



特提斯地球动力系统研究新进展

丁林*

中国科学院青藏高原研究所, 青藏高原地球系统与资源环境全国重点实验室, 北京 100101

* 通讯作者, E-mail: dinglin@itpcas.ac.cn

收稿日期: 2023-10-30; 收修改稿日期: 2024-01-14; 接受日期: 2024-01-31; 网络版发表日期: 2024-02-23

特提斯洋(Tethyan Ocean)最早由奥地利地质学家 Eduard Suess在1893年提出. 欧洲地质学家通过对它的研究发展了现代地质学, 但并未对板块构造理论的诞生提供核心科学支撑(Trümpy, 2001). 随着研究的不断深入, 特提斯的概念从一个中生代的大洋演变成涵盖整个显生宙的原特提斯、古特提斯和新特提斯三个长期演化的大洋(图1; 吴福元等, 2020), 是全球显生宙以来大洋形成与消亡的核心所在. 在此研究过程中, 大陆深俯冲的发现(Chopin, 1984)、陆内变形(Tapponnier和Molnar, 1976)、大陆碰撞、高原隆升和气候变化(Molnar等, 1993)等新认识, 对发展板块构造理论做出了核心贡献. 但是, 板块构造理论的核心——板块运动驱动力问题并没有得到很好解决, 从而一直成为地球科学研究的前沿(郑永飞, 2023). 特提斯洋的打开、俯冲、消亡的演化历史为这一问题的解决提供了突破口. 此外, 特提斯域多样的地质、环境和古生物记录为从多圈层相互作用角度认识地球演化提供了丰富的素材, 是现今地球系统科学研究的重要基地.

中国是特提斯地质记录最为全面的地区. 特别是青藏高原, 虽然其地形地貌格局是在新生代最终形成, 但它具有从早古生代经晚古生代到中生代至新生代的长期地质演化历史(Zheng等, 2013), 是研究特提斯形成与演化的天然实验室. 我国科学家面临的一项势在必行的战略任务是, 如何充分利用我国在特提斯构造域研究的地域优势, 对特提斯前沿重大科学问题做出

重要贡献, 对地球系统科学发展做出有力支撑(吴福元等, 2020). 在此背景下, 国家自然科学基金委员会于2017年设立“特提斯地球动力系统”重大研究计划, 以期通过中国科学家的努力, 为板块构造理论的发展和地球系统科学理论的建立做出实质性贡献.

该重大研究计划执行以来, 中外科学家就特提斯的形成演化, 以及相关的资源与环境效应, 获得了大量新资料和新认识. 《中国科学: 地球科学》2023年12期出版的“特提斯地球动力系统”专题, 就是该重大研究计划的阶段性成果总结. 它重点围绕特提斯构造域地质特征和地球动力学模型、板块边界起始和形成机制、多陆块单向裂解-聚合过程及其资源、能源与古环境响应等重大科学问题, 系统梳理了在特提斯“单程列车”运行模型下, 特提斯系统特殊的地球动力学过程、地球深部地球物理和地球化学特征、浅表生物环境响应和特色资源能源富集机理等.

特提斯域各大陆地块在显生宙期间不断从位于南半球的冈瓦纳大陆向北半球的劳亚大陆漂移, 但这种块体裂离和漂移的具体过程和方式存在很大的不确定性. 滇西南位于特提斯构造域的东南段, 出露发育完整的特提斯地质记录, 是研究原-古特提斯的热点地区. 冯庆来等(2023)通过大地构造相分析, 重建了滇西南原、古特提斯演化历史. 原古特提斯形成于新元古代晚期, 在寒武纪苗岭世晚期(~505Ma)开始发生俯冲; 古特提斯洋壳形成于泥盆纪晚期, 于晚石炭世中期

中文引用格式: 丁林. 2024. 特提斯地球动力系统研究新进展. 中国科学: 地球科学, 54(3): 892–896, doi: 10.1360/SSTe-2023-0270

英文引用格式: Ding L. 2024. New advances in the study of Tethyan Geodynamic System. Science China Earth Sciences, 67(3): 874–878, <https://doi.org/10.1007/s11430-023-1266-1>

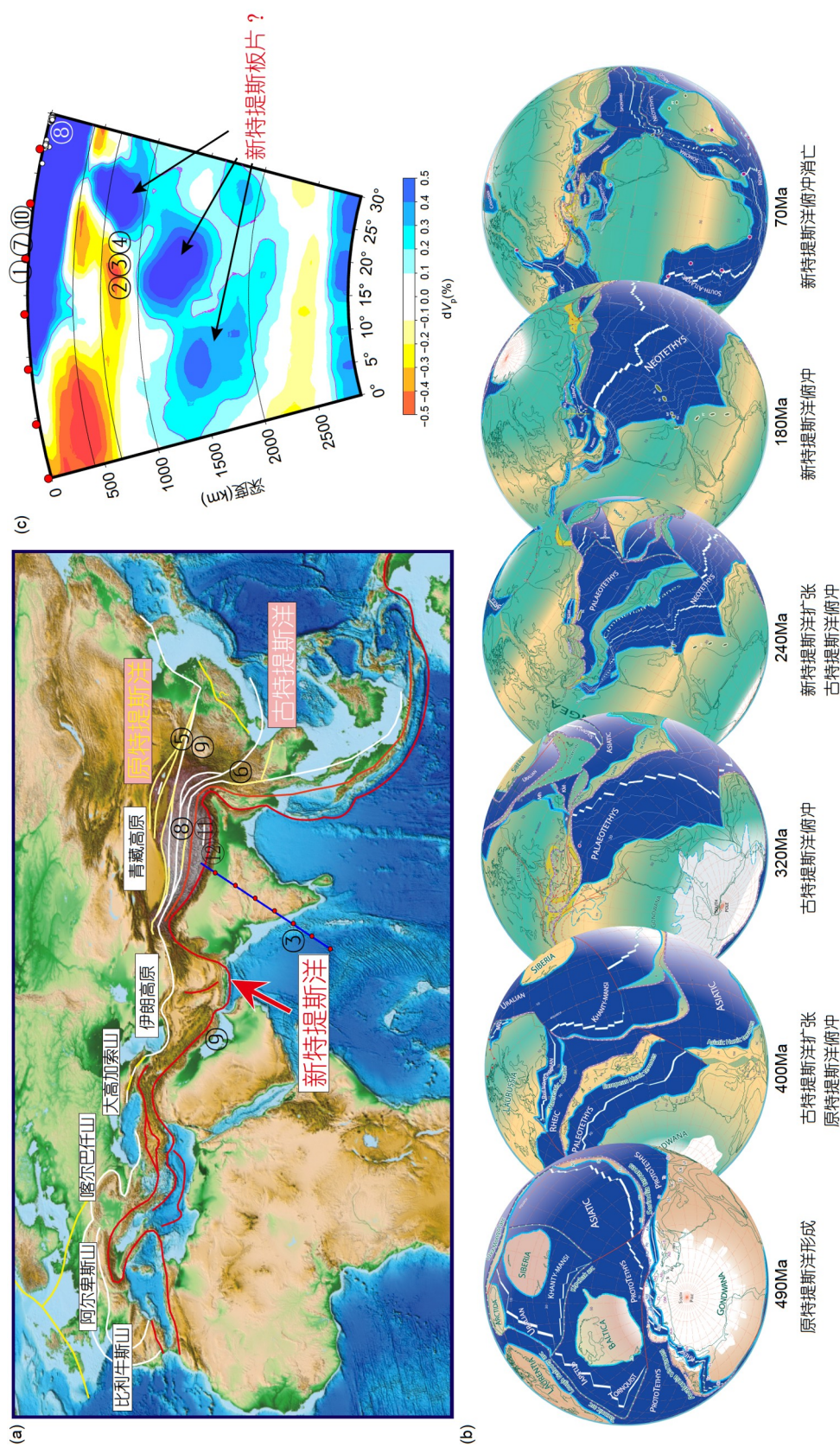


图 1 特提斯构造域大地构造格局及其四维演化

(a) 特提斯域主要缝合带(吴福元等, 2020); (b) 特提斯演化过程(Stampfli和Borel, 2004); (c) 新特提斯俯冲带形态. 图中的数字表示在《中国科学: 地球科学》2023年12期发表的“特提斯地球动力力系统”专题中所探讨的研究区域: ①, 万博等(2023); ②, 李忠海等(2023); ③, 王泽伟等(2023); ④, 刘希军等(2023); ⑤, 张强强等(2023); ⑥, 冯庆来等(2023); ⑦, 田力等(2023); ⑧, 梁晓峰等(2023); ⑨, 何治亮等(2023); ⑩, 宋玉财等(2023); ⑪, 刘通等(2023); ⑫, 胡方洪等(2023)

(~310Ma)向东发生俯冲, 约253Ma发生初始碰撞, 238~196Ma进入后碰撞演化阶段。因此, 滇西南古特提斯是在原特提斯后碰撞伸展裂谷盆地基础上演化形成(钟大赉, 1998)。

同样, 新特提斯洋的打开时间和打开机制也存在诸多争议(Shen等, 2003)。刘通等(2023)聚焦西藏雅江缝合带混杂岩中基性岩的形成时代和成因, 提出新特提斯洋的打开时间为早三叠世, 新特提斯洋中发育的多期洋岛型玄武质岩浆, 都是大陆张裂乃至裂解过程中地幔降压熔融产物; 结合前人有关雅江蛇绿岩、冈底斯弧岩浆岩和沉积岩的研究成果, 作者重建了雅江新特提斯洋的完整威尔逊旋回。

原、古、新特提斯大洋的消亡是地球显生宙历史上的重大地质事件。中央造山带是原特提斯洋和古特提斯洋闭合的产物(吴福元等, 2020), 它的内部广泛出露不同时代和类型的变质岩, 查明这些变质岩的变质温度(T)和压力(P)条件及其随时间和空间的变化, 可以系统揭示东特提斯构造域的构造演化历史以及汇聚板块边缘的特征。张强强等(2023)对中央造山带高级变质岩的形成温度、压力和年龄进行了系统梳理, 将变质T/P比值与年龄关联起来, 发现该板块汇聚带主要存在三个阶段的变质演化: (1) 早期低T/P比值的阿尔卑斯型蓝片岩相-榴辉岩相高压-超高压前进(峰期)变质作用; (2) 晚期中T/P比值的巴罗型中压角闪岩相-高压麻粒岩相前进(峰期)变质叠加; (3) 汇聚后高T/P比值的巴肯型低压角闪岩相-麻粒岩相叠加变质作用。根据这些变质T/P比值随年龄变化的共性特征, 作者提出中央造山带在显生宙期间经历了从冷俯冲经暖碰撞到热伸展的构造演化过程。

特提斯演化历史不仅是一部板块构造史, 也是一部地球系统演化历史, 特提斯洋提供了地球系统深、浅不同圈层物质与能量循环的关键记录。特提斯洋在经历数亿年的生长、演变和消亡后, 不同时期俯冲的特提斯洋板片在重力作用下下沉进入地幔深部, 这些板片在地幔中的体积、形态和空间位置不仅记录特提斯演化的当前状态, 而且间接记录了演化不同阶段的重要特征, 例如俯冲位置和时间顺序等(van der Meer等, 2012)。但不同层析成像模型间, 下地幔高速异常分布及形态存在显著差异, 如何对这些异常进行评估, 以圈定最可靠的异常范围, 是开展进一步研究的基础。王泽伟等(2023)分析总结主流全球尺度地震层析成像结

果, 揭示特提斯构造域下地幔1000~2000km深度范围存在一个北西-南东向分布的线性高地震波速异常体, 这可能代表了从晚侏罗世到早新生代新特提斯洋闭合这段时间内俯冲断离并沉入下地幔的新特提斯洋俯冲板片残留体。

特提斯域这种板块不断汇聚的特征也得到地球化学研究的支持。大洋玄武岩Pb同位素不均一性显著, 其中DUPAL异常是一个主体位于南半球的地幔同位素特征, 前人主要从空间尺度上解析现代大洋地幔域的DUPAL异常的成因。刘希军等(2023)研究认为, 自早古生代以来, 特提斯域地幔长期具有DUPAL异常及高Th/U的演化特征, 导致这一特征出现的根本原因是特提斯域经历的多期次冈瓦纳大陆裂解、洋盆打开、俯冲和频繁陆-陆碰撞, 使高Th/U特征的壳源物质不断加入并改造了地幔。当原特提斯和古特提斯地幔物质被深部上涌形成的地幔柱影响和改造时, 便呈现出部分极高的DUPAL异常特征。

板块汇聚产生何种样式的岩石圈结构, 是近年来大陆动力学研究的核心科学问题(Ding等, 2022)。青藏高原是认识大陆板块流变和探索这种动力过程的最佳研究对象。尽管青藏高原地壳结构探测近年来取得了系列进展(高锐等, 2022), 但地壳结构同高原隆升过程之间的关系尚缺少系统性的梳理。梁晓峰等(2023)对高原隆升演化模式及对应岩石圈变形特征进行了总结, 针对近年来高原地壳结构探测获得的新认识进行了总结和讨论, 如拉萨块体的下地壳高速层、地壳通道流的空间分布和深浅地壳变形解耦等特征, 并综合地质学和地球物理学观测资料探讨了高原隆升的可能机制。作者认为, 青藏高原隆升与下伏岩石圈拆沉之间存在相关关系, 其具体机制有待进一步研究。

关于特提斯系统向北的单向裂解和汇聚过程, 前人提出了全地幔对流驱动的地幔传送带模型(Becker和Faccenna, 2011)和俯冲板块重力驱动的单程列车汇聚模型(万博等, 2019)。李忠海等(2023)基于动力学模拟和地质观测, 针对特提斯系统演化所包含的大陆裂解、大洋俯冲、洋脊俯冲和大陆碰撞四个关键动力学过程, 系统分析了这些关键过程的控制因素和驱动力, 并最终提出了特提斯演化的“多引擎驱动”模型。这个模型假设, 多期次特提斯大洋板块的北向俯冲提供了地体北漂的主要驱动力, 但在地体碰撞拼合或洋脊俯冲等关键动力学节点上, 俯冲板片断离导致板片拉力

短缺, 而洋脊推力和大尺度地幔流牵引力等可诱发新的板块俯冲起始, 从而驱动特提斯系统持续的单向裂解和聚合过程。

特提斯构造域的深部过程对地表环境的影响是目前还较少讨论的重要科学问题(吴福元等, 2020)。尽管过去的研究已经注意到地球演化过程对地球表生环境的影响, 但大多强调的是俯冲带或大陆裂解的火山作用或者大陆风化作用对气候的影响, 地质历史上海陆分布变化本身对地球环境的影响还缺乏系统性梳理。万博等(2023)从地球系统的角度分析研究数据, 显示特提斯系统演化过程中不同陆块向北单向漂移汇聚, 陆块会不断穿越地球低纬度区, 低纬度区大陆面积明显增加对应显生宙以来的三次大冰期降温事件。因此推断通过板块运动使洋陆格局和能量分配发生转变, 从而使地球环境发生响应改变, 而随后的板块俯冲作用又会显著影响地球深部物质循环过程和效应, 造成了特提斯富集油气资源和还原性矿产。田力等(2023)通过对相关地质实证、大数据分析以及模型模拟结果的分析, 提出造山运动可通过改变海陆格局和大陆高度影响风化作用强弱, 进而影响大气二氧化碳浓度, 这可能是显生宙长时间尺度下, 大地构造控制古气候和古海洋环境条件变化的主要机制。因此, 特提斯构造域贯穿显生宙的持续构造和火山活动所带来的气候和环境效应及生物响应, 可以为揭示地球宜居性演变提供重要信息。

特提斯构造域是全球油气最富集的地区, 其常规可采油气储量占全球的比例近55%(朱日祥等, 2023)。但是, 这些油气资源时空分布存在巨大差异, 了解油气资源富集差异性的成因对指导未来资源勘探方向具有重要意义。何治亮等(2023)系统对比了波斯湾盆地和四川盆地构造演化全过程特征和盆地结构与油气成藏条件, 发现中-新元古代以来两大盆地的构造演化具有“早期相似、晚期各异”的特征, 并进一步提出板块大小位置、基底稳定性、构造改造的差异性是造成盆地之间油气差异富集的根本原因。特提斯构造域特别发育密西西比河谷型(MVT)铅锌矿床(铅锌储量占全球的62%)。前人研究表明, 有机质的还原作用在MVT铅锌矿成矿过程中发挥重要作用。特提斯构造域富集MVT铅锌矿床和油气资源, 以及它们与特提斯演化之间的内在联系, 是认识特提斯构造域矿产资源形成机制的重大科学问题。宋玉财等(2023)的研究提出, 通过

细菌或热作用, 富有机质地层和油气流体使溶解在流体中的硫酸盐形成还原硫, 进而导致铅锌硫化物沉淀成矿。特提斯洋长期处于近赤道低纬度地区, 形成富有机质沉积和油气资源, 为MVT矿床发育提供了重要条件。与MVT型矿床类似, 特提斯构造域还发育有不同时期的其他类型金属矿产, 我国华南和东南亚锡钨矿就是特提斯域较为特征的矿产之一(蒋少涌等, 2020)。此外, 近年来特提斯域稀有金属资源找寻取得系列突破。特别是在喜马拉雅地区, 与淡色花岗岩相关的锂、铍、铌钽资源研究取得重大突破(王汝成等, 2017; 秦克章等, 2021), 有望使该地区成为我国稀有金属资源的重要接替基地。胡方洪等(2023)在西藏吉隆淡色花岗岩中鉴别出铯沸石, 这是喜马拉雅淡色花岗岩稀有金属研究的又一重要进展。成分分析显示, 含铯沸石的钠长花岗岩锂铷铯含量均达到工业品位, 表明喜马拉雅淡色花岗岩具有巨大的铷铯资源潜力。

自“特提斯地球动力系统”重大研究计划实施以来, 中国科学家取得的研究成果已经以近千篇论文的形式发表在国内外学术期刊上。在《中国科学: 地球科学》“特提斯地球动力系统”专题集中展示的论文, 只是对这些成果的初步集成。这些论文充分体现出特提斯重大研究计划执行以来丰硕的科学产出, 其中有些是对诸如板块驱动力这样重大理论问题的贡献, 有些为地球系统科学理论提供框架和素材, 都不同程度地为国家经济社会发展所需要的资源和能源提供科学支撑。可以期望的是, 特提斯重大研究计划下一步集成总结将以此为基础, 进一步加强不同学科间的相互交叉融合, 从整体上认识地球不同圈层的相互作用机制, 以及这种作用如何影响地球的环境变化与资源富集, 从而从特提斯构造域的研究中凝练出具有普适意义的地球系统科学理论。要实现这个宏伟目标, 还需要深入检验前人提出的各种假说和模型, 认真甄别前人获得的第一手资料及其解释, 用第一性原理来认识特提斯构造域板块离散与汇聚的基本规律。

参考文献

- 冯庆来, 刘桂春, 甘正勤, 赵天宇, 瞿建威, 魏月华. 2023. 滇西南原-古特提斯演化研究. 中国科学: 地球科学, 53: 2767–2788
- 高锐, 周卉, 卢占武, 郭晓玉, 李文辉, 王海燕, 李洪强, 熊小松, 黄兴富, 徐啸. 2022. 深地震反射剖面揭露青藏高原陆-陆碰撞与地壳

- 生长的深部过程. 地学前缘, 29: 14–27
- 何治亮, 金之钧, 李双建, 白国平, 吕雪雁, 郭金瑞, 高键, 殷进垠, 李英强, 郑定业. 2023. 特提斯演化控制下盆地原型、改造与油气差异富集——基于波斯湾盆地与四川盆地的比较分析. 中国科学: 地球科学, 53: 2914–2936
- 胡方泱, 刘小驰, 何少雄, 王佳敏, 吴福元. 2023. 喜马拉雅淡色花岗岩铷钽成矿作用. 中国科学: 地球科学, 53: 2868–2895
- 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
- 梁晓峰, 陈凌, 田小波, 褚杨, 李文涛. 2023. 青藏高原地壳结构特征指示的高原隆升机制. 中国科学: 地球科学, 53: 2808–2829
- 刘通, 刘传周, 吴福元, 冀文斌, 张畅, 张维琪, 张振宇. 2023. 新特提斯洋的打开时间和机制: 雅江缝合带混杂岩的约束. 中国科学: 地球科学, 53: 2846–2867
- 刘希军, 许继峰, 肖文交, 刘鹏德. 2023. 特提斯地幔域DUPAL异常成因及地球动力学意义. 中国科学: 地球科学, 53: 2750–2766
- 蒋少涌, 赵葵东, 姜海, 苏慧敏, 熊索菲, 熊伊曲, 徐耀明, 章伟, 朱律运. 2020. 中国钨锡矿床时空分布规律、地质特征与成矿机制研究进展. 科学通报, 65: 3730–3745
- 秦克章, 赵俊兴, 何畅通, 施哲哲. 2021. 喜马拉雅带琼嘉岗超大型伟晶岩型锂矿的发现及意义. 岩石学报, 37: 3277–3286
- 宋玉财, 杨志明, 庄亮亮. 2023. 特提斯域富有机质沉积: 域内密西西比河谷型(MVT)铅锌巨量发育的重要条件. 中国科学: 地球科学, 53: 2896–2913
- 田力, 宋海军, 刘羽初, 吴玉祥, 楚道亮, 宋虎跃. 2023. 显生宙古海洋环境和气候波动与特提斯演化. 中国科学: 地球科学, 53: 2830–2845
- 万博, 吴福元, 陈凌, 赵亮, 梁晓峰, 肖文交, 朱日祥. 2019. 重力驱动的特提斯单向裂解-聚合动力学. 中国科学: 地球科学, 49: 2004–2017
- 万博, 吴福元, 朱日祥. 2023. 特提斯演化对地球环境演变的影响. 中国科学: 地球科学, 53: 2687–2700
- 王汝成, 吴福元, 谢磊, 刘小驰, 王佳敏, 杨雷, 赖文, 刘晨. 2017. 藏南喜马拉雅淡色花岗岩稀有金属成矿作用初步研究. 中国科学: 地球科学, 47: 871–880
- 王泽伟, 胡佳顺, 包雪阳, 俞春泉, 杨英杰, 陈晓非. 2023. 全球地震层析成像揭示深部地幔特提斯洋俯冲板片残留. 中国科学: 地球科学, 53: 2789–2807
- 吴福元, 万博, 赵亮, 肖文交, 朱日祥. 2020. 特提斯地球动力学. 岩石学报, 36: 1627–1674
- 张强强, 高晓英, 陈仁旭, 郑永飞. 2023. 东特提斯构造域变质演化及其构造启示. 中国科学: 地球科学, 53: 2723–2749
- 郑永飞. 2023. 21世纪板块构造. 中国科学: 地球科学, 53: 1–40
- 钟大赉. 1998. 滇川西部古特提斯造山带. 北京: 科学出版社
- 朱日祥, 张水昌, 万博, 张旺, 李勇, 王华建, 罗贝维, 柳宇柯, 何治亮, 金之钧. 2023. 新特提斯域演化对波斯湾超级含油气盆地形成的影响. 石油勘探与开发, 50: 1–11
- Becker T W, Faccenna C. 2011. Mantle conveyor beneath the Tethyan collisional belt. *Earth Planet Sci Lett*, 310: 453–461
- Chopin C. 1984. Coesite and pure pyrope in high-grade blueschists of the Western Alps: A first record and some consequences. *Contr Mineral Petrol*, 86: 107–118
- Ding L, Kapp P, Cai F, Garzione C N, Xiong Z, Wang H, Wang C. 2022. Timing and mechanisms of Tibetan Plateau uplift. *Nat Rev Earth Environ*, 3: 652–667
- Molnar P, England P, Martinod J. 1993. Mantle dynamics, uplift of the Tibetan Plateau, and the Indian Monsoon. *Rev Geophys*, 31: 357–396
- Shen S Z, Shi G R, Archbold N W. 2003. A Wuchiapingian (Late Permian) brachiopod fauna from an exotic block in the Indus-Tsangpo suture zone, southern Tibet, and its palaeobiogeographical and tectonic implications. *Palaeontology*, 46: 225–256
- Stampfli G M, Borel G D. 2004. The TRANSMED transects in space and time: Constraints on the paleotectonic evolution of the Mediterranean domain. In: Cavazza W, Roure F, Spakman W, Stampfli G M, Ziegler P A, eds. In the Transmed Atlas. The Mediterranean Region from Crust to Mantle: Geological and Geophysical Framework of the Mediterranean and the Surrounding Areas. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. 53–80
- Tapponnier P, Molnar P. 1976. Slip-line field theory and large-scale continental tectonics. *Nature*, 264: 319–324
- Trümpy R. 2001. Why plate tectonics was not invented in the Alps. *Int J Earth Sci*, 90: 477–483
- van der Meer D G, Torsvik T H, Spakman W, van Hinsbergen D J J, Amaru M L. 2012. Intra-Panthalassa Ocean subduction zones revealed by fossil arcs and mantle structure. *Nat Geosci*, 5: 215–219
- Zheng Y F, Xiao W J, Zhao G. 2013. Introduction to tectonics of China. *Gondwana Res*, 23: 1189–1206

(责任编辑: 郑永飞)