新特提斯洋演化与动力过程

朱日祥*, 赵盼, 赵亮

中国科学院地质与地球物理研究所, 岩石圈演化国家重点实验室, 北京 100029

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

收稿日期: 2021-06-01; 收修改稿日期: 2021-08-30; 接受日期: 2021-09-17; 网络发表日期: 2021-11-04

国家自然科学基金项目(批准号: 41688103)和中国科学院国际合作项目(编号: GJHZ1776)资助

摘要 新特提斯洋主要存在于中生代, 是位于劳亚大陆与冈瓦纳大陆之间的一个向东开口的海湾状大洋. 实际上, 从二叠纪起, 多个微陆块从冈瓦纳大陆北缘裂解, 初始新特提斯洋开始形成. 随着微陆块群的北向漂移, 新特提斯洋逐步扩张, 达到最大化. 微陆块群在晚三叠世开始与欧亚大陆南缘碰撞拼合, 之后, 新特提斯洋开始向北俯冲到新形成的欧亚大陆南缘之下. 随着冈瓦纳大陆的进一步裂解, 非洲-阿拉伯板块、印度板块和澳大利亚板块以不同速度向北漂移. 到新生代, 这些板块与欧亚大陆碰撞, 新特提斯洋消失, 形成全球最为显著的阿尔卑斯-扎格罗斯-喜马拉雅造山带. 新特提斯洋由西向东表现出不同的大地构造演化特征: 地中海地区以多洋盆扩张-双向俯冲和微陆块碰撞为特征, 中东地区表现为北向俯冲和沿扎格罗斯缝合带的穿时碰撞, 青藏高原南部和东南亚地区以多块体逐渐裂解和多阶段碰撞为特点. 我们提出, 新特提斯洋岩石圈板块北向漂移的主要驱动力是俯冲板片拖拽力, 深部地幔对流与非自由边界条件下冈瓦纳大陆主体围绕欧拉极(西非)的逆时针旋转也是影响特提斯洋演化的重要因素.

关键词 特提斯构造域, 新特提斯洋, 大陆裂解与汇聚, 冈瓦纳大陆, 非自由边界, 欧拉极, 深部动力学

1 引言

特提斯构造域东起澳大利亚东北部, 经东南亚、印缅山脉进入青藏高原南缘、伊朗高原, 向西经地中海直达欧洲西部, 长达15000km(图1), 是全球大陆地质现象最丰富、特提斯洋发育最典型、矿产和油气资源最丰富的地域(黄汲清等, 1984; Sengör, 1987; 何治亮和刘继顺, 1996; 张国伟等, 1996; 侯增谦, 2003; 莫宣学和潘桂棠, 2006; 任纪舜等, 2006; Wang等, 2008; 张培震, 2008; 邓军等, 2010; 许志琴等, 2011; Hou和Zhang, 2015; 丁林等, 2017; 吴福元等, 2020). 古特提斯洋和新特提斯洋均消失在特提斯构造域, 这些古大洋

在不同时期曾经存在于北部劳亚(欧亚)大陆与南部冈瓦纳大陆之间(Suess, 1893; Sengör, 1979, 1987; 黄汲清等, 1984), 两个古大洋在不同时期的演化和最终闭合导致了特提斯域复杂的构造特征.

特提斯洋最初由奥地利地质学家Melchior Neumayr在1885年基于分布在加勒比-东南亚一线的侏罗纪海相沉积识别出, 并命名为“中央地中海”(Neumayr, 1885); Suess(1893)以古希腊海神的名字将其重新命名为“Tethys (特提斯)”, 从此开启了特提斯洋的研究历史. 20世纪前半叶, 普遍认为特提斯洋代表劳亚与冈瓦纳大陆之间的狭长海道(Argand, 1924; Bucher, 1924; Stille, 1948). 20世纪60年代, Wilson(1963)提出

中文引用格式: 朱日祥, 赵盼, 赵亮. 2022. 新特提斯洋演化与动力过程. 中国科学: 地球科学, 52(1): 1–25, doi: 10.1360/SSTe-2021-0147

英文引用格式: Zhu R, Zhao P, Zhao L. 2022. Tectonic evolution and geodynamics of the Neo-Tethys Ocean. Science China Earth Sciences, 65(1): 1–24, <https://doi.org/10.1007/s11430-021-9845-7>

图1 特提斯构造域分布图

图中显示古特提斯、新特提斯缝合带名称与位置。底图据美国国家海洋和大气管理局NOAA数据库。缝合带位置及名称据吴福元等(2020)和 van Hinsbergen等(2020)

了地壳运动模式并重建了二叠纪-三叠纪潘吉亚超大陆, 提出特提斯洋为位于劳亚大陆与冈瓦纳大陆之间向东敞开的三角形大洋。

Stöcklin(1968, 1974)根据分别发育在伊朗北部Alborz和南部扎格罗斯地区的中生代和新生代区域不整合的地质记录, 提出古特提斯洋和新特提斯洋的概念, 并被Sengör(1979)用来解释北方劳亚大陆与南方冈瓦纳大陆之间存在于不同时期并相互关联的两个大洋, 即古生代期间存在的古特提斯洋和中生代期间存在的新特提斯洋, 二者之间由基梅里陆块群分隔。本文采用特提斯两分方案, 其中新特提斯洋早期主要依据三叠纪-侏罗纪海相地层确认, 即定义为基梅里陆块群南侧的特提斯洋。板块构造理论建立之后(McKenzie和Parker, 1967; Le Pichon, 1968; Morgan, 1968), 阿尔卑斯-喜马拉雅造山带被认为代表了新特提斯洋晚期演化到最终闭合的位置(Dewey等, 1973; Sengör, 1979, 1987; 黄汲清等, 1984), 并由此掀起在板块构造理论框架下的新特提斯洋研究热潮。

新特提斯洋是劳亚大陆与冈瓦纳大陆之间最后消失的大洋, 主要存在于中生代, 局部跨越晚古生代到早新生代。新特提斯构造域也是全球最重要的金属矿产和油气等资源能源战略要地。因此, 对新特提斯构造域形成和演化历史进行深入研究既具有重要的科学意义, 又是国家战略需求。本文聚焦新特提斯洋的演化过程, 探讨其开启、扩张及最终闭合消亡的动力学机制, 为域内资源能源勘探开发提供新的认知。

2 新特提斯洋的开启与扩张

从早二叠世开始, 基梅里陆块群(从东向西主要包括滇缅泰马陆块、拉萨陆块、南羌塘陆块、阿富汗陆块和伊朗陆块等)从冈瓦纳北缘逐步裂解(图2a), 导致新特提斯洋的逐步打开(Sengör, 1979; Scotese和Golonka, 1993; Stampfli和Borel, 2002; Angiolini等, 2003a)。印度北部的Panjal Traps玄武岩(290Ma)代表冈瓦纳大陆北缘早二叠世大火成岩省, 并延伸至羌塘、阿曼等

地区(Dan等, 2021). 一般将这些玄武岩看做新特提斯洋最初打开的岩浆岩证据(Kumar等, 2018; Shellnutt, 2018; Dan等, 2021). 关于二叠纪时期的塔里木大火成岩省和峨眉山大火成岩省是否属于冈瓦纳大陆裂解导致新特提斯洋打开期间岩浆活动的产物, 还有待进一步确定. 这是由于它们在地球化学成分上更类似于洋岛玄武岩, 而不是洋中脊玄武岩. 已有研究显示, 新特提斯洋的开启由东至西基本同时发生, 但各个区段具有不同的大陆裂解和洋壳演化特征. 特别是在东段的青藏高原南部地区, 由于南羌塘陆块和拉萨陆块的不同漂移过程, 新特提斯洋在该段包括班公-怒江洋和雅江洋两个分支(Zhu等, 2013; 吴福元等, 2020).

2.1 东特提斯各陆块的裂解和漂移历史

滇缅泰马、印支、羌塘和拉萨陆块在早古生代均属于冈瓦纳大陆(Metcalf, 2013). 石炭纪-早二叠世, 滇缅泰马陆块以冰海相杂砾岩为主, 具有亲冈瓦纳的冷水生物群(Ingavat和Douglass, 1981; Stauffer和Lee, 1986; Rao, 1988; Ampaiwan等, 2009), 位于冈瓦纳大陆北缘南半球较高纬度地区(Fang等, 1989; Huang和Opdyke, 1991). 二叠纪中期, 滇缅泰马陆块已经漂移到 13.0°S (Zhao等, 2020), 表明新特提斯洋东段(班怒洋的东延)从二叠纪早期就开始扩张(图2a). 中晚三叠世, 滇缅泰马陆块位于 $15^{\circ}\text{N}\sim 20^{\circ}\text{N}$ (Zhao J等, 2015, 2020), 已与印支陆块发生碰撞, 指示古特提斯主洋盆昌宁-孟连段在晚三叠世已经关闭(图2b).

二叠纪早期, 印支陆块和北羌塘陆块已从冈瓦纳大陆裂解, 并漂移到南半球低纬度地区. 印支陆块在280Ma位于 $21.2^{\circ}\pm 5.7^{\circ}\text{S}$, 北羌塘陆块在297Ma位于 $21.9^{\circ}\pm 4.7^{\circ}\text{S}$ (图2a; Song等, 2017; Yan等, 2018). 印支陆块晚三叠世位于 30°N 附近, 已与欧亚大陆南缘发生碰撞拼合(Yan等, 2017, 2019). 北羌塘陆块晚三叠世漂移到 $31.7\pm 3.0^{\circ}\text{N}$, 与欧亚大陆南缘沿金沙江缝合带发生碰撞, 标志着该段古特提斯洋的闭合(Song等, 2015). 据此, 古特提斯洋在青藏高原的最北侧缝合位置应为北羌塘陆块北侧的西金乌兰-金沙江缝合带, 而非南北羌塘之间的龙木错-双湖缝合带. Metcalfe(2011)基于南羌塘陆块晚石炭-早二叠世以冰海相沉积物为主, 并含有与冈瓦纳大陆相似的冷水动物群的事实, 提出南羌塘陆块至少在早二叠世仍靠近冈瓦纳大陆; 而上二叠统以含华夏动物群的浅海沉积物为主, 表明此

时南羌塘陆块已经与冈瓦纳大陆分离(Metcalf, 2013), 向北漂移并逐渐靠近华南、印支等陆块. 在羌塘中部, 上三叠统不整合覆盖在龙木错-双湖蛇绿混杂岩之上. 这一地质证据以及南羌塘陆块古地磁数据(宋春彦等, 2012)表明, 南羌塘陆块于晚三叠世漂移至欧亚大陆南缘, 并与北羌塘陆块沿龙木错-双湖缝合带发生碰撞.

古地磁研究显示, 拉萨陆块早二叠世已经从冈瓦纳大陆北缘裂开(图2a; Ran等, 2012). 拉萨陆块在整个三叠纪均位于约 $17^{\circ}\text{S}\sim 20^{\circ}\text{S}$ (图2b, 3; Zhou等, 2016), 在180Ma时向北漂移到赤道附近(Li等, 2016), 到白垩纪早期已经到达 $\sim 15^{\circ}\text{N}$ 并与羌塘陆块发生碰撞(图2c), 导致班怒洋关闭(Yan等, 2016; Ma等, 2018), 此时新特提斯洋达到其最大宽度 $\sim 7000\text{km}$ (Ma等, 2016; 图3). 拉萨陆块和羌塘陆块之间的班公-怒江洋可能是由东向西穿时闭合的, 西段于早白垩世早期开始闭合, 东段可能持续至早白垩世晚期(Fan等, 2018; Jiang等, 2021).

随着新特提斯洋的扩张, 东冈瓦纳北缘在侏罗纪晚期分裂出两个微陆块(图2c), 分别为西缅陆块和印尼陆块(Hall, 2012). 由于西缅与拉萨两陆块具有相似的岩浆岩组合, 一些学者提出西缅是拉萨陆块在东南亚的延伸(Mitchell, 1993; Liu等, 2016), 二者一起在晚白垩世与欧亚大陆碰撞(Heine等, 2004). 但Advokaat等(2018)认为, 西缅陆块在构造上与苏门答腊Woyla岩浆弧相对应. Westerweel等(2019)的古地磁结果表明, 晚白垩世早期西缅陆块位于赤道附近, 与喜马拉雅西构造结附近的科西斯坦-拉达克岩浆弧等组成了一条跨喜马拉雅的特提斯岛弧(图2d), 直到始新世才与滇缅泰马陆块发生碰撞(图2e, 2f). 印尼陆块(主要包括东爪哇和苏拉威西)具有与澳大利亚相似的基底与碎屑锆石U-Pb年龄谱(Hall, 2012; Zhang等, 2021), 晚侏罗世从澳大利亚北缘裂解后快速向北漂移, 在晚白垩世拼贴到亚洲大陆东南缘(图2d, 2e; Wensink, 1994; Hall, 2012).

2.2 中东及邻区特提斯陆块的裂解和漂移历史

伊朗陆块在晚奥陶世-早石炭世与冈瓦纳大陆具有一致的古地磁极(Wensink等, 1978; Wensink, 1983; van der Voo, 1993; Muttoni等, 2009), 说明伊朗陆块当时位于西冈瓦纳大陆的边缘. 虽然伊朗陆块缺乏晚石炭世-早二叠世古地磁结果, 但伊朗陆块北部Alborz地区中-晚二叠世Ruteh组火山岩的古地磁结果显示, 中-

图2 新特提斯洋不同演化阶段板块重建图

劳亚和冈瓦纳古陆主要块体位置修改自Matthews等(2016), 特提斯洋南北两侧微陆块不同阶段的古地理位置是综合古地磁数据和地质证据的结果(参考文献见正文), Tuzo LLSVP(Tuzo大型低速剪切波区域)位置参考Torsvik等(2014). (a) 早二叠世, 基梅里陆块群(包括滇缅泰马、拉萨、南羌塘、阿富汗、伊朗等陆块)由冈瓦纳大陆北缘裂解, 新特提斯洋打开(Scotese和Golonka, 1993; Stampfli和Borel, 2002; Angiolini等, 2003a). (b) 晚三叠世, 除拉萨陆块, 基梅里陆块群的其他陆块已与欧亚大陆南缘发生碰撞, 导致古特提斯洋关闭; 拉萨陆块此时位于19°S~16°S, 与欧亚大陆之间以新特提斯的分支班怒洋分隔; 西段的伊兹米尔-安卡拉洋、Meliata-Maliac洋和Pindos分隔欧亚大陆南缘、Anatoliade-Tauride陆块和Adria陆块等. (c) 早白垩世早期, 新特提斯洋持续俯冲至欧亚大陆南缘; 西缅甸陆块和印度尼西亚陆块由澳大利亚北缘裂解出来; 拉萨陆块漂移至北纬中低纬度地区, 与羌塘陆块碰撞, 导致班怒洋闭合; 西段由于中大西洋以及Ligurian-Piemont洋(阿尔卑斯特提斯洋)打开, 非洲-阿拉伯板块与北美和欧亚大陆分开; Vadar洋和伊兹米尔-安卡拉洋向北俯冲至欧亚大陆之下; 新特提斯洋南支向北俯冲至Anatoliade-Tauride陆块之下; 东西冈瓦纳开始分裂. (d) 早白垩世末, 拉萨陆块和印度尼西亚陆块已拼贴至欧亚大陆南缘, 新特提斯洋向北俯冲至新的欧亚大陆南缘; 新特提斯洋内俯冲, 东段俯冲至西缅甸陆块之下, 西段产生科西斯坦-拉达克岛弧. 东西冈瓦纳裂解, 印度与非洲-阿拉伯和澳大利亚-南极分离; 南大西洋打开, 非洲-阿拉伯与南美分裂; Valais洋已打开, Iberia-Brianconnais微陆块与欧亚大陆分裂; Ligurian-Piemont洋向南俯冲至Adria陆块之下; Pindos洋向东北俯冲至Korabi-Pelagoniane微陆块之下, 新特提斯洋南支向北俯冲至Anatoliade-Tauride陆块之下. (e) 晚白垩世晚期, 西缅甸陆块和科西斯坦-拉达克岛弧拼贴至欧亚大陆南缘, 新特提斯洋持续俯冲至欧亚大陆南缘; 特提斯喜马拉雅与印度次大陆分裂, 形成北印度海; Ligurian-Piemont洋向南俯冲至Adria陆块之下; 伊兹米尔-安卡拉洋向北俯冲至欧亚大陆南缘, 新特提斯洋南支向北俯冲至Anatoliade-Tauride陆块之下. (f) 早始新世, 印度已与欧亚大陆发生碰撞, 雅鲁藏布江洋闭合; Adria陆块和Anatoliade-Tauride陆块均已与欧亚大陆南缘碰撞; 新特提斯洋向北俯冲至Anatoliade-Tauride陆块、伊朗陆块和阿富汗陆块之下. (g) 现今大地构造格局

晚二叠世伊朗陆块古纬度为 $12^{\circ}\pm 2^{\circ}\text{S}$, 位于阿拉伯陆块北部, 已与阿拉伯陆块分离(Besse等, 1998). 阿拉伯陆块北缘发育的早二叠世双峰式火山岩(Gray等, 2005)被认为是大陆裂谷事件和新特提斯洋初始形成的标志(Béchenec等, 1990; Blendinger等, 1990; Stampfli等, 2001; Maury等, 2003). 此外, 对阿拉伯陆块北缘二叠纪沉积岩的研究显示, 下二叠统地层超覆于下伏不同时代地层之上, 反映一次显著的海侵事件, 代表新特提斯洋的初始扩张(Angiolini等, 2003a). 中二叠世海侵范围进一步增大, 代表一次显著的构造-海平面变化事件, 被认为与新特提斯洋扩张导致的快速热沉降有关(Angiolini等, 2003b). 综合以上结果, 早二叠世早期的大陆张裂事件可能并未造成伊朗陆块从冈瓦纳大陆的

裂解, 新特提斯洋的形成和伊朗陆块的裂解最终发生于早-中二叠世(图2a).

阿富汗陆块古地磁研究相对较少, 但一般认为其与伊朗陆块具有相似的运动特征(Stampfli和Borel, 2002; Torsvik和Cocks, 2016), 在早-中二叠世由冈瓦纳北缘裂解(图2a). 虽然阿富汗陆块晚石炭世-早二叠世初具有与冈瓦纳大陆一致的冷水型动物(Boulin, 1988), 不同于同时代伊朗陆块之上的暖水型动物, 但这种古生物的不同与冈瓦纳北缘的展布方向有关(Torsvik和Cocks, 2016): 在二叠纪, 位于南半球的冈瓦纳大陆北缘呈北西-南东向展布, 伊朗陆块位于阿富汗陆块西北方向, 具有更低的古纬度, 因而出现了暖水型动物.

图3 冈瓦纳大陆北缘裂解各陆块晚石炭世-新生代古纬度变化图

基梅里陆块群位于冈瓦纳大陆北缘的南半球中纬度地区。早二叠世起, 基梅里陆块群从冈瓦纳大陆北缘裂解, 新特提斯洋打开。晚二叠世-早三叠世, 基梅里陆块群快速向北漂移, 新特提斯洋快速扩张, 晚三叠世与欧亚大陆发生碰撞, 导致古特提斯洋闭合。拉萨陆块三叠纪稳定位于 20°S ~ 16°S , 随后逐渐向北漂移, 新特提斯洋(雅江洋)扩张。拉萨陆块早白垩世早期与欧亚大陆发生碰撞, 导致班怒洋闭合, 此时新特提斯洋达到最大宽度~7000km。随后, 俯冲带跃迁至拉萨陆块南侧, 雅江洋进入俯冲消减阶段。早白垩世早期, 印度大陆快速向北漂移, 特提斯喜马拉雅在~75Ma从印度北缘裂解, 北印度海打开, 特提斯喜马拉雅快速向北漂移, ~61Ma与拉萨南缘发生碰撞。印度大陆在~50Ma与欧亚大陆南缘发生碰撞, 新特提斯洋最终闭合。参考文献见正文

自晚二叠世至早三叠世, 新特提斯洋快速扩张, 洋中脊扩张速率可达 $100\sim 140\text{km Myr}^{-1}$, 导致伊朗陆块和阿富汗陆块快速北移(Besse等, 1998; Muttoni等, 2009; Torsvik和Cocks, 2016)。至早三叠世, 两个陆块已向北漂移至赤道附近(图3)。在早-中三叠世, 伊朗和阿富汗陆块继续向北快速移动, 并于晚三叠世早期与欧亚大陆南缘发生碰撞(Besse等, 1998; Muttoni等, 2009), 导致古特提斯洋中段闭合(图2b, 3)。

2.3 地中海地区多洋盆体系

新特提斯洋在地中海地区经历了多期次大陆张裂、洋底扩张和俯冲作用(Critelli, 2018)。在中二叠世, 伴随古特提斯洋俯冲至欧亚大陆南缘以及新特提斯洋的打开, 欧洲大陆东南部形成多个小洋盆, 例如Meliata-Maliac、Pindos等(Channell和Kozur, 1997; Moix等, 2008; van Hinsbergen等, 2020)。对这些洋盆的形成机制, 存在古特提斯洋北向俯冲导致的弧后扩张、单一

裂谷盆地和多个平行裂谷盆地等不同认识(Dercourt等, 1986; Stampfli和Borel, 2002; Papanikolaou, 2013; Robertson等, 2013)。洋盆打开导致多个微陆块从欧亚大陆南缘裂解出来, 如Anatolide和Korabi-Pelagonian微陆块(Robertson等, 2013; Okay等, 2020)。与此同时, 新特提斯洋的打开导致Tauride和Adria等陆块从冈瓦纳大陆北缘裂解(Channell等, 1979; Stampfli等, 2001; Kock等, 2007)。至晚三叠世(图2b), 欧洲南部形成微陆块分隔多洋盆的古地理格局(Stampfli和Borel, 2002; Moix等, 2008; Muttoni等, 2015)。洋盆的数量、位置以及各个洋盆的演化历史一直是该地区特提斯洋演化研究的重点, 但目前对这些洋盆的认识仍存在很大争议。欧洲大陆南缘Meliata-Maliac洋盆的打开在中三叠世达到顶峰, 在晚三叠世开始古大洋板片的俯冲作用, 早侏罗世被Vardar洋取代(Channell和Kozur, 1997), 分隔欧亚大陆和南部Korabi-Pelagonian陆块(图2b)。Pindos洋位于Korabi-Pelagonian陆块南部, 其洋壳扩张开

始于早三叠世, 并贯穿整个三叠纪, 其西南部为Adria陆块(图2b; Channell和Kozur, 1997; Robertson等, 2013).

在中侏罗世(~170Ma), 中大西洋的逐渐打开导致北美大陆和非洲大陆分离(Labails等, 2010; Torsvik等, 2012; Biari等, 2017), 并影响到地中海地区洋盆的演化(图2c). 中大西洋向东扩展至欧亚大陆南缘, 引发欧洲大陆南部阿尔卑斯新特提斯洋(又称Ligurian-Piemont洋)的打开(图2c; Martin等, 1994; De Wever和Baumgartner, 1995; Moix等, 2008; Roda等, 2019). 到早白垩世晚期, 阿尔卑斯新特提斯洋北侧裂开形成新的Valais洋盆, 洋盆向西扩展至与中大西洋相连(图2d; Bousquet等, 2002; Sibuet等, 2004; Saspiturry等, 2021), 导致Iberia-Briançonnais微陆块从欧亚大陆南缘裂解, 在早白垩世末于西阿尔卑斯地区形成Iberia-Briançonnais微陆块分隔阿尔卑斯新特提斯洋和Valais洋的构造格局(图2d; Schmid等, 2004; Liati等, 2005; Froitzheim, 2001; Tiepolo等, 2014). 与此同时, 新特提斯洋逐步扩张, Adria陆块向北移动(Moix等, 2008). 北部阿尔卑斯新特提斯洋和南部新特提斯洋的扩张, 导致中间Vardar和Pindos洋盆处于挤压环境, 并触发Vardar洋和Pindos洋分别于晚侏罗世和早白垩世开始向北俯冲(图2c; Channell和Kozur, 1997; Robertson等, 2013; Degnan和Robertson, 2006).

3 新特提斯洋的闭合过程

早白垩世早期(~134Ma), 非洲陆块和南美洲陆块在最南端开始分离, 并逐步向北扩展, 导致南大西洋于~100Ma左右完全打开并与中大西洋联通(Channell等, 1995; Torsvik等, 2009; Granot和Dyment, 2015). 南大西洋打开后, 非洲-阿拉伯陆块逐渐向东北方向漂移并发生逆时针旋转. 在早白垩世(~132Ma), 印度陆块从冈瓦纳大陆裂解并不断向北漂移, 新特提斯洋逐渐缩小, 开始其闭合过程(图2和3).

3.1 地中海地区: 双向俯冲汇聚

地中海地区新特提斯洋的闭合过程可概括为双向俯冲汇聚导致多阶段洋盆闭合. 西北段以Ligurian-Piemont洋为主体的阿尔卑斯新特提斯洋向南俯冲, 并于晚白垩世-早中新世逐渐闭合; 东南部Pindos和Vardar

等洋盆向北/西北俯冲, 于晚古新世-早中新世闭合(Criellini, 2018).

对于阿尔卑斯新特提斯洋的闭合过程, Handy等(2010, 2015)认为可分为三个时段: 早白垩世(131~84Ma)东段开始向东俯冲, 导致阿尔卑斯东部的Eo-alpine造山作用(图2d, 2e); 晚白垩世-始新世(84~45Ma), 向东南方向俯冲至Adria陆块之下(图2e); 中始新世(45Ma)开始, Adria陆块与欧亚大陆发生碰撞, 形成阿尔卑斯-喀尔巴阡造山带, 同时伴随着俯冲的新特提斯板片回撤.

在晚白垩世, Valais洋开始向南俯冲至Iberia-Briançonnais微陆块之下, 并导致Iberia与欧亚大陆碰撞, 形成比利牛斯山脉(Sibuet等, 2004). Briançonnais陆块与欧亚大陆在中-晚始新世的碰撞导致Valais洋盆的最终关闭, 以榴辉岩为代表的低温高压变质岩记录了Valais洋盆俯冲和折返过程(Bousquet等, 2002; Schmid等, 2004). 地震层析成像揭示, 新特提斯洋岩石圈持续俯冲至Adria陆块之下地幔过渡带深度(Zhao L等, 2015, 2016; Malusà等, 2021), 欧洲大陆-Adria陆块俯冲界面在50~70km深度存在15~25km厚的俯冲洋壳蛇纹岩与蛇纹石化地幔构成的低速层(Zhao等, 2020). 在非洲大陆持续向北的汇聚作用下, Adria陆块开始向东西两侧俯冲至欧亚大陆之下, 在其两侧形成Appennines和Dinarides-Hellenides两条俯冲/逆冲带(Handy等, 2015). 比利牛斯造山带的大地电磁测深表明, Iberia陆块向北俯冲至欧亚大陆之下70km处(Campanyà等, 2012; Chevrot等, 2015). 现今观测到的这些北向俯冲实质是后期非洲陆块向北汇聚对先期阿尔卑斯新特提斯洋岩石圈和Valais洋岩石圈南向俯冲构造的改造所致.

晚侏罗世开始, Vardar洋岩石圈向东北俯冲至欧亚大陆之下, 在其南缘产生岩浆弧(图2c)以及低温高压变质作用(Robertson等, 2013). Vardar洋于晚白垩世末-早古近纪沿Vardar缝合带关闭, 在马其顿和希腊北部保存Guevgueli蛇绿岩, 向东可与土耳其北部伊兹米尔-安卡拉缝合带相连, 并向东延伸至小高加索地区的Sevan-Akera缝合带(Robertson等, 2013; Okay等, 2018, 2020). Vardar洋向东连接新特提斯洋北支(又称伊兹米尔-安卡拉洋; Sengör和Yilmaz, 1981), 分隔北部作为欧亚大陆南缘的Pontides陆块和南部Anatolide-Tauride陆块(图2c, 2d). 伊兹米尔-安卡拉洋岩石圈于晚三叠世开始向北俯冲至Pontides陆块之下, 在其南侧形成晚三叠世-晚

白垩世俯冲增生杂岩、岩浆弧和弧前盆地(Okay等, 2018). Pontides与Anatolide-Tauride陆块沿伊兹米尔-安卡拉缝合带碰撞, 导致伊兹米尔-安卡拉洋的闭合(图2f), 蛇绿混杂岩被早始新世红层不整合覆盖, 将这次碰撞发生的时间限定在始新世之前(Okay等, 2020).

Pindos洋岩石圈于早白垩世开始向东北俯冲至Korabi-Pelagoniane微陆块之下(图2d), 洋盆西侧和南侧为被动陆缘碳酸盐台地沉积和碎屑沉积, 物源来自Adria陆块(Degnan和Robertson, 1998; Moix等, 2008). Pindos洋的闭合过程呈现由北至南的剪刀式闭合(Robertson等, 1991). 北部在阿尔巴尼亚和希腊北方一带于晚白垩世-古新世率先闭合. 随后缝合带逐渐向南扩展, 于渐新世沿Pindos-Mirdita蛇绿岩带完成最终闭合(Degnan和Robertson, 2006; Moix等, 2008), 阿尔巴尼亚-希腊一带保存的Mirdita和Pindos-Vourinos蛇绿岩即为Pindos洋壳的残片.

非洲-阿拉伯陆块和Anatolide-Tauride陆块之间的新特提斯洋南支岩石圈于侏罗纪向北俯冲至Anatolide-Tauride陆块之下(图2c), 在其南缘形成Afsin-Baskil弧, 弧岩浆岩年龄集中于晚白垩世-新近纪(Kaymakci等, 2010; Rolland等, 2012). 随着非洲-阿拉伯陆块的逆时针旋转, 新特提斯洋南支不断缩小, 最终沿着Bitlis缝合带关闭, 导致非洲-阿拉伯陆块与Anatolide-Tauride陆块的碰撞拼合(Hempton, 1985), 碰撞时间大约为晚始新世-中新世(Sengör和Yilmaz, 1981; Dewey等, 1986; Kaymakci等, 2010; Rolland等, 2012).

非洲-阿拉伯陆块与欧亚大陆的碰撞导致二者之间多个洋盆的逐渐关闭, 在地中海地区形成多个带状山脉, 例如比利牛斯山、阿尔卑斯山、喀尔巴阡山等. 碰撞还造成向北俯冲的非洲陆块运动速度的降低, 使得在洋壳俯冲仍在进行的地区板片后撤速度大于板片俯冲的速度, 造成挤压应力的释放, 导致地中海地区无法形成与伊朗高原和青藏高原类似的高原, 而仅以条带状山脉为特征. 同时, 地中海地区俯冲板片的后撤引发弧后盆地扩张和地壳垮塌, 形成现今地中海非洲大陆俯冲背景下多个新生代扩张盆地, 从西至东依此为Alboran海、Liguro-Provençal盆地、Tyrrhenian海、爱琴海和Pannonian盆地(Jolivet和Faccenna, 2000). 关于地中海地区新生代盆地扩张的动力学机制, 前人提出碰撞加厚地壳的重力扩展(Gautier等, 1999)、板块边界应力相互作用(Royden, 1993)、俯冲和大规模地幔流等机

制(Doglioni, 1991). Faccenna和Becker(2010)通过总结地中海地区高分辨率地震层析成像数据, 提出碰撞带下伏上地幔顶部的小规模地幔对流可以很好地解释该地区观测到的动力地形和微陆块的运动过程.

3.2 扎格罗斯: 穿时碰撞构造域

新特提斯洋沿扎格罗斯缝合带的闭合过程记录了非洲-阿拉伯陆块与伊朗陆块之间的汇聚历史(Agard等, 2011). 扎格罗斯段作为新特提斯洋地中海段的东延部分, 其演化过程与地中海段密切相关, 且受到大西洋扩张的影响. 根据大西洋海底磁异常条带的分布特征, 中侏罗世以来非洲-阿拉伯陆块的运动轨迹可划分为三个阶段(Dewey等, 1989): 第一阶段(175~92Ma), 中大西洋和南大西洋的逐步打开导致非洲-阿拉伯陆块和美洲陆块分裂, 非洲-阿拉伯陆块相对欧亚大陆以左行走滑运动为主; 第二阶段(92~60Ma), 非洲-阿拉伯陆块以非洲西北部为欧拉极发生逆时针旋转, 并朝东北方向快速漂移, 导致新特提斯洋宽度迅速缩小; 第三阶段(60Ma至今), 非洲-阿拉伯陆块继续逆时针旋转, 在56~20Ma期间逆时针旋转了~25°, 但其向东北方向漂移的速度大幅减小, 大约向北运动了10°(McQuarrie等, 2003).

新特提斯洋岩石圈于早侏罗世向北俯冲至伊朗陆块之下, 在伊朗陆块南缘Sanandaj-Sirjan带产生弧岩浆岩(图2c; Arvin等, 2007; Agard等, 2011; Zhang等, 2018). 同时, 阿拉伯与伊朗陆块之间可能存在洋内俯冲. 随着洋内俯冲在晚白垩世的结束, 新特提斯洋岩石圈向南的仰冲导致阿曼Semail蛇绿岩就位阿拉伯陆块北缘, 并被阿拉伯陆块在晚白垩世末的前陆地层不整合覆盖, 但目前对仰冲的构造背景仍存在较大争议(Coleman, 1981; Searle和Cox, 1999; Guilmette等, 2018). 在始新世, 大量岩浆岩侵位于Sanandaj-Sirjan带北侧的Urumieh-Dokhtar岩浆岩带(UDMA). UDMA最初被认为代表新特提斯洋岩石圈俯冲相关的岩浆弧(Agard等, 2011), 但随着同位素年龄的不断报道, 岩浆岩的侵位年龄从早始新世一直持续到中新世(Chiu等, 2013). 因此, UDMA可能并不完全是大洋俯冲带之上的弧岩岩浆岩. Yin(2010)将UDMA岩浆岩与青藏高原南部林子宗火山岩类比, 认为其可能并非岩浆弧成因, 而是由初始碰撞后的板片断离导致.

随着新特提斯洋岩石圈持续俯冲至伊朗陆块之

下, 以及非洲-阿拉伯陆块的逆时针旋转, 新特提斯洋快速变窄, 并最终沿扎格罗斯缝合带关闭, 形成扎格罗斯造山带。虽然对碰撞时间的争议较大, 但多数研究者认为阿拉伯陆块与伊朗陆块在渐新世(35~25Ma)碰撞(Sengör等, 1985; Alavi, 1994; Agard等, 2005; Guest等, 2006; Okay等, 2010; Chiu等, 2013; McQuarrie和van Hinsbergen, 2013; Koshnaw等, 2019)。非洲-阿拉伯陆块和欧亚大陆古地磁极的对比显示, 古新世-始新世时期(60~50Ma)非洲-阿拉伯陆块与欧亚大陆相距~1000km(Besse和Courillot, 1991)。该距离与McQuarrie等(2003)通过大洋磁条带得到的结果一致。因此, 新特提斯洋在扎格罗斯地区的闭合时间应晚于早始新世, 并且闭合过程导致~1000km的陆块相对运动。综合大西洋扩张引发的区域板块旋转对非洲-阿拉伯陆块和欧亚大陆的碰撞过程进行重建, 非洲-阿拉伯陆块的逆时针旋转导致新特提斯洋的闭合具有穿时性: 非洲-阿拉伯陆块西北部于~27Ma率先与欧亚大陆发生碰撞, 碰撞带逐渐向东南方向迁移, 最终于20Ma完成碰撞拼合(McQuarrie和van Hinsbergen, 2013)。

非洲-阿拉伯与伊朗陆块的碰撞拼合导致伊朗高原的隆升。但由于碰撞拼合时间较晚, 且碰撞后非洲-阿拉伯陆块向北的汇聚速率较低, 因此伊朗高原比“成熟”的青藏高原平均海拔低, 常被认为处于年轻高原演化阶段。伊朗北部高加索地区始新世古地磁结果显示, 阿拉伯-欧亚大陆汇聚导致伊朗高原吸收了~780km缩短量(van der Boon等, 2018), 该结果为重新定义高原岩石圈吸收的板块汇聚量以及研究高原隆升提供了新的参考。Wu等(2021)通过对伊朗高原深部岩石圈-软流圈系统(LAS)的横向结构变化研究, 发现伊朗东部岩石圈-软流圈边界(LAB)深部存在明显横向变化: 伊朗东部LAB平缓, 深度为80~90km; 而在伊朗东北部, LAB由~80km向北逐渐加深至高原东北缘的120km, 并呈现“根状”形态。同时, 伊朗东部Moho面浅于45km, 东北部加深至50~55km, 与LAB具有相似的变化特征。结合伊朗高原活动构造、新生代岩浆活动等特征, Wu等(2021)提出伊朗东北部较厚的地壳和岩石圈可能是阿拉伯-欧亚陆陆碰撞过程中远场应变集中导致岩石圈整体增厚的结果; 而伊朗东部的薄地壳、薄岩石圈以及相对平坦的Moho和LAB形态, 可能是陆陆碰撞以来岩石圈垂向变形增厚较为有限、岩石圈地幔在中晚新生代多期次对流减薄共同作用所导致。

3.3 青藏高原: 多阶段洋盆闭合

新特提斯洋东段分支——班怒洋的俯冲起始、俯冲极性以及消亡存在很大争议。一部分学者认为班怒洋一直向北俯冲至羌塘陆块之下(Yin和Harrison, 2000; Kapp等, 2003; Guynn等, 2006; 万博等, 2019), 另一部分学者认为班怒洋是向南北双向俯冲的, 同时向北俯冲至羌塘陆块之下并向南俯冲于拉萨陆块之下(潘桂棠等, 1982; 曹圣华等, 2004; 康志强等, 2010; 李小波等, 2015; Zhu等, 2011b; 杜德道等, 2011; Zhu等, 2016; Li S等, 2019)。对于班怒洋的俯冲起始时间, Zhu等(2011b)认为班怒洋于中二叠世(或者更早)首先开始向南俯冲, 并引发新特提斯洋(雅鲁藏布江洋)的打开和拉萨陆块的北向漂移; 随后, 南北羌塘在中三叠世的碰撞诱发班怒洋的北向俯冲(Zhu等, 2013)。根据对南羌塘改则地区中生代构造环境和沉积物源的研究, Li等(2017)认为班怒洋的北向俯冲始于早侏罗世(约195~190Ma), 这一认识得到俯冲带之上弧火山岩开始于~185Ma的佐证。对南羌塘班怒带南侧北拉萨不同地区火山岩的研究表明, 班怒洋南向俯冲开始于晚侏罗世(李小波等, 2015)或者早白垩世(杜德道等, 2011)。由于班怒缝合带两侧白垩纪中晚期的火山岩均具有弧玄武岩地球化学特征, 部分学者认为班怒洋的俯冲可能持续到白垩纪中晚期(曹圣华等, 2004; 高顺宝等, 2011; 付佳俊等, 2015; Zhu等, 2016; Liu等, 2018)。但是, 具有岛弧型地球化学特征的火山岩不一定是由大洋板片俯冲直接造成的(Zheng, 2019), 也可能是俯冲板片回撤或断离引起的拉张作用引起地幔交代岩部分熔融所致(Zhu等, 2016; Li等, 2017)。因此, 仅根据弧火山岩地球化学成分很难确定俯冲结束时间。部分学者基于在南羌塘发现的163Ma左右的沉积不整合事件, 提出班怒洋在晚侏罗世就已经闭合(Ma等, 2017), 但这一不整合事件也许是洋底高原与南羌塘碰撞(Yan和Zhang, 2020)或洋脊与南羌塘碰撞(Li等, 2020)的结果。在班怒带内部、南羌塘以及拉萨陆块北部获得的地质和古地磁结果均指示, 拉萨-羌塘碰撞很可能发生在140~130Ma(图3; Zhu等, 2016; Kapp和DeCelles, 2019; Yan等, 2016; Bian等, 2017; Ma等, 2018; Chen等, 2020)。

拉萨陆块南部冈底斯岩浆带最老弧岩浆岩的年龄为中晚三叠世, 因其更靠近雅鲁藏布缝合带而被认为是新特提斯分支雅江洋开始向北俯冲至拉萨陆块之下的标志(Ji等, 2009; Wang等, 2016)。基于冈底斯带叶巴

组和桑日群火山岩的时代及地球化学特征(Guo等, 2013; Kang等, 2014; 黄丰等, 2015; Wei等, 2017)以及日喀则弧前盆地(Wu等, 2010)和雅江缝合带增生楔(Wang等, 2018)的研究显示, 雅江洋的俯冲始于早侏罗世(~195Ma), 由此万博等(2019)认为南北羌塘的碰撞诱发了雅江洋的俯冲起始; Zhu等(2011b, 2013)则认为, 雅江洋的初始俯冲始于早白垩世早期(图2c), 由拉萨-羌塘碰撞所触发, 拉萨陆块三叠纪到侏罗纪岩浆岩是班怒洋南向俯冲的产物。

导致雅江洋消亡和青藏高原南部隆升的印度-欧亚大陆碰撞时间与方式一直是地学界争论的热点: 碰撞时间从70Ma到15Ma不等(Chen等, 2010; Tan等, 2010; Sun等, 2010; Zhu等, 2015; Hu等, 2016; 肖文交等, 2017; Meng等, 2020), 碰撞方式包含单阶段碰撞和多阶段碰撞多种模型。单阶段碰撞主要指大印度模型, 包括自西向东剪刀式闭合(Patriat和Achache, 1984; Yin和Harrison, 2000), 以及中间先碰撞、然后向东西两侧穿时性碰撞(Ding等, 2005; 2016)等方式; 多阶段碰撞包括弧陆+陆陆碰撞(Aitchison等, 2000; Kapp和DeCelles, 2019)以及两阶段陆陆碰撞(van Hinsbergen等, 2012; Yuan等, 2021)。值得注意的是, 很多文献给出的碰撞时间实际上是两个陆块初始碰撞的时限。比如蛇绿岩仰冲指示了初始碰撞的下限年龄, 最高海相层、构造变形、岩浆转换等仅表示初始碰撞的上限年龄。近年来, 一些学者提出, 只有周缘前陆盆地发育以及物源的混合才能指示初始碰撞(Hu等, 2016; 丁林等, 2017; 胡修棉等, 2017)。雅鲁藏布江缝合带中段桑单林和木巴拉剖面沉积岩的物源分析显示, 亚洲大陆的物源最早在~60Ma时到达印度大陆最北缘, 揭示此时印度与欧亚大陆已经发生碰撞(DeCelles等, 2014; Wu等, 2014; Hu等, 2015; An等, 2021)。根据巴基斯坦北部西构造结的物源变化, Ding等(2016)认为西构造结初始碰撞比雅鲁藏布江缝合带中段晚5Myr, 并据此提出碰撞首先发生于中部, 随后向东西两侧穿时性碰撞(丁林等, 2017)。东构造结地区前陆盆地研究显示, 初始碰撞时间为56~50Ma(Baral等, 2019)。

Aitchison等(2000, 2007)认为, 泽当火山岩代表了新特提斯洋内部的大洋弧, 印度大陆先后与该洋内弧和欧亚大陆发生碰撞。但是, 近年的研究否定了泽当火山岩代表洋内弧的认识; 新的地质证据表明, 泽当火山岩是冈底斯弧的一部分, 而非独立的大洋内部岛弧

(Zhang等, 2014)。另一种观点认为, 在新特提斯大洋板片俯冲过程中, 由于弧后伸展作用, 冈底斯弧南缘与拉萨陆块分开, 形成日喀则弧, 随着新特提斯洋的关闭与拉萨陆块拼贴到一起(Kapp和DeCelles, 2019)。在西构造结, 大量的地质和地球化学证据显示, 在134~90Ma存在科西斯坦-拉达克洋内弧(Burg等, 1998; Petterson, 2010)。最新的古地磁研究揭示, 科西斯坦-拉达克洋内岛弧在晚白垩世早期位于新特提斯洋内的赤道附近(图2d), 并与西缅甸块构成一条新特提斯洋内弧带(Westerweel等, 2019; Martin等, 2020)。虽然Jagoutz等(2015)和Martin等(2020)均支持该洋内岛弧系统从巴基斯坦向东延伸到西缅甸地区, 构成新特提斯洋双俯冲体系(图2d), 但这一延伸目前还需要更多地质证据的支持。

基于特提斯喜马拉雅和印度大陆晚白垩世-新生代期间古纬度的差异, van Hinsbergen等(2012)提出在~50Ma特提斯喜马拉雅与欧亚大陆碰撞, 在~25Ma印度大陆与特提斯喜马拉雅碰撞的两阶段碰撞模型。但该模型由于缺少地质证据支持(特别是约25Ma的第二阶段碰撞)广受质疑。Yuan等(2021)从特提斯喜马拉雅晚白垩世-古近纪早期沉积岩中获得了原生剩磁, 确定了75~61Ma期间特提斯喜马拉雅北向漂移速率为 260.1mm a^{-1} ; 与此相比, 该时段印度陆块北向漂移速率仅为 99.6mm a^{-1} 。这个差别说明二者在此期间被“北印度海”(North India Sea)分隔(图2e, 3); 特提斯喜马拉雅从印度陆块分离的原因是留尼汪岛地幔柱头到达地球表面, 在特提斯喜马拉雅超快速向北漂移过程中, 形成洋壳连续分布的“北印度海”; 这一过程与现今红海盆地在Afar地幔柱作用下快速形成洋壳连续分布海盆具有相同的机制(Augustin等, 2021)。随着新特提斯大洋板片持续北向俯冲, 大约61Ma特提斯喜马拉雅首先与欧亚大陆南缘的拉萨陆块在 14°N 发生碰撞; 随后印度大陆与特提斯喜马拉雅在约53~48Ma发生自西向东穿时碰撞, 导致“北印度海”自西向东逐渐关闭(图2f, 3)。

印度大陆及邻区地震层析成像研究结果显示, 地壳与上地幔(0~300km)仅存在高速异常体B(图4a), 而在下地幔存在高速异常体A和B(图4b)。高速异常体A和B可能代表了不同阶段断离的俯冲大洋岩石圈(图4)。我们认为, 图4中高速异常带A和B分别代表雅江洋和北印度海俯冲板片断离之后下沉到地幔深度1100~1500km的残留, 地壳和上地幔则只有北印度海俯冲板片的残留, 雅江洋俯冲板片已经完全下沉到岩

图4 印度大陆及邻区地壳与上地幔(0~300km)地震层析成像结果(a)、下地幔(1011~1510km)地震层析成像结果(b)

图中结果表明, 地壳与上地幔仅存在高速异常体B, 而在下地幔高速异常体B的南部还存在另一低速异常体A; 下地幔高速异常体B与地壳和上地幔高速异常体B是相同俯冲体在地球内部的残留

石圈之下。层析成像结果为雅江洋和北印度海被特提斯喜马拉雅分隔提供了深部观测证据。

4 新特提斯洋形成与消亡的动力学机制

4.1 俯冲板片拖拽力是新特提斯洋扩张和消亡的主要动力

自板块构造理论提出以来, 板块运动的驱动力一

直是地球科学研究的重点。目前多数学者认为, 板块俯冲驱动力以板片拖拽力-“自上而下”(top-down)为主, 以深部地幔对流产生的热物质上涌-“自下而上”(bottom-up)为辅。在古特提斯洋岩石圈俯冲拖拽力作用下, 基梅里陆块群由冈瓦纳大陆北缘裂离, 并逐渐向北漂移, 导致新特提斯洋的打开(Stampfli和Borel, 2002; 万博等, 2019)。万博等(2019)认为, 随着古特提斯洋的关闭, 基梅里陆块群与欧亚大陆南缘碰撞, 俯冲带跃迁至

微陆块的另一侧, 新特提斯洋岩石圈沿着基梅里陆块群南侧开始新的俯冲过程, 使得整个特提斯体系显示出向北单向俯冲汇聚的格局. 最近一系列基于特提斯不同区段的地球动力学数值模拟工作显示, 不同属性的外来块体(如陆块或洋底高原)与欧亚大陆碰撞, 均需要俯冲带跃迁来协调整体的板块汇聚(Zhong和Li, 2020; Yan等, 2021). 同时, 在新特提斯洋岩石圈向北俯冲的整体背景下, 可能存在局部向南的俯冲(例如, Zhu等, 2011a), 但不影响特提斯岩石圈整体向北俯冲的格局, 如同现今西太平洋整体向西俯冲背景下存在局部(例如南海)向东的俯冲一样.

4.2 非自由边界条件下陆块旋转控制特提斯洋的演化过程

在全球统一框架下, 每个板块的边界都受到其他板块的制约, 板块之间相互作用的边界为非自由边界. 在这种情况下, 板块运动行为受板片拖拽力、深部地幔对流以及板块空间位置等多种因素的控制. Gurnis (1988)通过对潘吉亚超大陆裂解过程的研究提出, 超大陆会抑制俯冲作用和地幔冷却, 使超大陆之下地幔温度升高、密度降低, 最终导致热的地幔上涌, 促使超大陆裂解. Zhong等(2007)通过三维模拟计算, 将地幔流划分为一阶(degree-1)和二阶(degree-2)两种模式. 一阶模式对应于不存在超级大陆的情况, 其特征是在两个半球内独立完成上下地幔大尺度对流; 而当超级大陆存在时, 演化为二阶模式, 其主要特征是存在两个对蹠的向上地幔流. 他们推测, 由于大陆块体的调节作用, 一阶和二阶模式在地幔中交替存在, 导致了超级大陆的聚合和裂解. 这种地幔循环可以很好地解释超大陆聚合和裂解过程, 现今分别位于非洲板块和太平洋板块之下的Tuzo和Jason两个低速剪切波省(LLSVP)则被认为是潘吉亚超大陆时期在地球内部形成的两个超级地幔柱(Zhong等, 2007; Li和Zhong, 2009; Doucet等, 2019, 2020), 对应于三维数值模拟中两个对称分布的地幔上升流. Torsvik等(2014)依据两个超级地幔柱的位置, 重建了早古生代以来的板块运动形式, 非洲大陆之下Tuzo地幔柱上涌可能是导致特提斯构造域裂谷伸展的主要促发因素, 并作用于整个特提斯构造演化过程.

古特提斯洋在晚古生代时期为西窄东宽的三角形海湾, 其南侧的基梅里陆块群基本同时于早二叠世

从冈瓦纳北缘裂解, 并基本同时于晚三叠世与欧亚大陆南缘发生碰撞. 基梅里陆块群的这种运动形式, 需要陆块群内不同陆块以基本相同的角速度和不同的线速度向北漂移, 即位于东部的陆块(如滇缅泰马)相对西部陆块(如伊朗)需要以更快的线速度向北漂移(图5). 这种运动形式可以简化为上述陆块以古特提斯洋西端为欧拉极的逆时针旋转, 并以不同速度向北漂移(图5). 新特提斯洋继承了古特提斯洋向东开口的海湾状, 随着南大西洋和印度洋在早白垩世的打开, 非洲-阿拉伯陆块和印度陆块脱离冈瓦纳大陆的束缚, 开始向北漂移. 其在向北漂移过程中, 由于受到北部欧亚大陆的阻挡, 表现为以西非为欧拉极的逆时针旋转, 从而导致地中海地区和扎格罗斯地区新特提斯洋由西向东逐渐闭合(图5). 印度陆块从冈瓦纳裂解之后, 其北部为广阔的新特提斯洋, 印度陆块快速向北漂移并伴随逆时针旋转, 最终于古新世中期至始新世早期与欧亚大陆之间发生陆陆碰撞. 虽然非洲-阿拉伯陆块和印度陆块与欧亚大陆之间的碰撞时间存在差别, 但是两陆块在向北漂移过程中均呈现以新特提斯构造域西段的西非为欧拉极的逆时针旋转, 且旋转角速度基本一致, 因而整体表现为非洲-阿拉伯陆块和印度陆块以基本一致的角速度围绕欧拉极的旋转, 最终导致新特提斯洋的闭合. 这一过程同时伴随着太平洋岩石圈的西向俯冲以及大西洋和印度洋的扩张, 大洋岩石圈的俯冲和海底扩张导致全球板块的相互作用, 为上述非自由边界条件提供外部约束. 综合上述分析, 我们将古特提斯洋和新特提斯洋的这一相似特征总结为由冈瓦纳大陆裂解的陆块在非自由边界条件下围绕欧拉极(西非)的逆时针旋转引发古/新特提斯洋的闭合(图5).

新特提斯洋闭合后, 非洲-阿拉伯陆块和印度陆块持续向北汇聚, 在非自由边界条件下, 挤压应力引发陆块的侧向挤出和旋转. GPS数据显示, 非洲-阿拉伯陆块向欧亚大陆的汇聚导致安纳托利亚陆块向西的挤出, 印度-欧亚的持续汇聚则引发青藏高原东缘向东的挤出(图6a; McClusky等, 2000; Wang等, 2001; Vernant等, 2004; Shen等, 2005; Gan等, 2007), 从而导致新特提斯构造域在非自由边界条件下的东西双挤出构造(图6a).

非洲-阿拉伯陆块和印度陆块与欧亚大陆之间碰撞之后, 很可能均发生了俯冲板片的断离, 并导致拖

图5 由冈瓦纳大陆裂解的各陆块围绕欧拉极(西非附近)的逆时针旋转导致古特提斯洋和新特提斯洋的闭合
 ω , 角速度. 下标: IR, 伊朗; Q, 南羌塘; S, 滇缅泰马; AF, 非洲; IN, 印度

拽力的消失(Yin, 2010; Zhu等, 2015). 有研究推测, 现今非洲板块仍以约 $1\sim 2\text{cm a}^{-1}$ 的速率向北汇聚(Jolivet和Faccenna, 2000; McQuarrie等, 2003), 印度-欧亚大陆汇聚速率可高达 $3.4\sim 5.8\text{cm a}^{-1}$ (Bilham等, 1997; Molnar和Stock, 2009), 导致印度大陆持续俯冲至欧亚大陆之下(Zhao等, 2010; Gao等, 2016; Shi等, 2020; Zheng等, 2020; Kufner等, 2021). 然而, 这种持续的陆壳俯冲很难用俯冲大洋板片的拖拽力解释. 我们注意到, 非洲板块与南极洲板块之间的洋中脊属于超慢速扩张脊, 而印度-澳大利亚板块与南极洲板块之间的扩张脊为快速扩张洋中脊(Dick等, 2003; Johansen等, 2019). 洋壳扩张速率与两个板块向北汇聚速率有很好的对应关系, 同时快速扩张脊和超慢速扩张脊的存在与全球板块的运动方向也具有很好的相关性(图6b). 在南大西洋近东西向扩张的影响下, 非洲板块和印度-澳大利亚板块均向东北运动, 该方向与非洲板块和南极洲板块之间近北东方向延伸的洋中脊近乎平行, 与非洲和印度-澳大利亚板块之间的洋中脊斜交, 而与印度-澳大利亚和南极洲板块之间的洋中脊

垂直(图6b). 这种方向的差异可能是导致非洲板块与南极洲板块之间为超慢速扩张脊, 非洲板块与印度-澳大利亚板块之间为慢速扩张脊, 而印度-澳大利亚板块与南极洲之间为快速扩张脊的主要原因. 对比洋中脊两侧转换断层的方向, 非洲板块与南极洲板块之间的超慢速扩张脊两侧转换断层方向与洋中脊大角度斜交(而非正交), 类似右行走滑断裂的形式, 指示由板块运动方向导致的走滑挤压可能影响了超慢速扩张脊的行为(图6b).

综上所述, 虽然在大洋岩石圈俯冲阶段, 相比于板片俯冲拖拽力, 海底扩张的推力属于板块运动的二级驱动力; 但在某些特定条件下, 例如板块碰撞和俯冲板片断裂之后俯冲拖拽力消失的情况下, 地幔对流和洋脊推力有可能对板块运动起主导作用. 随着古特提斯洋的关闭, 板片俯冲的拖拽力已不复存在, 而原本只有板片俯冲拖拽力十分之一的洋脊推力可能成为触发新特提斯洋岩石圈俯冲起始的最初驱动力. 板块俯冲启动之后, 俯冲板片产生的拖拽力又成为主要驱动力.

图 6 非自由边界条件下陆块旋转控制特提斯洋的演化过程

(a) 非自由边界条件下新特提斯洋闭合后东西双挤出构造. GPS数据显示非洲-阿拉伯板块与欧亚大陆的碰撞和汇聚导致安纳托利亚向西的逆时针挤出构造, 印度-欧亚大陆的持续汇聚导致青藏高原东部向东的顺时针挤出构造. GPS数据来源: McClusky等, 2000; Wang等, 2001; Vernant等, 2004; Shen等, 2005; Gan等, 2007. (b) 现今非自由边界条件下板块运动方向和速度与洋中脊扩张速率之间协调关系. 箭头方向和长度代表板块绝对运动方向和速度, 数据来自Kreemer等, 2003

5 小结与展望

5.1 小结

本文总结了新特提斯洋不同区段打开、扩张、消亡以及最终闭合的演化历史, 讨论了影响新特提斯洋构造演化的深部动力学机制, 几点主要认识总结如下.

(1) 新特提斯洋由西向东表现出不同的演化特征: 地中海地区以多洋盆扩张和双向俯冲为特征, 中东地

区表现为北向俯冲和沿扎格罗斯缝合带的碰撞, 青藏高原和东南亚地区以多块体逐渐裂解和多阶段碰撞为特点.

(2) 不同的构造演化造成特提斯构造域不同的地形地貌: 地中海地区以线型造山带为主, 中东地区以年轻高原为特征, 而印度-欧亚碰撞则形成海拔超过4000m的青藏高原.

(3) 俯冲板片的拖拽力被认为是新特提斯洋岩石圈

俯冲消减以及板块北向漂移的主要驱动力, 深部地幔对流和非自由边界条件下冈瓦纳大陆主体围绕欧拉极(西非)的逆时针旋转也是影响特提斯洋演化的重要因素。

5.2 展望

随着地球物理探测和地球化学测试技术的不断发展, 新特提斯洋演化的研究已经从定性描述转变为定量解析, 逐步从浅部地质现象向深部结构和动力学机制转变, 极大地深化了对新特提斯洋演化动力机制的认识, 但仍存在一些重要的科学问题亟待解决。

(1) 陆块碰撞的时间和方式: 新特提斯洋闭合的时间和方式是新特提斯构造演化研究最重要的科学问题之一。新特提斯洋东西跨度超过一万公里, 其闭合过程涉及多个主要源于冈瓦纳大陆的陆块与欧亚大陆碰撞拼合, 并且每个陆块与欧亚大陆的碰撞具有其独特的方式。这些复杂多变的碰撞拼合过程导致对新特提斯不同区段(如地中海、扎格罗斯、喜马拉雅和东南亚)的闭合时间和方式仍未达成统一认识。

(2) 新特提斯洋演化的地形响应: 新特提斯洋的闭合对欧亚大陆南缘地形有着深远影响, 导致欧亚大陆南缘一系列山脉和高原的形成。在地中海地区以线型造山带为主, 例如阿尔卑斯-喀尔巴阡造山带; 中东地区形成低矮高原, 以伊朗高原为代表; 而印度-欧亚碰撞区则形成海拔超过4000m的青藏高原。这种地貌上的差异既可能与新特提斯洋两侧陆块之间的汇聚速率有关(Molnar等, 2010), 也可能与古特提斯和新特提斯构造域岩石圈减薄后的大陆张裂有关(Chung等, 2001, 2005; Zheng和Wu, 2018), 未来需深入研究新特提斯不同地貌的深部动力学机制。

(3) 板块持续汇聚的可能动力来源: 新特提斯洋闭合之后, 陆壳持续俯冲显然与俯冲大洋板片的拖拽作用不完全一致。因此, 深部地幔对流能否引起板块持续向北运动并导致造山作用持续进行, 仍然是个尚未解决的问题。此外, 深部地幔对流如何作用于上覆岩石圈板块, 如何影响板块漂移速度的快慢与洋中脊扩展速率的差异, 仍是需要解决的前沿科学问题。

(4) 新特提斯洋闭合后地球俯冲体系以经向为主导的机制: 古/新特提斯洋均以纬向俯冲体系为特征, 随着新特提斯洋的闭合, 地球俯冲体系基本以经向俯冲为主。何种动力过程主导全球俯冲体系在不同地质时期的经纬变换, 是未来地球科学需要深入研究的前

沿课题。

(5) 深部动力学与板块单向俯冲碰撞机制的耦合关系: 特提斯演化的一个重要特征是陆块单向漂移, 其动力学机制被认为主要来自俯冲板片的重力/拖拽力(万博等, 2019)。然而, 地质历史时期全球范围的超大陆聚合和裂解事件与地幔柱活动表现为周期性耦合关系(Li Z X等, 2019; 陈凌等, 2020), 表明板块构造与地球深部过程存在紧密联系并相互影响。但是, 目前关于特提斯构造域地球深部动力学与陆块单向漂移之间的耦合关系仍不清楚, 需地质学、地球物理、地球化学、物理和数值模拟等多学科综合研究才能取得突破。

(6) 俯冲起始机制: 诱发和自发两种俯冲起始模型均以岩石圈薄弱带两侧存在密度差为基本条件(Stern和Gerya, 2018)。诱发俯冲起始模式需要板块相对汇聚(如伊豆-小笠原-马里亚纳俯冲带), 而自发俯冲起始模式则不需板块相对运动, 以转换边界垮塌(如伊朗陆块南部新特提斯洋的俯冲起始; Moghadam等, 2013)或地幔柱顶部边缘垮塌(如加勒比俯冲起始; Ueda等, 2008; Whattam和Stern, 2015)为触发机制。具有多样性俯冲特征的新特提斯构造域为研究俯冲起始机制提供了天然实验室。西段阿尔卑斯新特提斯洋岩石圈存在向南的俯冲作用, 是什么机制导致其俯冲极性的特殊性? 地中海东部地区存在多个洋盆, 大洋板块俯冲如何开启并逐渐传递至年轻洋盆? 基梅里陆块群与欧亚大陆南缘碰撞拼合后, 新的欧亚大陆南缘处于被动大陆边缘状态, 是什么机制导致洋壳与大陆连接处产生初始俯冲?

(7) 波斯湾油气资源形成的地球深部动力机制: 新特提斯洋演化造就了全球最重要的油气富集区, 特提斯构造域蕴含了全球约70%的常规油气资源(邹才能等, 2015)。从新特提斯洋打开伊始至新生代关闭, 阿拉伯陆块长期处于低纬度赤道附近, 适宜的水温和充足的阳光为生物繁盛提供了条件。阿拉伯陆块北缘在~200Myr间持续处于被动陆缘, 并经历了多次海进和海退交替。大范围海进使得整个阿拉伯陆块沉积了厚层碳酸盐岩和碎屑岩, 这些富含生物的碳酸盐岩和碎屑岩为油气资源的生成提供了优质烃源岩; 而海退阶段沉积的多个膏岩层则构成良好的盖层, 因而在波斯湾地区形成多套含油气层位(Alsharhan和Kendall, 1986; Kendall和Alsharhan, 2013)。阿拉伯陆块与欧亚大陆之间的碰撞导致阿拉伯陆块形成一系列由宽阔的向斜和背斜构成的前陆褶皱带, 成为优良的油气圈闭。

特别值得注意的是, 非洲-阿拉伯大陆长期处于Tuzo-LLSVP异常区正上方(图2), 该区域地幔上涌是否对波斯湾巨量油气资源富集也有贡献? 以岩石圈板块运动为纽带, 探讨地壳浅层油气资源富集的地球深部动力学机制应该是未来油气勘探和地球动力学研究的一个新方向。

致谢 感谢中国科学院青藏高原研究所丁林研究员, 中国地质大学(北京)朱第成教授, 中国科学院地质与地球物理研究所邓成龙、万博研究员, 纪伟强、梁晓峰、褚杨副研究员以及李仕虎博士在论文撰写过程中提出的建议和认真修改; 感谢执行主编郑永飞教授和四位匿名审稿人的认真审阅与修改。

参考文献

- 曹圣华, 罗小川, 唐峰林, 陈鲁根. 2004. 班公湖-怒江结合带南侧弧-盆地时空结构与演化特征. 中国地质, 31: 51–56
- 陈凌, 王旭, 梁晓峰, 万博, 刘丽军. 2020. 俯冲构造Vs.地幔柱构造——板块运动驱动力探讨. 中国科学:地球科学, 50: 501–514
- 邓军, 侯增谦, 莫宣学, 杨立强, 王庆飞, 王长明. 2010. 三江特提斯复合造山与成矿作用. 矿床地质, 29: 37–42
- 丁林, Satybaev M, 蔡福龙, 王厚起, 宋培平, 纪伟强, 许强, 张利云, Qasim M, Baral U. 2017. 印度与欧亚大陆初始碰撞时限、封闭方式和过程. 中国科学: 地球科学, 47: 293–309
- 杜德道, 曲晓明, 王根厚, 辛洪波, 刘治博. 2011. 西藏班公湖-怒江缝合带西段中特提斯洋盆的双向俯冲: 来自岛弧型花岗岩锆石U-Pb年龄和元素地球化学的证据. 岩石学报, 27: 1993–2002
- 付佳俊, 丁林, 许强, 蔡福龙, 岳雅慧, 郭钰. 2015. 西藏改则洞错地区白垩纪火山岩锆石U-Pb年代学、Hf同位素组成及对班公-怒江洋俯冲闭合的制约. 地质科学, 50: 182–202
- 高顺宝, 郑有业, 王进寿, 张众, 杨成. 2011. 西藏班戈地区侵入岩年代学和地球化学: 对班公湖-怒江洋盆演化时限的制约. 岩石学报, 27: 1973–1982
- 何治亮, 刘继顺. 1996. 青藏高原油气地质条件与勘查方向. 石油与天然气地质, 17: 87–95
- 侯增谦. 2003. 三江义敦岛弧碰撞造山过程过程与成矿系统. 北京: 地质出版社
- 黄丰, 许继峰, 陈建林, 康志强, 董彦辉. 2015. 早侏罗世叶巴组与桑日群火山岩: 特提斯洋俯冲过程中的陆缘弧与洋内弧? 岩石学报, 31: 2089–2100
- 黄汲清, 陈国铭, 陈炳蔚. 1984. 特提斯-喜马拉雅构造域初步分析. 地质学报, 58: 1–17
- 胡修棉, 王建刚, 安慰, Garzanti E, 李娟. 2017. 利用沉积记录精确约束印度-亚洲大陆碰撞时间与过程. 中国科学: 地球科学, 47: 261–283
- 康志强, 许继峰, 王保弟, 陈建林. 2010. 拉萨地块北部去申拉组火山岩:班公湖-怒江特提斯洋南向俯冲的产物? 岩石学报, 26: 3106–3116
- 李小波, 王保弟, 刘函, 王立全, 陈莉. 2015. 西藏达如错地区晚侏罗世高镁安山岩——班公湖-怒江洋壳俯冲消减的证据. 地质通报, 34: 251–261
- 莫宣学, 潘桂棠. 2006. 从特提斯到青藏高原形成: 构造-岩浆事件的约束. 地学前缘, 13: 43–51
- 潘桂棠, 徐耀荣, 王培生. 1982. 青藏高原东部边缘新生代构造. 青藏高原地质文集, 4: 14–14
- 任纪舜, 邓平, 肖黎薇, 牛宝贵, 王军. 2006. 中国与世界主要含油气区大地构造比较分析. 地质学报, 80: 1491–1500
- 宋春彦, 王剑, 付修根, 冯兴雷, 陈明, 何利. 2012. 青藏高原羌塘盆地晚三叠世古地磁数据及其构造意义. 吉林大学学报(地球科学版), 42: 526–535
- 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
- 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
- 肖文交, 敖松坚, 杨磊, 韩春明, 万博, 张继恩, 张志勇, 李睿, 陈振宇, 宋帅华. 2017. 喜马拉雅汇聚带结构-属性解剖及印度-欧亚大陆最终拼贴格局. 中国科学: 地球科学, 60: 1015–1039
- 许志琴, 杨经绥, 李海兵, 嵇少丞, 张泽明, 刘焰. 2011. 印度-亚洲碰撞大地构造. 地质学报, 85: 1–33
- 张国伟, 孟庆任, 于在平, 孙勇, 周鼎武, 郭安林. 1996. 秦岭造山带的造山过程及其动力学特征. 中国科学D辑: 地球科学, 26: 193–200
- 张培震. 2008. 青藏高原东缘川西地区的现今构造变形、应变分配与深部动力过程. 中国科学D辑: 地球科学, 38: 1041–1056
- 邹才能, 翟光明, 张光亚, 王红军, 张国生, 李建忠, 王兆明, 温志新, 马锋, 梁英波, 杨智, 李欣, 梁坤. 2015. 全球常规-非常规油气形成分布、资源潜力及趋势预测. 石油勘探与开发, 42: 13–25
- Advokaat E L, Marshall N T, Li S, Spakman W, Krijgsman W, van Hinsbergen D J J. 2018. Cenozoic rotation history of Borneo and Sundaland, SE Asia revealed by paleomagnetism, seismic tomography, and kinematic reconstruction. *Tectonics*, 37: 2486–2512
- Agard P, Omrani J, Jolivet L, Mouthereau F. 2005. Convergence history across Zagros (Iran): Constraints from collisional and earlier deformation. *Int J Earth Sci-Geol Rund*, 94: 401–419
- Agard P, Omrani J, Jolivet L, Whitechurch H, Vrielynck B, Spakman W, Monié P, Meyer B, Wortel R. 2011. Zagros orogeny: A subduction-dominated process. *Geol Mag*, 148: 692–725
- Aitchison J C, Badengzhu J C, Davis A M, Liu J, Luo H, Malpas J G, McDermid I R C, Wu H, Ziabrev S V, Zhou M. 2000. Remnants of a Cretaceous intra-oceanic subduction system within the Yarlung-Zangbo Suture (Southern Tibet). *Earth Planet Sci Lett*, 183: 231–244

- Aitchison J C, Ali J R, Davis A M. 2007. When and where did India and Asia collide? *J Geophys Res*, 112: B05423
- Alavi M. 1994. Tectonics of the Zagros Orogenic Belt of Iran: New data and interpretations. *Tectonophysics*, 229: 211–238
- Alsharhan A S, Kendall C G S C. 1986. Paleozoic to Early Mesozoic Facies, depositional setting and hydrocarbon habitat in the Middle East: An overview and some play concepts. *Am Assoc Pet Geol Bull*, 70: 977–1002
- Ampaiwan T, Hisada K I, Charusiri P. 2009. Lower Permian glacially influenced deposits in Phuket and adjacent islands, peninsular Thailand. *Island Arc*, 18: 52–68
- An W, Hu X, Garzanti E, Wang J G, Liu Q. 2021. New precise dating of the India-Asia collision in the Tibetan Himalaya at 61 Ma. *Geophys Res Lett*, 48: e90641
- Angiolini L, Balini M, Garzanti E, Nicora A, Tintori A. 2003a. Gondwanan deglaciation and opening of Neotethys: The Al Khlat and Saiwan formations of Interior Oman. *Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol*, 196: 99–123
- Angiolini L, Balini M, Garzanti E, Nicora A, Tintori A, Crasquin S, Muttoni G. 2003b. Permian climatic and paleogeographic changes in Northern Gondwana: The Khuff Formation of Interior Oman. *Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol*, 191: 269–300
- Argand E. 1924. La Tectonique de l'Asie. *Congr Geol Int*, 13th, 1, 171–372. Liege: Vaillant-Carmanne
- Arvin M, Pan Y, Dargahi S, Malekizadeh A, Babaei A. 2007. Petrochemistry of the Siah-Kuh granitoid stock Southwest of Kerman, Iran: Implications for initiation of Neotethys subduction. *J Asian Earth Sci*, 30: 474–489
- Augustin N, van der Zwan F M, Devey C W, Brandsdóttir B. 2021. 13 million years of seafloor spreading throughout the Red Sea Basin. *Nat Commun*, 12: 2427
- Baral U, Lin D, Goswami T K, Sarma M, Qasim M, Bezbaruah D. 2019. Detrital zircon U-Pb geochronology of a Cenozoic foreland basin in Northeast India: Implications for zircon provenance during the collision of the Indian and Asian plates. *Terra Nova*, 31: 18–27
- Béchenne F, Le Métour J, Rabu D, Bourdillon-Jeudy de Grissac C, De Wever P, Beurrier M, Villey M. 1990. The Hawasina Nappes: Stratigraphy, paleogeography, and structural evolution of a fragment of the south-Tethyan passive continental margin. In: Robertson A H F, Searle M P, Ries C A, eds. *The Geology and Tectonics of the Oman Region*. *Geol Soc Spec Publ Lond*, 49: 213–224
- Besse J, Courtillot V. 1991. Revised and synthetic apparent polar wander paths of the African, Eurasian, North American and Indian Plates, and true polar wander since 200 Ma. *J Geophys Res*, 96: 4029–4050
- Besse J, Torcq F, Gallet Y, Ricou L E, Krystyn L, Saidi A. 1998. Late Permian to Late Triassic palaeomagnetic data from Iran: Constraints on the migration of the Iranian Block through the Tethyan Ocean and initial destruction of Pangaea. *Geophys J Int*, 135: 77–92
- Bian W, Yang T, Ma Y, Jin J, Gao F, Zhang S, Wu H, Li H. 2017. New Early Cretaceous palaeomagnetic and geochronological results from the far western Lhasa Terrane: Contributions to the Lhasa-Qiangtang collision. *Sci Rep*, 7: 16216
- Biari Y, Klingelhoefer F, Sahabi M, Funck T, Benabdellouahed M, Schnabel M, Reichert C, Gutscher M A, Bronner A, Austin J A. 2017. Opening of the Central Atlantic Ocean: Implications for geometric rifting and asymmetric initial seafloor spreading after continental breakup. *Tectonics*, 36: 1129–1150
- Bilham R, Larson K, Freymueller J, Project Idylhim members. 1997. GPS measurements of present-day convergence across the Nepal Himalaya. *Nature*, 386: 61–64
- Blendinger W, van Vliet A, Hughes-Clarke M W. 1990. Updoming, rifting and continental margin development during the Late Palaeozoic in northern Oman. *Geol Soc Lond Spec Publ*, 49: 27–37
- Boulin J. 1988. Hercynian and Eocimmerian events in Afghanistan and adjoining regions. *Tectonophysics*, 148: 253–278
- Bousquet R, Goffé B, Vidal O, Oberhänsli R, Patriat M. 2002. The tectono-metamorphic history of the Valaisan domain from the Western to the Central Alps: New constraints on the evolution of the Alps. *Geol Soc Am Bull*, 114: 207–225
- Bucher W H. 1924. The pattern of the Earth's mobile belts. *J Geol*, 32: 265–290
- Burg J P, Arbaret L, Chaudry N M, Dawood H, Hussain S, Zeilinger G. 1998. Infra-arc mantle-crust transition and intra-arc mantle diapirs in the Kohistan Complex (Pakistani Himalaya): Petro-structural evidence. *Terra Nova*, 10: 74–80
- Campanyà J, Ledo J, Queralt P, Marcuello A, Liesa M, Muñoz J A. 2012. New geoelectrical characterisation of a continental collision zone in the West-Central Pyrenees: Constraints from long period and broadband magnetotellurics. *Earth Planet Sci Lett*, 333–334: 112–121
- Channell J E T, D'Argenio B, Horvath F. 1979. Adria, the African promontory, in Mesozoic Mediterranean palaeogeography. *Earth-Sci Rev*, 15: 213–292
- Channell J E T, Erba E, Nakanishi M, Tamaki, K. 1995. Late Jurassic–Early Cretaceous time scales and oceanic magnetic anomaly block models. In: Berggren W A, Kent D V, Aubry M P, Hardenbol J, eds. *Geochronology, Time Scales and Global Stratigraphic Correlation*. *SEPM Spec Publ*. 51–64
- Channell J E T, Kozur H W. 1997. How many oceans? Meliata, Vardar and Pindos Oceans in Mesozoic Alpine paleogeography. *Geology*, 25: 183–186

- Chen J, Huang B, Sun L. 2010. New constraints to the onset of the India-Asia collision: Paleomagnetic reconnaissance on the Linzizong Group in the Lhasa Block, China. *Tectonophysics*, 489: 189–209
- Chen Y, Ding L, Li Z, Laskowski A K, Li J, Baral U, Qasim M, Yue Y. 2020. Provenance analysis of Cretaceous peripheral foreland basin in central Tibet: Implications to precise timing on the initial Lhasa-Qiangtang collision. *Tectonophysics*, 775: 228311
- Chevrot S, Sylvander M, Diaz J, Ruiz M, Paul A. 2015. The Pyrenean architecture as revealed by teleseismic P-to-S converted waves recorded along two dense transects. *Geophys J Int*, 200: 1094–1105
- Chiu H Y, Chung S L, Zarrinkoub M H, Mohammadi S S, Khatib M M, Iizuka Y. 2013. Zircon U-Pb age constraints from Iran on the magmatic evolution related to Neotethyan Subduction and Zagros Orogeny. *Lithos*, 162–163: 70–87
- Chung S L, Lo C H, Lee T Y, Zhang Y, Xie Y, Li X, Wang K L, Wang P L. 2001. Diachronous uplift of the Tibetan Plateau starting 40 Myr ago. *Nature*, 394: 769–773
- Chung S L, Chu M F, Zhang Y, Xie Y, Lo C H, Lee T Y, Lan C Y, Li X, Zhang Q, Wang Y. 2005. Tibetan tectonic evolution inferred from spatial and temporal variations in post-collisional magmatism. *Earth-Sci Rev*, 68: 173–196
- Coleman R G. 1981. Tectonic setting for ophiolite obduction in Oman. *J Geophys Res*, 86: 2497–2508
- Critelli S. 2018. Provenance of Mesozoic to Cenozoic circum-Mediterranean sandstones in relation to tectonic setting. *Earth-Sci Rev*, 185: 624–648
- Dan W, Wang Q, Murphy J B, Zhang X Z, Xu Y G, White W M, Jiang Z Q, Ou Q, Hao L L, Qi Y. 2021. Short duration of Early Permian Qiangtang-Panjal large igneous province: Implications for origin of the Neo-Tethys Ocean. *Earth Planet Sci Lett*, 568: 117054
- De Wever P, Baumgartner P O. 1995. Radiolarians from the base of the Supra-ophiolitic Schistes Lustrés formation in the Alps (Saint-Véran, France and Traversiera Massif, Italy). In: Baumgartner P O, O'Dogerty L, Gorican S, Urquhart E, Pillecuit A, De Wever P, eds. Middle Jurassic to Lower Cretaceous Radiolaria of Tethys: Occurrences, systematics, biochronology. *Mém Géol (Lausanne)*. 23: 725–730
- DeCelles P G, Kapp P, Gehrels G E, Ding L. 2014. Paleocene-Eocene foreland basin evolution in the Himalaya of Southern Tibet and Nepal: Implications for the age of initial India-Asia collision. *Tectonics*, 33: 824–849
- Degnan P J, Robertson A H F. 1998. Mesozoic-Early Tertiary passive margin evolution of the Pindos Ocean (NW Peloponnese, Greece). *Sediment Geol*, 117: 33–70
- Degnan P J, Robertson A H F. 2006. Synthesis of the tectonic-sedimentary evolution of the Mesozoic-Early Cenozoic Pindos ocean: Evidence from the NW Peloponnese, Greece. *Geol Soc Lond Spec Publ*, 260: 467–491
- Dercourt J, Zonenshain L P, Ricou L E, Kazmin V G, Le Pichon X, Knipper A L, Grandjacquet C, Sbortshikov I M, Geyssant J, Lepvrier C, Pechersky D H, Boulin J, Sibuet J C, Savostin L A, Sorokhtin O, Westphal M, Bazhenov M L, Lauer J P, Biju-Duval B. 1986. Geological evolution of the Tethys Belt from the Atlantic to the Pamirs since the LIAS. *Tectonophysics*, 123: 241–315
- Dewey J F, Pitman W C III, Ryan W B F, Bonnin J. 1973. Plate tectonics and the evolution of the Alpine system. *Geol Soc Am Bull* 84: 3137–3180
- Dewey J G, Hempton, M R, Kidd W S F, Saroglu F, Sengör A M C. 1986. Shortening of continental lithosphere: The neotectonics of Eastern Anatolia a young collision zone. In: Coward M P, Rtes A C, eds. *Collision Tectonics*. Geological Society Special Publication, 19: 3–36
- Dewey J F, Helman M L, Knott S D, Turco E, Hutton D H W. 1989. Kinematics of the western Mediterranean. *Geol Soc Lond Spec Publ*, 45: 265–283
- Dick H J B, Lin J, Schouten H. 2003. An ultraslow-spreading class of ocean ridge. *Nature*, 426: 405–412
- Ding L, Kapp P, Wan X. 2005. Paleocene-Eocene record of ophiolite obduction and initial India-Asia collision, south central Tibet. *Tectonics*, 24: TC3001
- Ding L, Qasim M, Jadoon I A K, Khan M A, Xu Q, Cai F, Wang H, Baral U, Yue Y. 2016. The India-Asia collision in north Pakistan: Insight from the U-Pb detrital zircon provenance of Cenozoic foreland basin. *Earth Planet Sci Lett*, 455: 49–61
- Doglioni C. 1991. A proposal for the kinematic modelling of W-dipping subductions-possible applications to the Tyrrhenian-Apennines system. *Terra Nova*, 3: 423–434
- Doucet L S, Li Z X, Ernst R E, Kirscher U, El Dien H G, Mitchell R N. 2019. Coupled supercontinent-mantle plume events evidenced by oceanic plume record. *Geology*, 48: 159–163
- Doucet L S, Li Z X, Gamal El Dien H, Pourteau A, Murphy J B, Collins W J, Mattioli N, Olierook H K H, Spencer C J, Mitchell R N. 2020. Distinct formation history for deep-mantle domains reflected in geochemical differences. *Nat Geosci*, 13: 511–515
- Faccenna C, Becker T W. 2010. Shaping mobile belts by small-scale convection. *Nature*, 465: 602–605
- Fan J J, Li C, Wang M, Xie C M. 2018. Reconstructing in space and time the closure of the middle and western segments of the Bangong-Nujiang Tethyan Ocean in the Tibetan Plateau. *Int J Earth Sci-Geol Rund*, 107: 231–249
- Fang W, van der Voo R, Liang Q. 1989. Devonian paleomagnetism of Yunnan Province across the Shan Thai-South China Suture.

- Tectonics*, 8: 939–952
- Froitzheim N. 2001. Origin of the Monte Rosa nappe in the Pennine Alps—A new working hypothesis. *Geol Soc Am Bull*, 113: 604–614
- Gan W, Zhang P, Shen Z K, Niu Z, Wang M, Wan Y, Zhou D, Cheng J. 2007. Present-day crustal motion within the Tibetan Plateau inferred from GPS measurements. *J Geophys Res*, 112: B08416
- Gao R, Lu Z, Klemperer S L, Wang H, Dong S, Li W, Li H. 2016. Crustal-scale duplexing beneath the Yarlung Zangbo suture in the western Himalaya. *Nat Geosci*, 9: 555–560
- Gautier P, Brun J P, Moriceau R, Sokoutis D, Martinod J, Jolivet L. 1999. Timing, kinematics and cause of Aegean extension: A scenario based on a comparison with simple analogue experiments. *Tectonophysics*, 315: 31–72
- Granot R, Dymant J. 2015. The Cretaceous opening of the South Atlantic Ocean. *Earth Planet Sci Lett*, 414: 156–163
- Gray D R, Gregory R T, Armstrong R A, Richards I J, Miller J M. 2005. Age and stratigraphic relationships of structurally deepest level rocks, Oman Mountains: U/Pb SHRIMP evidence for Late Carboniferous Neotethys rifting. *J Geol*, 113: 611–626
- Guest B, Stockli D F, Grove M, Axen G J, Lam P S, Hassanzadeh J. 2006. Thermal histories from the central Alborz Mountains, northern Iran: Implications for the spatial and temporal distribution of deformation in northern Iran. *Geol Soc Am Bull*, 118: 1507–1521
- 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
- Guo L, Liu Y, Liu S, Cawood P A, Wang Z, Liu H. 2013. Petrogenesis of Early to Middle Jurassic granitoid rocks from the Gangdese Belt, Southern Tibet: Implications for early history of the Neo-Tethys. *Lithos*, 179: 320–333
- Gurnis M. 1988. Large-scale mantle convection and the aggregation and dispersal of supercontinents. *Nature*, 332: 695–699
- Guynn J H, Kapp P, Pullen A, Heizler M, Gehrels G, Lin D L. 2006. Tibetan basement rocks near Amdo reveal “missing” Mesozoic tectonism along the Bangong suture, central Tibet. *Geology*, 34: 505–508
- Hall R. 2012. Late Jurassic-Cenozoic reconstructions of the Indonesian region and the Indian Ocean. *Tectonophysics*, 570–571: 1–41
- Handy M R, Ustaszewski K, Kissling E. 2015. Reconstructing the Alps-Carpathians-Dinarides as a key to understanding switches in subduction polarity, slab gaps and surface motion. *Int J Earth Sci-Geol Rund*, 104: 1–26
- Handy M R, Schmid S, Bousquet R, Kissling E, Bernoulli D. 2010. Reconciling plate-tectonic reconstructions of Alpine Tethys with the geological-geophysical record of spreading and subduction in the Alps. *Earth-Sci Rev*, 102: 121–158
- Heine C, Müller R D, Gaina C. 2004. Reconstructing the Lost Eastern Tethys Ocean Basin: Convergence History of the SE Asian Margin and Marine Gateways. Washington D C: American Geophysical Union. 37–54
- Hempton M R. 1985. Structure and deformation history of the Bitlis suture near Lake Hazar, Southeastern Turkey. *Geol Soc Am Bull*, 96: 233–243
- Hou Z, Zhang H. 2015. Geodynamics and metallogeny of the Eastern Tethyan metallogenic domain. *Ore Geol Rev*, 70: 346–384
- Hu X, Garzanti E, Moore T, Raffi I. 2015. Direct stratigraphic dating of India-Asia collision onset at the Selandian (Middle Paleocene, 59±1 Ma). *Geology*, 43: 859–862
- Hu X, Garzanti E, Wang J, Huang W, An W, Webb A. 2016. The timing of India-Asia collision onset—Facts, theories, controversies. *Earth-Sci Rev*, 160: 264–299
- Huang K, Opdyke N D. 1991. Paleomagnetic results from the Upper Carboniferous of the Shan-Thai-Malay block of Western Yunnan, China. *Tectonophysics*, 192: 333–344
- Ingavat R, Douglass R C. 1981. Fusuline fossils from Thailand, Part 14. The fusulinid Monodioxodina from Northwest Thailand. In: Kobayashi T, Toriyama R, Hashimoto W, eds. *Geology and Palaeontology of Southeast Asia*. Tokyo: University of Tokyo Press. 23–34
- Jagoutz O, Royden L, Holt A F, Becker T W. 2015. Anomalously fast convergence of India and Eurasia caused by double subduction. *Nat Geosci*, 8: 475–478
- Ji W Q, Wu F Y, Chung S L, Li J X, Liu C Z. 2009. Zircon U-Pb geochronology and Hf isotopic constraints on petrogenesis of the Gangdese Batholith, Southern Tibet. *Chem Geol*, 262: 229–245
- Jiang S, Jiang Y, Liu Y, Li S, Zhang W, Wang G, Lu L, Somerville I. 2021. The Bangong-Nujiang Suture Zone, Tibet Plateau: Its role in the tectonic evolution of the eastern Tethys Ocean. *Earth-Sci Rev*, 218: 103656
- Johansen S E, Panzner M, Mittel R, Amundsen H E F, Lim A, Vik E, Landrø M, Arntsen B. 2019. Deep electrical imaging of the ultraslow-spreading mohns ridge. *Nature*, 567: 379–383
- Kang Z Q, Xu J F, Wilde S A, Feng Z H, Chen J L, Wang B D, Fu W C, Pan H B. 2014. Geochronology and geochemistry of the Sangri Group volcanic rocks, Southern Lhasa Terrane: Implications for the early subduction history of the Neo-Tethys and Gangdese Magmatic Arc. *Lithos*, 200–201: 157–168
- Jolivet L, Faccenna C. 2000. Mediterranean extension and the Africa-Eurasia collision. *Tectonics*, 19: 1095–1106
- Kapp P, DeCelles P G. 2019. Mesozoic-Cenozoic geological evolution

- of the Himalayan-Tibetan orogen and working tectonic hypotheses. *Am J Sci*, 319: 159–254
- Kaymakci N, Inceoz M, Ertepinar P, Koc A. 2010. Late Cretaceous to recent kinematics of SE Anatolia (Turkey). *Geol Soc Lond Spec Publ*, 340: 409–435
- Kendall C G, Alsharhan A S. 2013. Reservoir character of carbonate/evaporite oil fields of the Middle East, a response to depositional setting and accommodation space. Search and Discovery Article #20197
- Kock S, Martini R, Reischmann T, Stampfli G M. 2007. Detrital zircon and micropalaeontological ages as new constraints for the lowermost tectonic unit (Talea Ori Unit) of Crete, Greece. *Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol*, 243: 307–321
- Koshnaw R I, Stockli D F, Schlunegger F. 2019. Timing of the Arabia-Eurasia continental collision—Evidence from detrital zircon U-Pb geochronology of the Red Bed Series strata of the northwest Zagros hinterland, Kurdistan region of Iraq. *Geology*, 47: 47–50
- Kreemer C, Holt W E, Haines A J. 2003. An integrated global model of present-day plate motions and plate boundary deformation. *Geophys J Int*, 154: 8–34
- Kufner S K, Kakar N, Bezada M, Bloch W, Metzger S, Yuan X, Mechie J, Ratschbacher L, Murodkulov S, Deng Z, Schurr B. 2021. The Hindu Kush slab break-off as revealed by deep structure and crustal deformation. *Nat Commun*, 12: 1685
- Kumar K V, Laxman M B, Nagaraju K. 2018. Mantle source heterogeneity in continental mafic Large Igneous Provinces: Insights from the Panjal, Rajmahal and Deccan basalts, India. *Geol Soc Lond Spec Publ*, 463: 87–116
- Labails C, Olivet J L, Aslanian D, Roest W R. 2010. An alternative early opening scenario for the Central Atlantic Ocean. *Earth Planet Sci Lett*, 297: 355–368
- Le Pichon X. 1968. Sea-floor spreading and continental drift. *J Geophys Res*, 73: 3661–3697
- Li S M, Wang Q, Zhu D C, Cawood P A, Stern R J, Weinberg R, Zhao Z, Mo X X. 2020. Reconciling orogenic drivers for the evolution of the Bangong-Nujiang Tethys during Middle-Late Jurassic. *Tectonics*, 39: e05951
- Li S, Guilmette C, Ding L, Xu Q, Fu J J, Yue Y H. 2017. Provenance of Mesozoic clastic rocks within the Bangong-Nujiang Suture Zone, Central Tibet: Implications for the age of the initial Lhasa-Qiangtang collision. *J Asian Earth Sci*, 147: 469–484
- Li S, Yin C, Guilmette C, Ding L, Zhang J. 2019. Birth and demise of the Bangong-Nujiang Tethyan Ocean: A review from the Gerze Area of Central Tibet. *Earth-Sci Rev*, 198: 102907
- Li Z X, Mitchell R N, Spencer C J, Ernst R, Pisarevsky S, Kirscher U, Murphy J B. 2019. Decoding Earth's rhythms: Modulation of supercontinent cycles by longer superocean episodes. *Precambrian Res*, 323: 1–5
- Li Z X, Zhong S. 2009. Supercontinent-superplume coupling, true polar wander and plume mobility: Plate dominance in whole-mantle tectonics. *Phys Earth Planet Inter*, 176: 143–156
- Li Z, Ding L, Lippert P C, Song P, Yue Y, van Hinsbergen D J J. 2016. Paleomagnetic constraints on the Mesozoic drift of the Lhasa Terrane (Tibet) from Gondwana to Eurasia. *Geology*, 44: 727–730
- Liati A, Froitzheim N, Fanning C M. 2005. Jurassic ophiolites within the Valais Domain of the Western and Central Alps: Geochronological evidence for re-rifting of oceanic crust. *Contrib Mineral Petrol*, 149: 446–461
- Liu C Z, Chung S L, Wu F Y, Zhang C, Xu Y, Wang J G, Chen Y, Guo S. 2016. Tethyan suturing in Southeast Asia: Zircon U-Pb and Hf-O isotopic constraints from Myanmar ophiolites. *Geology*, 44: 311–314
- Liu D L, Shi R D, Ding L, Zou H B. 2018. Late Cretaceous transition from subduction to collision along the Bangong-Nujiang Tethys: New volcanic constraints from Central Tibet. *Lithos*, 296–299: 452–470
- Ma A, Hu X, Garzanti E, Han Z, Lai W. 2017. Sedimentary and tectonic evolution of the Southern Qiangtang Basin: Implications for the Lhasa-Qiangtang collision timing. *J Geophys Res-Solid Earth*, 122: 4790–4813
- Ma Y, Yang T, Bian W, Jin J, Zhang S, Wu H, Li H. 2016. Early Cretaceous paleomagnetic and geochronologic results from the Tethyan Himalaya: Insights into the Neotethyan paleogeography and the India-Asia collision. *Sci Rep*, 6: 21605
- Ma Y, Yang T, Bian W, Jin J, Wang Q, Zhang S, Wu H, Li H, Cao L. 2018. A stable southern margin of Asia during the Cretaceous: Paleomagnetic constraints on the Lhasa-Qiangtang collision and the maximum width of the Neo-Tethys. *Tectonics*, 37: 3853–3876
- Malusà M G, Guillot S, Zhao L, Paul A, Solarino S, Dumont T, Schwartz S, Aubert C, Baccheschi P, Eva E, Lu Y, Lyu C, Pondrelli S, Salimbeni S, Sun W, Yuan H. 2021. The deep structure of the Alps based on the CIFALPS seismic experiment: A synthesis. *Geochem Geophys Geosyst*, 22: e09466
- Martin C R, Jagoutz O, Upadhyay R, Royden L H, Eddy M P, Bailey E, Nichols C I O, Weiss B P. 2020. Paleocene latitude of the Kohistan-Ladakh arc indicates multistage India-Eurasia collision. *Proc Natl Acad Sci USA*, 117: 29487–29494
- Martin S, Tartarotti P, Dal Piza G V. 1994. The Mesozoic ophiolite of the Apls: A review. *Bollettino di Geofisica Teorica ed Applicata*, 36: 141–144
- Matthews K J, Maloney K T, Zahirovic S, Williams S E, Seton M, Müller R D. 2016. Global plate boundary evolution and kinematics since the Late Paleozoic. *Glob Planet Change*, 146: 226–250
- Maury R C, Béchenec F, Cotten J, Caroff M, Cordey F, Marcoux J. 2003. Middle Permian plume-related magmatism of the Hawasina

- Nappes and the Arabian Platform: Implications on the evolution of the Neotethyan margin in Oman. *Tectonics*, 22: 1073
- McClusky S, Balassanian S, Barka A, Demir C, Ergintav S, Georgiev I, Gurkan O, Hamburger M, Hurst K, Kahle H, Kastens K, Kekelidze G, King R, Kotzev V, Lenk O, Mahmoud S, Mishin A, Nadariya M, Ouzounis A, Paradissis D, Peter Y, Prilepin M, Reilinger R, Sanli I, Seeger H, Tealeb A, Toksöz M N, Veis G. 2000. Global Positioning System constraints on plate kinematics and dynamics in the eastern Mediterranean and Caucasus. *J Geophys Res*, 105: 5695–5719
- McKenzie D P, Parker R L. 1967. The North Pacific: An example of tectonics on a sphere. *Nature*, 216: 1276–1280
- McQuarrie N, Stock J M, Verdel C, Wernicke B P. 2003. Cenozoic evolution of Neotethys and implications for the causes of plate motions. *Geophys Res Lett*, 30: 2036
- McQuarrie N, van Hinsbergen D J J. 2013. Retrodeforming the Arabia-Eurasia collision zone: Age of collision versus magnitude of continental subduction. *Geology*, 41: 315–318
- Meng J, Gilder S A, Li Y, Wang C, Liu T. 2020. Expanse of greater India in the Late Cretaceous. *Earth Planet Sci Lett*, 542: 116330
- Metcalfe I. 2011. Palaeozoic-Mesozoic history of SE Asia. *Geol Soc Lond Spec Publ*, 355: 7–35
- Metcalfe I. 2013. Gondwana dispersion and Asian accretion: Tectonic and palaeogeographic evolution of Eastern Tethys. *J Asian Earth Sci*, 66: 1–33
- Mitchell A H G. 1993. Cretaceous-Cenozoic tectonic events in the western Myanmar (Burma)-Assam region. *J Geol Soc*, 150: 1089–1102
- Moghadam H S, Corfu F, Stern R J. 2013. U-Pb zircon ages of Late Cretaceous Nain-Dehshir ophiolites, central Iran. *J Geol Soc*, 170: 175–184
- Moix P, Beccaletto L, Kozur H W, Hochard C, Rosset F, Stampfli G M. 2008. A new classification of the Turkish terranes and sutures and its implication for the paleotectonic history of the region. *Tectonophysics*, 451: 7–39
- Morgan W J. 1968. Rises, trenches, great faults, and crustal blocks. *J Geophys Res*, 73: 1959–1982
- Molnar P, Stock J M. 2009. Slowing of India's convergence with Eurasia since 20 Ma and its implications for Tibetan mantle dynamics. *Tectonics*, 28: TC3001
- Molnar P, Boos W R, Battisti D S. 2010. Orographic controls on climate and paleoclimate of Asia: Thermal and mechanical roles for the Tibetan Plateau. *Annu Rev Earth Planet Sci*, 38: 77–102
- Muttoni G, Mattei M, Balini M, Zanchi A, Gaetani M, Berra F. 2009. The drift history of Iran from the Ordovician to the Triassic. *Geol Soc Lond Spec Publ*, 312: 7–29
- Muttoni G, Tartarotti P, Chiari M, Marieni C, Rodelli D, Dallanave E, Kirscher U. 2015. Paleolatitudes of Late Triassic radiolarian cherts from Argolis, Greece: Insights on the paleogeography of the western Tethys. *Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol*, 417: 476–490
- Neumayr M. 1885. Die geographische Verbreitung der Juraformation. *Denkschr Akad Wiss Wien Math-Naturwiss Cl*, 15: 57–114
- Okay A I, Altiner D, Sunal G, Aygöl M, Akdoğan R, Altiner S, Simmons M. 2018. Geological evolution of the central Pontides. *Geol Soc Lond Spec Publ*, 464: 33–67
- Okay A I, Sunal G, Sherlock S, Kylander-Clark A R C, Özcan E. 2020. İzmir-Ankara suture as a Triassic to Cretaceous plate boundary—Data from Central Anatolia. *Tectonics*, 39: e05849
- Okay A I, Zattin M, Cavazza W. 2010. Apatite fission-track data for the Miocene Arabia-Eurasia collision. *Geology*, 38: 35–38
- Papanikolaou D. 2013. Tectonostratigraphic models of the alpine terranes and subduction history of the hellenides. *Tectonophysics*, 595-596: 1–24
- Patriat P, Achache J. 1984. India-Eurasia collision chronology has implications for crustal shortening and driving mechanism of plates. *Nature*, 311: 615–621
- Petterson M G. 2010. A Review of the geology and tectonics of the Kohistan island arc, north Pakistan. *Geol Soc Lond Spec Publ*, 338: 287–327
- Ran B, Wang C, Zhao X, Li Y, He M, Zhu L, Coe R S. 2012. New paleomagnetic results of the Early Permian in the Xainza Area, Tibetan Plateau and their paleogeographical implications. *Gondwana Res*, 22: 447–460
- Rao C P. 1988. Paleoclimate of some Permo-Triassic carbonates of Malaysia. *Sediment Geol*, 60: 163–171
- Robertson A H F, Clift P D, Degnan P J, Jones G. 1991. Palaeogeographic and palaeotectonic evolution of the Eastern Mediterranean Neotethys. *Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol*, 87: 289–343
- Robertson A H F, Trivić B, Đerić N, Bucur I I. 2013. Tectonic development of the Vardar Ocean and its margins: Evidence from the Republic of Macedonia and Greek Macedonia. *Tectonophysics*, 595-596: 25–54
- Roda M, Regorda A, Spalla M I, Marotta A M, Frassi C, Frassi C. 2019. What drives Alpine Tethys opening? Clues from the review of geological data and model predictions. *Geol J*, 54: 2646–2664
- Rolland Y, Perincek D, Kaymakci N, Sosson M, Barrier E, Avagyan A. 2012. Evidence for ~80–75 Ma subduction jump during Anatolide-Tauride-Armenian Block accretion and ~48 Ma Arabia-Eurasia collision in Lesser Caucasus-East Anatolia. *J Geodyn*, 56-57: 76–85
- Royden L H. 1993. Evolution of retreating subduction boundaries formed during continental collision. *Tectonics*, 12: 629–638
- Sasipiturry N, Issautier B, Razin P, Baudin T, Asti R, Lagabriele Y,

- Allanic C, Serrano O, Duretz T. 2021. Review of Iberia-Eurasia plate-boundary basins: Role of sedimentary burial and salt tectonics during rifting and continental breakup. *Basin Res*, 33: 1626–1661
- Schmid S M, Fügenschuh B, Kissling E, Schuster R. 2004. Tectonic map and overall architecture of the Alpine Orogen. *Eclogae geol Helv*, 97: 93–117
- Scotese C R, Golonka J. 1993. PALEOMAP Paleogeographic Atlas, PALEOMAP Progress Report # 20. Department of Geology, University of Texas at Arlington, 28 maps
- Searle M, Cox J. 1999. Tectonic setting, origin, and obduction of the Oman ophiolite. *Geol Soc Am Bull*, 111: 104–122
- Sengör A M C. 1979. Mid-Mesozoic closure of Permo-Triassic Tethys and its implications. *Nature*, 279: 590–593
- Sengör A M C. 1987. Tectonics of the Tethysides: Orogenic collage development in a collisional setting. *Annu Rev Earth Planet Sci*, 15: 213–244
- Sengör A M C, Yilmaz Y. 1981. Tethyan evolution of Turkey: A plate tectonic approach. *Tectonophysics*, 75: 181–241
- Sengör A M C, Görür N, Aroglu F. 1985. Strike-slip faulting and related basin formation in zones of tectonic escape: Turkey as a case study. In: Biddle K T, Christie-Blick N, eds. *Strike-slip Faulting and Basin Formation*. Spec Publ Soc Econ Paleontol Mineral, 37: 227–267
- Shellnutt J G. 2018. The Panjal traps. *Geol Soc Lond Spec Publ*, 463: 59–86
- Shen Z K, Lü J, Wang M, Bürgmann R. 2005. Contemporary crustal deformation around the southeast borderland of the Tibetan Plateau. *J Geophys Res*, 110: B11409
- Shi D, Klemperer S L, Shi J, Wu Z, Zhao W. 2020. Localized foundering of Indian lower crust in the India-Tibet collision zone. *Proc Natl Acad Sci USA*, 117: 24742–24747
- Sibuet J C, Srivastava S P, Spakman W. 2004. Pyrenean orogeny and plate kinematics. *J Geophys Res*, 109: B08104
- Song P, Ding L, Li Z, Lippert P C, Yang T, Zhao X, Fu J, Yue Y. 2015. Late Triassic paleolatitude of the Qiangtang Block: Implications for the closure of the Paleo-Tethys Ocean. *Earth Planet Sci Lett*, 424: 69–83
- Song P, Ding L, Li Z, Lippert P C, Yue Y. 2017. An early bird from Gondwana: Paleomagnetism of Lower Permian lavas from Northern Qiangtang (Tibet) and the geography of the Paleo-Tethys. *Earth Planet Sci Lett*, 475: 119–133
- Stampfli G M, Mosar J, Favre P, Pillevuit A, Vannay J C. 2001. Permo-Mesozoic evolution of the western Tethyan realm: The Neotethys/East Mediterranean connection. In: Ziegler P A, Cavazza W, Robertson A H F, Crasquin-Soleau S, eds. *Peri-Tethys Memoir 6. Peritethyan Rift/Wrench Basins and Passive Margins*. IGCP 369. Mem Mus Natl Hist Nat, 186: 51–108
- Stampfli G M, Borel G D. 2002. A plate tectonic model for the Paleozoic and Mesozoic constrained by dynamic plate boundaries and restored synthetic oceanic isochrons. *Earth Planet Sci Lett*, 196: 17–33
- Stauffer P H, Lee C P. 1986. Late Paleozoic glacial marine facies in Southeast Asia and its implications. *Geol Soc Malaysia Bull*, 20: 363–397
- Stern R J, Gerya T. 2018. Subduction initiation in nature and models: A review. *Tectonophysics*, 746: 173–198
- Stille H. 1948. Ur- und Neozoene. *Abh Deutsch Akad Wiss*, 1945/46. Berlin: Math-Naturwiss. 6, 68
- Stöcklin J. 1968. Structural history and tectonics of Iran: A review. *AAPG Bull*, 52: 1229–1258
- Stöcklin J. 1974. Northern Iran: Alborz Mountains. *Geol Soc Lond Spec Publ*, 4: 213–234
- Suess E. 1893. Are great ocean depths permanent? *Nat Sci*, 2: 180–187
- Sun Z, Jiang W, Li H, Pei J, Zhu Z. 2010. New paleomagnetic results of paleocene volcanic rocks from the Lhasa Block: Tectonic implications for the collision of India and Asia. *Tectonophysics*, 490: 257–266
- Tan X, Gilder S, Kodama K P, Jiang W, Han Y, Zhang H, Xu H, Zhou D. 2010. New paleomagnetic results from the Lhasa Block: Revised estimation of latitudinal shortening across Tibet and implications for dating the India-Asia collision. *Earth Planet Sci Lett*, 293: 396–404
- Taylor M, Yin A, Ryerson F J, Kapp P, Ding L. 2003. Conjugate strike-slip faulting along the Bangong-Nujiang suture zone accommodates coeval east-west extension and north-south shortening in the interior of the Tibetan Plateau. *Tectonics*, 22: 1044
- Tiepolo M, Tribuzio R, Ji W Q, Wu F Y, Lustrino M. 2014. Alpine Tethys closure as revealed by amphibole-rich mafic and ultramafic rocks from the Adamello and the Bergell intrusions (Central Alps). *J Geol Soc*, 171: 793–799
- Torsvik T H, Rouse S, Labails C, Smethurst M A. 2009. A new scheme for the opening of the South Atlantic Ocean and the dissection of an Aptian Salt Basin. *Geophys J Int*, 177: 1315–1333
- Torsvik T H, van der Voo R, Preeden U, Mac Niocaill C, Steinberger B, Doubrovine P V, van Hinsbergen D J J, Domeier M, Gaina C, Tohver E, Meert J G, McCausland P J A, Cocks L R M. 2012. Phanerozoic polar wander, palaeogeography and dynamics. *Earth-Sci Rev*, 114: 325–368
- Torsvik T H, van der Voo R, Doubrovine P V, Burke K, Steinberger B, Ashwal L D, Trønnes R G, Webb S J, Bull A L. 2014. Deep mantle structure as a reference frame for movements in and on the Earth. *Proc Natl Acad Sci USA*, 111: 8735–8740
- Torsvik T H, Cocks L R. 2016. *Earth History and Palaeogeography-8 Devonian*. Cambridge: Cambridge University Press. 138–158
- Ueda K, Gerya T, Sobolev S V. 2008. Subduction initiation by thermal-

- chemical plumes: Numerical studies. *Phys Earth Planet Inter*, 171: 296–312
- van der Boon A, van Hinsbergen D J J, Rezaeian M, Gürer D, Honarmand M, Pastor-Galán D, Krijgsman W, Langereis C G. 2018. Quantifying Arabia-Eurasia convergence accommodated in the Greater Caucasus by paleomagnetic reconstruction. *Earth Planet Sci Lett*, 482: 454–469
- van der Voo R. 1993. Paleomagnetism of the Atlantic, Tethys and Iapetus Oceans. Cambridge: Cambridge University Press
- van Hinsbergen D J J, Lippert P C, Dupont-Nivet G, McQuarrie N, Doubrovine P V, Spakman W, Torsvik T H. 2012. Greater India Basin hypothesis and a two-stage Cenozoic collision between India and Asia. *Proc Natl Acad Sci USA*, 109: 7659–7664
- van Hinsbergen D J J, Torsvik T H, Schmid S M, Mañenco L C, Maffione M, Vissers R L M, Gürer D, Spakman W. 2020. Orogenic architecture of the Mediterranean region and kinematic reconstruction of its tectonic evolution since the Triassic. *Gondwana Res*, 81: 79–229
- Vernant P, Nilforoushan F, Hatzfeld D, Abbassi M R, Vigny C, Masson F, Nankali H, Martinod J, Ashtiani A, Bayer R, Tavakoli F, Chéry J. 2004. Present-day crustal deformation and plate kinematics in the Middle East constrained by GPS measurements in Iran and northern Oman. *Geophys J Int*, 157: 381–398
- Wang C, Zhao X, Liu Z, Lippert P C, Graham S A, Coe R S, Yi H, Zhu L, Liu S, Li Y. 2008. Constraints on the early uplift history of the Tibetan Plateau. *Proc Natl Acad Sci USA*, 105: 4987–4992
- Wang C, Ding L, Zhang L Y, Kapp P, Pullen A, Yue Y H. 2016. Petrogenesis of Middle-Late Triassic volcanic rocks from the Gangdese Belt, Southern Lhasa Terrane: Implications for Early subduction of Neo-Tethyan oceanic lithosphere. *Lithos*, 262: 320–333
- Wang H Q, Ding L, Kapp P, Cai F L, Clinkscales C, Xu Q, Yue Y H, Li S, Fan S Q. 2018. Earliest Cretaceous accretion of Neo-Tethys oceanic subduction along the Yarlung Zangbo Suture Zone, Sangsang area, southern Tibet. *Tectonophysics*, 744: 373–389
- Wang Q, Zhang P Z, Freymueller J T, Bilham R, Larson K M, Lai X, You X, Niu Z, Wu J, Li Y, Liu J, Yang Z, Chen Q. 2001. Present-day crustal deformation in China constrained by Global Positioning System measurements. *Science*, 294: 574–577
- Wei Y, Zhao Z, Niu Y, Zhu D C, Liu D, Wang Q, Hou Z, Mo X, Wei J. 2017. Geochronology and geochemistry of the Early Jurassic Yeba Formation volcanic rocks in Southern Tibet: Initiation of back-arc rifting and crustal accretion in the Southern Lhasa Terrane. *Lithos*, 278–281: 477–490
- Wensink H. 1983. Paleomagnetism of red beds of Early Devonian age from Central Iran. *Earth Planet Sci Lett*, 63: 325–334
- Wensink H. 1994. Paleomagnetism of rocks from Sumba: Tectonic implications since the late Cretaceous. *J Southeast Asian Earth Sci*, 9: 51–65
- Wensink H, Zijdeveld J D A, Varekamp J C. 1978. Paleomagnetism and ore mineralogy of some basalts of the geirud formation of Late Devonian-Early Carboniferous age from the Southern Alborz, Iran. *Earth Planet Sci Lett*, 41: 441–450
- Westerweel J, Roperch P, Licht A, Dupont-Nivet G, Win Z, Poblete F, Ruffet G, Swe H H, Thi M K, Aung D W. 2019. Burma terrane part of the Trans-Tethyan arc during collision with India according to palaeomagnetic data. *Nat Geosci*, 12: 863–868
- Whattam S A, Stern R J. 2015. Late Cretaceous plume-induced subduction initiation along the southern margin of the Caribbean and NW South America: The first documented example with implications for the onset of plate tectonics. *Gondwana Res*, 27: 38–63
- Wilson J T. 1963. Hypothesis of Earth's behaviour. *Nature*, 198: 925–929
- Wu F Y, Ji W Q, Liu C Z, Chung S L. 2010. Detrital zircon U-Pb and Hf isotopic data from the Xigaze fore-arc basin: Constraints on Transhimalayan magmatic evolution in southern Tibet. *Chem Geol*, 271: 13–25
- Wu F Y, Ji W Q, Wang J G, Liu C Z, Chung S L, Clift P D. 2014. Zircon U-Pb and Hf isotopic constraints on the onset time of India-Asia collision. *Am J Sci*, 314: 548–579
- Wu Z, Chen L, Talebian M, Wang X, Jiang M, Ai Y, Lan H, Gao Y, Khatib M, Hou G, Chung S L, Liang X, Zhao L, Naimi-Ghassabian N, Xiao W, Zhu R. 2021. Lateral structural variation of the lithosphere-asthenosphere system in the northeastern to eastern Iranian plateau and its tectonic implications. *J Geophys Res-Solid Earth*, 126: e2020JB020256
- Yan L L, Zhang K J. 2020. Infant intra-oceanic arc magmatism due to initial subduction induced by oceanic plateau accretion: A case study of the Bangong Meso-Tethys, Central Tibet, Western China. *Gondwana Res*, 79: 110–124
- Yan M, Zhang D, Fang X, Ren H, Zhang W, Zan J, Song C, Zhang T. 2016. Paleomagnetic data bearing on the Mesozoic deformation of the Qiangtang Block: Implications for the evolution of the Paleo- and Meso-Tethys. *Gondwana Res*, 39: 292–316
- Yan Y, Huang B, Zhao J, Zhang D, Liu X, Charusiri P, Veeravinantanakul A. 2017. Large southward motion and clockwise rotation of Indochina throughout the Mesozoic: Paleomagnetic and detrital zircon U-Pb geochronological constraints. *Earth Planet Sci Lett*, 459: 264–278
- Yan Y, Huang B, Zhang D, Charusiri P, Veeravinantanakul A. 2018. Paleomagnetic study on the Permian rocks of the Indochina Block

- and its implications for paleogeographic configuration and northward drifting of cathaysialand in the Paleo-Tethys. *J Geophys Res-Solid Earth*, 123: 4523–4538
- Yan Y, Zhao Q, Zhang Y, Huang B, Zheng W, Zhang P. 2019. Direct paleomagnetic constraint on the closure of Paleo-Tethys and its implications for linking the Tibetan and Southeast Asian blocks. *Geophys Res Lett*, 46: 14368–14376
- Yan Z, Chen L, Xiong X, Wan B, Xu H. 2021. Oceanic plateau and subduction zone jump: Two-dimensional thermo-mechanical modeling. *J Geophys Res-Solid Earth*, 126: e21855
- Yin A. 2010. Cenozoic tectonic evolution of Asia: A preliminary synthesis. *Tectonophysics*, 488: 293–325
- Yin A, Harrison T M. 2000. Geologic evolution of the Himalayan-Tibetan Orogen. *Annu Rev Earth Planet Sci*, 28: 211–280
- Yuan J, Yang Z, Deng C, Krijgsman W, Hu X, Li S, Shen Z, Qin H, An W, He H, Ding L, Guo Z, Zhu R. 2021. Rapid drift of the Tethyan Himalaya terrane before two-stage India-Asia collision. *Natl Sci Rev*, 8: nwaal73
- Zhang L L, Liu C Z, Wu F Y, Ji W Q, Wang J G. 2014. Zedong terrane revisited: An intra-oceanic arc within Neo-Tethys or a part of the Asian active continental margin? *J Asian Earth Sci*, 80: 34–55
- Zhang X, Chung S L, Tang J T, Maulana A, Mawaleda M, Oo T, Tien C Y, Lee H Y. 2021. Tracing Argoland in eastern Tethys and implications for India-Asia convergence. *Geol Soc Am Bull*, 133: 1712–1722
- Zhang Z, Xiao W, Ji W, Majidifard M R, Rezaeian M, Talebian M, Xiang D, Chen L, Wan B, Ao S, Esmaeili R. 2018. Geochemistry, zircon U-Pb and Hf isotope for granitoids, NW Sanandaj-Sirjan zone, Iran: Implications for Mesozoic-Cenozoic episodic magmatism during Neo-Tethyan lithospheric subduction. *Gondwana Res*, 62: 227–245
- Zhao J, Huang B, Yan Y, Bai Q, Dong Y, Win Z, Aung H H, Yang X, Li S, Li S. 2020. A palaeomagnetic study of the Middle Permian and Middle Triassic limestones from Shan State, Myanmar: Implications for collision of the Sibumasu terrane and Indochina terrane. *Geol J*, 55: 1179–1194
- Zhao J, Huang B, Yan Y, Zhang D. 2015. Late Triassic paleomagnetic result from the Baoshan Terrane, West Yunnan of China: Implication for orientation of the East Paleotethys suture zone and timing of the Sibumasu-Indochina collision. *J Asian Earth Sci*, 111: 350–364
- Zhao J M, Yuan X H, Liu H B, Kumar P, Pei S P, Kind R, Zhang Z J, Teng J W, Ding L, Gao X, Xu Q, Wang W. 2010. The boundary between the Indian and Asian tectonic plates below Tibet. *Proc Natl Acad Sci USA*, 107: 11229–11233
- Zhao L, Malusà M G, Yuan H, Paul A, Guillot S, Lu Y, Stehly L, Solarino S, Eva E, Lu G, Bodin T. 2020. Evidence for a serpentinized plate interface favouring continental subduction. *Nat Commun*, 11: 2171
- Zhao L, Paul A, Malusà M G, Xu X, Zheng T, Solarino S, Guillot S, Schwartz S, Dumont T, Salimbeni S, Aubert C, Pondrelli S, Wang Q, Zhu R. 2016. Continuity of the Alpine slab unraveled by high-resolution P wave tomography. *J Geophys Res-Solid Earth*, 121: 8720–8737
- Zhao L, Paul A, Guillot S, Solarino S, Malusà M G, Zheng T, Aubert C, Salimbeni S, Dumont T, Schwartz S, Zhu R, Wang Q. 2015. First seismic evidence for continental subduction beneath the Western Alps. *Geology*, 43: 815–818
- Zheng T, He Y, Ding L, Jiang M, Ai Y, Mon C T, Hou G, Sein K, Thant M. 2020. Direct structural evidence of Indian continental subduction beneath Myanmar. *Nat Commun*, 11: 1944
- Zheng Y F. 2019. Subduction zone geochemistry. *Geosci Front*, 10: 1223–1254
- Zheng Y F, Wu F Y. 2018. The timing of continental collision between India and Asia. *Sci Bull*, 63: 1649–1654
- Zhong S, Zhang N, Li Z X, Roberts J H. 2007. Supercontinent cycles, true polar wander, and very long-wavelength mantle convection. *Earth Planet Sci Lett*, 261: 551–564
- Zhong X, Li Z H. 2020. Subduction initiation during collision-induced subduction transference: Numerical modeling and implications for the Tethyan evolution. *J Geophys Res-Solid Earth*, 125: e19288
- Zhou Y, Cheng X, Yu L, Yang X, Su H, Peng X, Xue Y, Li Y, Ye Y, Zhang J, Li Y, Wu H. 2016. Paleomagnetic study on the Triassic rocks from the Lhasa Terrane, Tibet, and its paleogeographic implications. *J Asian Earth Sci*, 121: 108–119
- Zhu D C, Li S M, Cawood P A, Wang Q, Zhao Z D, Liu S A, Wang L Q. 2016. Assembly of the Lhasa and Qiangtang Terranes in Central Tibet by divergent double subduction. *Lithos*, 245: 7–17
- Zhu D C, Wang Q, Zhao Z D, Chung S L, Cawood P A, Niu Y, Liu S A, Wu F Y, Mo X X. 2015. Magmatic record of India-Asia collision. *Sci Rep*, 5: 14289
- Zhu D C, Zhao Z D, Niu Y, Dilek Y, Hou Z Q, Mo X X. 2013. The origin and pre-Cenozoic evolution of the Tibetan Plateau. *Gondwana Res*, 23: 1429–1454
- Zhu D C, Zhao Z D, Niu Y, Mo X X, Chung S L, Hou Z Q, Wang L Q, Wu F Y. 2011a. The Lhasa Terrane: Record of a microcontinent and its histories of drift and growth. *Earth Planet Sci Lett*, 301: 241–255
- Zhu D C, Zhao Z D, Niu Y, Dilek Y, Mo X X. 2011b. Lhasa Terrane in Southern Tibet came from Australia. *Geology*, 39: 727–730

(责任编委: 郑永飞)