其受力状态与流变结构. 因此, 如何计算岩石圈应力场、建立岩石圈流变结构是研究大陆岩石圈形变的重要基础. 目前, 相关研究多基于地球物理观测对岩石圈应力进行计算, 并通过与观测到的浅部应力状态进行比较, 对计算值的可靠性加以验证. 值得注意的是, 这一过程强烈依赖于所采用的岩石圈结构. 基于不同假设的研究会对大陆岩石圈结构进行不同程度的简化, 导致计算结果有较大差别. 同时, 在对大陆岩石圈结构进行简化时, 不同研究采用的流变结构也有所不同, 这使得岩石圈流变结构对其应力与应变有何影响也存有争议.

3.1 薄板模型

传统的岩石圈形变研究多采用薄板假设(图1a; Jones等, 1996; England和Molnar, 1997), 将三维动力学问题简化为二维动力学问题进行求解. 该假设认为在横向尺度远远大于垂向尺度时, 大陆岩石圈可近似为一个覆盖在有效黏度极小的软流圈之上的高黏度流体层. 在均衡假设下, 岩石圈内部的压强分布可通过对岩石圈密度结构从地表到补偿深度(compensation depth)的垂向积分得到, 进而转化为重力势能(Gravitational Potential Energy, GPE), 最终通过二维力平衡方程对板内的水平偏应力进行求解. 在薄板模型中, 岩石圈内部复杂结构带来的三维效应并未被纳入考虑.

早期岩石圈形变研究多关注于大陆变形区, 例如青藏高原及邻区(例如, England和Molnar, 1997; Flesch等, 2001; Ghosh等, 2006)和北美西部(例如, Jones等, 1996; Flesch等, 2000). 在计算岩石圈重力势能时, 这些研究大多假设大陆岩石圈严格满足均衡理论, 且有着全球一致的岩石圈-软流圈分界面(Lithosphere-Asthenosphere Boundary, LAB). 基于以上两个假设, 大部分研究将补偿深度定于海平面以下100km或其他固定深度, 并将该深度视为LAB界面(例如, Jones等, 1996; England和Molnar, 1997; Flesch等, 2000, 2001; Ghosh等, 2006). 一些研究基于地壳均衡假设对岩石圈重力势能进行计算(例如, England和Molnar, 1997; Flesch等, 2000, 2001), 另一些研究则基于岩石圈均衡假设对重力势能进行计算(例如, Jones等, 1996). 值得注意的是, 这两种方法得到的岩石圈重力势能区别仅有10%

~20%, 不存在显著差别(Ghosh等, 2006).

在仅考虑岩石圈内部体力时, 早期研究表明在地形远高于周围的高原地区, 例如青藏高原地区(例如, England和Molnar, 1997)和美国西南部(例如, Jones等, 1996), 重力势能引起的偏应力场与观测到的地表形变有着较好的相关性, 并认为该应力源主导了相关地区的岩石圈变形过程. 当研究区域包含大陆变形区及周围板块边界时, 一些研究通过在板块边界处添加应力边界条件对大陆岩石圈的应力状态进行综合模拟(图1a), 并指出在板块边界附近, 例如印度-欧亚板块碰撞带(Flesch等, 2001)和太平洋-北美板块边界附近(Flesch等, 2000), 板块边界应力对大陆岩石圈的偏应力场也有着显著的贡献. 这些板块边界应力可能源于大洋岩石圈的重力势能梯度, 即洋脊推力, 也可能来源于地幔流施加于大洋板块底部的拖曳力. Ghosh等(2006)利用薄板模型计算了印度洋洋脊推力对印度板块北向运动和青藏高原构造变形的贡献, 指出印度洋洋脊推力不足以提供印度-欧亚碰撞带所需的板块边界应力, 并提出地幔流施加于印度板块底部的拖曳力也是重要应力源.

早期的薄板模型多关注于岩石圈应力分布的计算, 并利用计算得到的岩石圈应力与观测到的地表应变率对岩石圈平均有效黏度进行估计(例如, Jones等, 1996; England和Molnar, 1997; Flesch等, 2000, 2001). 相关结果显示, 在大陆变形区, 大陆岩石圈的平均有效黏度仅比软流圈高1~2个数量级. England和Molnar(1997)指出, 应当将大陆变形区的岩石圈与下方软流圈一起视作高黏度流体, 而非将岩石圈视作不易变形的刚性板块.

3.2 薄板-对流地幔模型

随着对地幔流场研究的深入和模拟能力的增强, 地幔流施加于岩石圈底部的应力得到了更多的关注. 薄板-对流地幔模型通过在薄板模型中增加来自地幔流的水平拖曳力来模拟地幔流对岩石圈形变的影响(图1b; 例如, Bird等, 2008; Ghosh和Holt, 2012; Ghosh等, 2019; Bahadori等, 2022; 张倩文等, 2024). 此类模型通常用基于地震层析成像的大尺度对流模型(例如, Ghosh和Holt, 2012; Ghosh等, 2019; Bahadori等, 2022)、力矩平衡(例如, Bird等, 2008)或重力扰动方法(例如, 张倩文等, 2024)来计算地幔流在LAB处(100km

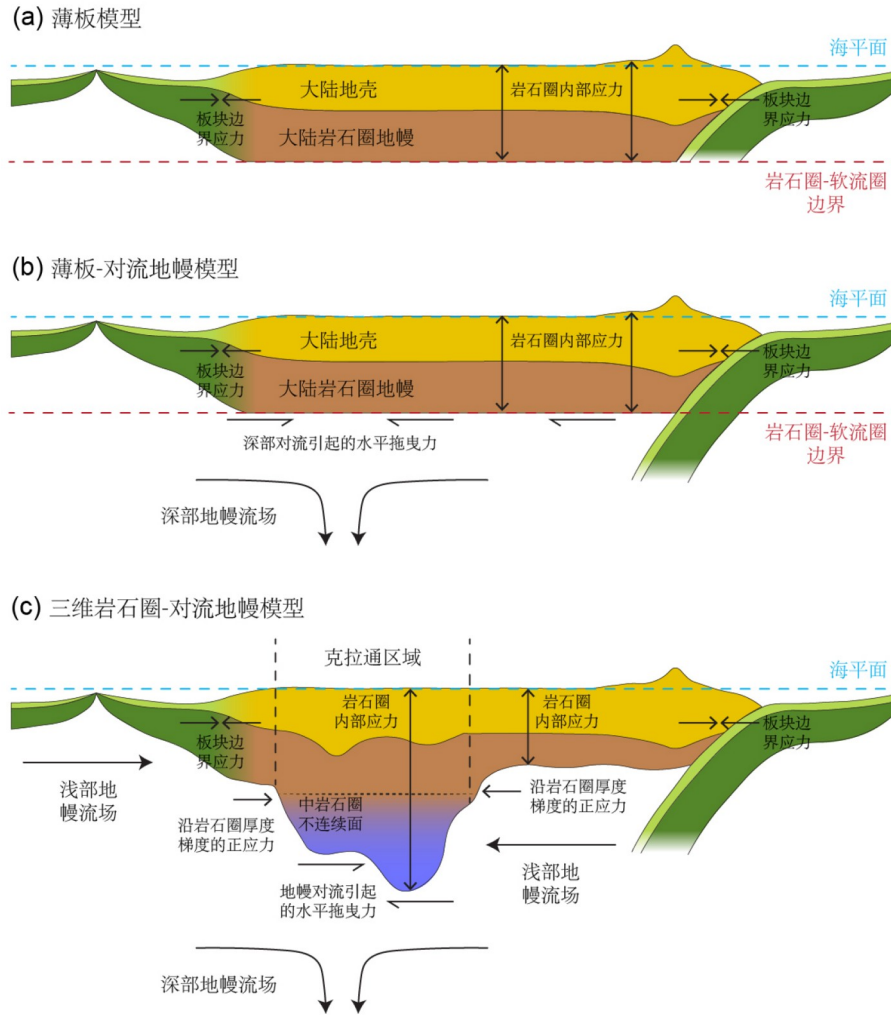


图 1 (网络版彩图)不同模型采用的岩石圈结构与应力计算方法示意图

或其他固定深度)产生的水平拖曳力, 并将其加入到二维力平衡方程中. 该类模型并未考虑由岩石圈厚度变化引起的岩石圈-软流圈相互作用及其相关的应力.

一些研究表明, 在全球尺度上, 由俯冲板片引起的大尺度地幔流施加于岩石圈底部的水平拖曳力是岩石圈偏应力的主要来源(例如, Bird等, 2008; Ghosh和Holt, 2012). 但在大陆变形区, 重力势能梯度引起的岩石圈内部体力占主导作用(Ghosh和Holt, 2012; Bahadori等, 2022; 张倩文等, 2024). 与之相反, 部分研究认为浅部小尺度地幔流施加于岩石圈底部的应力对陆内形变起主导作用, 并引起了局部的应变集中, 形成了板内地震带(例如, Faccenna和Becker, 2010; Becker等, 2015). 在构造活动不活跃的地区, 例如美国中东部,

大尺度地幔流施加于岩石圈底部的水平拖曳力被认为是岩石圈偏应力的主要来源, 并为陆内地震提供了驱动力(Ghosh等, 2019).

薄板-对流地幔模型能同时模拟岩石圈的应力与应变状态, 但其需要岩石圈有效黏度作为已知条件. 此类研究通常利用经验公式与观测到的地表应变率来计算岩石圈平均有效黏度(例如, Ghosh和Holt, 2012; Ghosh等, 2019). 一些研究指出岩石圈有效黏度的横向变化对岩石圈的应力与应变分布有着重要作用(例如, Ghosh和Holt, 2012; Ghosh等, 2019). 然而, 岩石圈的物理性质存在极强的三维不均一性, 通过上述方法得到的岩石圈平均有效黏度往往不能准确刻画岩石圈有效黏度在垂向上的变化(例如, Liu和Hasterok, 2016;

Shinevar等, 2018; Cao和Liu, 2024), 可能低估了岩石圈有效黏度的三维效应。

3.3 三维岩石圈-对流地幔模型

近年来, 随着对大陆岩石圈三维结构的深入探索, 薄板模型的假设受到了越来越多的挑战。大量研究表明大陆岩石圈厚度存在显著的横向变化(图2a)。在大陆岩石圈厚度突变处, 其与下方地幔流会产生复杂的相互作用。这使得地幔流不仅可以对上覆岩石圈施加沿着LAB的水平拖曳力, 还可以沿着岩石圈厚度突增的界面对岩石圈施加正应力(图1c)。同时, 大量研究显示大陆岩石圈内部有着复杂的三维密度与黏度结构(例如, Liu和Hasterok, 2016; Shinevar等, 2018; Wang等, 2023; Bott等, 2024; Delph等, 2024), 可能对岩石圈内的应力与应变分布有着极强的影响(例如, Cao和Liu, 2021, 2024; Hightower等, 2024; 张倩文等, 2024)。此外, 地球动力学研究表明由地幔流引起的垂向应力对地表地形和岩石圈垂向应力也有着重要影响(例如, Cao和Liu, 2021)。然而, 上述对岩石圈形变起关键作用的三维因素并未被纳入到薄板模型或薄板-对流地幔模型中。为了进一步研究岩石圈复杂结构带来的三维效应, 一些研究采用了三维岩石圈-对流地幔模型(例如, Cao和Liu, 2021, 2024; Hightower等, 2024)。该类模型将观测到的岩石圈三维精细结构加入到了动力学数值模拟中, 可以对岩石圈与对流地幔中复杂结构带来的三维效应展开定量研究。

为厘清大陆岩石圈三维结构对其形变有何影响, Cao和Liu(2024)基于多种观测资料, 搭建了一系列基于数据同化方法的三维岩石圈-对流地幔模型(图1c), 在同一个物理框架内对地幔流场与岩石圈形变进行了模拟。在考虑了岩石圈与对流地幔三维精细结构的情况下, Cao和Liu(2024)不仅得到了满足地震波各向异性的地幔流场, 还再现了美国西部地区的地表速度场、陆内地震活动分布与地壳应力状态(图2b~2e)。数值模拟结果显示, 由位于北美东部下方正在下沉的法拉龙板块引起的朝向大陆内部的地幔流被科罗拉多高原与怀俄明高原下方厚度超过150km的克拉通岩石圈阻挡, 在局部地区产生了强烈的岩石圈与软流圈相互作用(图2b)。通过岩石圈与软流圈之间的相互作用, 地幔流对北美大陆岩石圈厚度突增处施加了额外的正应力, 导致该地区上方的地壳变形速率加快, 形成了北美

西部活跃的板内地震带(图2d)。此外, Cao和Liu(2024)指出大陆岩石圈的三维密度结构与流变结构对大陆岩石圈内部的应力与应变分布有着重要作用。类似的, 利用三维岩石圈-对流地幔模型, Hightower等(2024)证明了在美国中东部, 岩石圈三维流变结构尤其是板内薄软带, 对板内应力与应变分布、陆内地震的发生有重要作用。

4 结语

随着对大陆岩石圈研究的深入, 其三维结构对岩石圈形变的影响应愈发得到重视。基于数据同化方法的三维岩石圈-对流地幔模型对进一步研究岩石圈三维结构对其形变的影响至关重要(Cao和Liu, 2021, 2024; Hightower等, 2024)。该方法能够有效地利用多种独立的地质与地球物理观测资料对岩石圈的三维密度结构与流变结构进行精细约束, 同时也可以对地幔流场, 特别是小尺度流场进行精细约束(Cao和Liu, 2024)。基于高精度三维岩石圈与对流地幔结构, 三维岩石圈-对流地幔模型可以有效地对岩石圈三维应力与应变状态进行模拟, 并对不同应力源进行定量计算(例如, Cao和Liu, 2021, 2024), 对进一步理解大陆岩石圈变形机制和陆内地震成因有重要意义。

尽管目前对北美大陆岩石圈的三维结构与形变驱动力有了一些新的认识(例如, Cao和Liu, 2021, 2024; Hightower等, 2024), 但对全球范围内岩石圈三维结构与岩石圈形变之间的联系仍不清楚。因此, 对地中海地区、亚洲东部和青藏高原及邻区等典型大陆变形区的相关研究还有待展开。在上述地区, 由于长期的热-化学演化与构造演化, 岩石圈可能具有非常复杂的三维结构, 例如横向厚度变化(图2a), 空间上密度与有效黏度的变化(例如, Li等, 2022; Bott等, 2024; Delph等, 2024)。这些三维结构, 尤其是地壳和岩石圈厚度在空间上的变化, 对大陆形变有着不可忽视的作用(Cao和Liu, 2024; Delph等, 2024)。但在采用薄板假设的研究中, 相关的三维效应并未得到充分的重视, 未来的相关研究应当对此进行进一步的定量探究。同时, 由深部俯冲板片驱动的地幔流可能与大陆变形区内的岩石圈发生复杂的相互作用。未来对于大陆岩石圈形变的研究可结合高精度各向异性地震层析成像模型(例如, Zhu等, 2020)等观测结果, 对岩石圈-软流圈相互作用进行

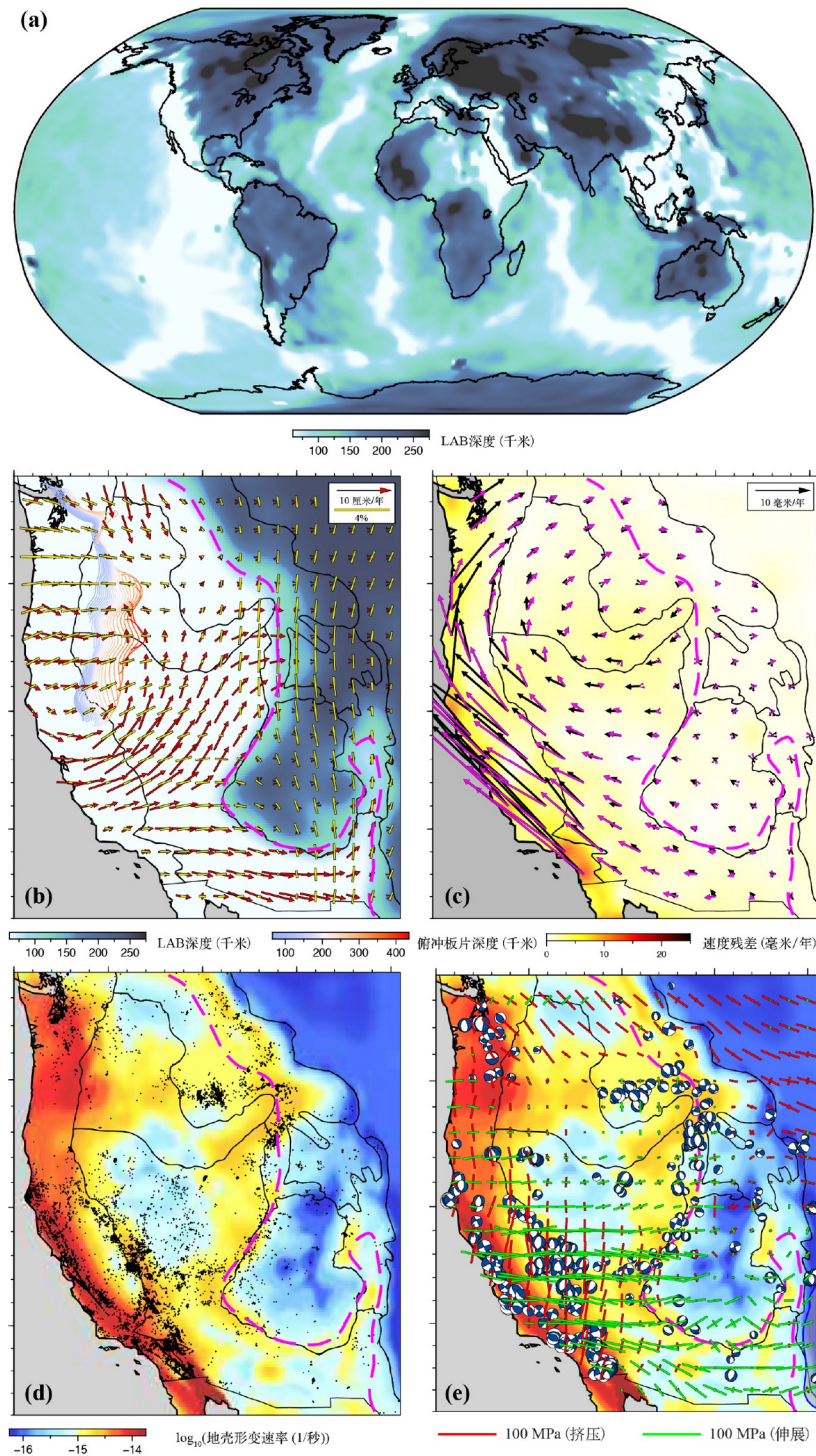


图 2 (网络版彩图)全球岩石圈厚度及三维岩石圈-对流地幔模型预测与美国西部地球物理观测资料对比

(a) 全球岩石圈厚度(Priestley等, 2024). (b)~(e)为三维岩石圈-对流地幔模型预测与地球物理资料对比(修改自Cao和Liu(2024)): (b) 150km深处模型预测的地幔流场与100km深处观测到的S波各向异性(Zhu等, 2020); (c) 模型预测(玫红色箭头)和基于GPS观测(黑色箭头)的地表速度场以及两者间的残差; (d) 模型预测的地壳应变率与陆内地震分布; (e) 模型预测的地壳应力场与高精度震源机制解. (b)~(e)中, 玫红色虚线为岩石圈厚度75km等值线, 近似地标志了美国西部岩石圈厚度突变处

进一步的定量研究、分析。此外, 目前基于三维岩石圈-对流地幔模型的研究多着眼于现今状态。随着地质与地球物理资料的积累, 对地质、地球物理过程了解的加深, 以及数值模拟技术的发展, 未来对大陆岩石圈形变的研究应当考虑随时间演化的岩石圈结构, 厘清大陆岩石圈形变与其驱动力的四维演化过程。

致谢 感谢两位审稿专家对本文提出的建设性修改意见。

参考文献

- 张倩文, 徐亚, 褚伟, 路书鹏. 2024. 青藏高原及邻区岩石圈应力状态特征及其地质意义. *中国科学: 地球科学*, 54: 1863–1882
- Bahadori A, Holt W E, Feng R, Austermann J, Loughney K M, Salles T, Moresi L, Beucher R, Lu N, Flesch L M, Calvelage C M, Rasbury E T, Davis D M, Potochnik A R, Ward W B, Hatton K, Haq S S B, Smiley T M, Wootton K M, Badgley C. 2022. Coupled influence of tectonics, climate, and surface processes on landscape evolution in southwestern North America. *Nat Commun*, 13: 4437
- Becker T W, Lowry A R, Faccenna C, Schmandt B, Borsa A, Yu C. 2015. Western US intermountain seismicity caused by changes in upper mantle flow. *Nature*, 524: 458–461
- Bird P, Liu Z, Rucker W K. 2008. Stresses that drive the plates from below: Definitions, computational path, model optimization, and error analysis. *J Geophys Res*, 113: B11406
- Bott J, Scheck-Wenderoth M, Kumar A, Cacace M, Noe S, Faleide J I. 2024. Density and strength variations in the mantle lithosphere affect the distribution of intraplate earthquakes. *Commun Earth Environ*, 5: 243
- Cao Z, Liu L. 2021. Origin of Three-Dimensional Crustal Stress Over the Conterminous United States. *J Geophys Res Solid Earth*, 126: e2021JB022137
- Cao Z, Liu L. 2024. Western US intraplate deformation controlled by the complex lithospheric structure. *Nat Commun*, 15: 3917
- Delph J R, Darin M H, Whitney D L, Cosca M A, Teyssier C, Kaymakc N, Eken T, Reid M R, Beck S L. 2024. Deep lithospheric controls on surface deformation and seismicity around the East Anatolian Fault Zone and A³ Triple Junction. *GSA Today*, 34: 4–12
- England P, Molnar P. 1997. Active deformation of Asia: From kinematics to dynamics. *Science*, 278: 647–650
- Faccenna C, Becker T W. 2010. Shaping mobile belts by small-scale convection. *Nature*, 465: 602–605
- Flesch L M, Holt W E, Haines A J, Shen-Tu B. 2000. Dynamics of the Pacific-North American Plate boundary in the western United States. *Science*, 287: 834–836
- Flesch L M, Haines A J, Holt W E. 2001. Dynamics of the India-Eurasia collision zone. *J Geophys Res*, 106: 16435–16460
- Ghosh A, Holt W E, Flesch L M, Haines A J. 2006. Gravitational potential energy of the Tibetan Plateau and the forces driving the Indian plate. *Geology*, 34: 321
- Ghosh A, Holt W E. 2012. Plate motions and stresses from global dynamic models. *Science*, 335: 838–843
- Ghosh A, Holt W E, Bahadori A. 2019. Role of large-scale tectonic forces in intraplate earthquakes of central and eastern North America. *Geochem Geophys Geosyst*, 20: 2134–2156
- Heidbach O, Rajabi M, Cui X, Fuchs K, Müller B, Reinecker J, Reiter K, Tingay M, Wenzel F, Xie F, Ziegler M O, Zoback M L, Zoback M. 2018. The World Stress Map database release 2016: Crustal stress pattern across scales. *Tectonophysics*, 744: 484–498
- Hightower E, Gurnis M, Mao W. 2024. Influence of Farallon Slab loading on intraplate stress and seismicity in eastern North America in the presence of pre-existing weak zones. *Geochem Geophys Geosyst*, 25: e2024GC011493
- Jones C H, Unruh J R, Sonder L J. 1996. The role of gravitational potential energy in active deformation in the southwestern United States. *Nature*, 381: 37–41
- Li W, Chen Y, Yuan X, Xiao W, Windley B F. 2022. Intracontinental deformation of the Tianshan Orogen in response to India-Asia collision. *Nat Commun*, 13: 3738
- Liu L, Hasterok D. 2016. High-resolution lithosphere viscosity and dynamics revealed by magnetotelluric imaging. *Science*, 353: 1515–1519
- Priestley K, Ho T, Takei Y, McKenzie D. 2024. The thermal and anisotropic structure of the top 300 km of the mantle. *Earth Planet Sci Lett*, 626: 118525
- Shinevar W J, Behn M D, Hirth G, Jagoutz O. 2018. Inferring crustal viscosity from seismic velocity: Application to the lower crust of Southern California. *Earth Planet Sci Lett*, 494: 83–91
- Wang Y, Cao Z, Peng L, Liu L, Chen L, Lundstrom C, Peng D, Yang X. 2023. Secular craton evolution due to cyclic deformation of underlying dense mantle lithosphere. *Nat Geosci*, 16: 637–645
- Zhu H, Yang J, Li X. 2020. Azimuthal anisotropy of the North American upper mantle based on full waveform inversion. *J Geophys Res Solid Earth*, 125: e2019JB018432

(责任编辑: 袁怀玉)