

大陆逃逸构造研究现状

张宇, 施炜

(中国地质科学院地质力学研究所, 北京 100081)

摘要: 大陆逃逸构造是陆内构造变形主要方式之一, 系统总结分析逃逸构造形成机制, 对建立大陆构造模式、认识大陆构造变形机理具有重要意义。基于目前发现的大陆逃逸构造, 总结并提出了其力学机制、构造模型以及研究方法。大陆逃逸构造是板块碰撞后期在共轭的“V”字形构造控制下发展而来的重要构造形式, 协调了构造应力机制的转变。在力学机制方面, 逃逸构造“V”字型断裂带符合 PGS 模型 (paired general-shear model) 和先存构造活动性准则, 该准则是基于库伦—摩尔准则和摩擦滑动律的扩展; 构造模型方面, 侧向逃逸和斜向挤出模式是逃逸构造的基本模型; 研究方法方面, 构造解析仍然是建立逃逸构造的基本方法, 利用构造模拟进一步再现其变形过程与动力学机制是其必要的研究方法。

关键词: 大陆岩石圈; 逃逸构造; 力学机制; 构造模型; 陆内变形

中图分类号: P542

文献标识码: A

ADVANCES IN CONTINENTAL SCAPE STRUCTURES

ZHANG Yu, SHI Wei

(Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Science, Beijing 100081, China)

Abstract: The continental scape structure, as one of the important structural styles to accommodate intracontinental deformation, is of great significance to understand intracontinental deformation, strain partitioning and formation mechanism during tectonic evolution of the continent. Based on the previous continental escape structures defined in structural belt, this paper synthesizes the formation mechanism, tectonic models and methods of continental scape structures. The structure is generally formed due to the limitation of conjugate V-shaped structure at the end stage of continental collision, and it plays a key role in coordinating the transformation of stress regime. Mechanically, the formation of V-shaped fracture zones coincides with the paired general-shear model and the preexisting structure activity criterion according to the Byerlee law and the Coulomb-Mohr fracture criterion. The escape models essentially include lateral escape and oblique extrusion. Structural analysis is essentially necessary in the definition of an escape structure, and tectonic modeling is a reliable tool to reconstruct and understand tectonic processes of continental lateral extrusion.

Key words: continental lithosphere; scape structures; mechanical mechanism; structural model; intra-continental deformation

0 引言

从地质演化历史来看,大陆板块并不是一个完整的稳定块体。自新太古代以来,大陆地壳的体积并未发生本质变化,只是以板块运动的方式发生着多旋回的裂解和拼贴,最终形成了现今大陆的形态格局^[1-2]。在板块碰撞造山初期和后期,最大主应力均垂直于造山带。由于板块持续汇聚挤压而导致造山带重力势能持续增加,最小主应力由板块碰撞初期的垂直于水平面转变为平行于造山带,这一阶段也称为后造山阶段。在这一阶段往往由于平行造山带方向发生伸展垮塌而形成逃逸构造。远离板块边缘的板块内部,对板块边缘碰撞/俯冲远程效应的应力—应变调整,其往往也经历了同变形挤压缩短和后变形伸展垮塌的动力学过程。因此,大陆逃逸构造对板块碰撞后期大陆应力机制的转换具有重要指示意义。东亚大陆作为太平洋板块、印度洋板块和西伯利亚板块汇聚的中心,经历了十分复杂的碰撞造山和陆内变形^[3-5],板缘发生的多向、多期块体俯冲和碰撞作用是导致板内复杂陆内变形的重要原因之一^[6-8]。东亚大陆晚中生代以来经历了强烈的陆内变形,变形表现为挤压、伸展、走滑和旋转等构造方式^[9-15],其中一些构造带表现为逃逸构造^[16-18]。

逃逸构造是指块体沿着滑动方向相反的共轭走滑断裂带向低应力区移动所形成的构造系统,是相对刚性的块体挤入相对软弱的块体,往往伴随着地壳的拉伸减薄、不同块体的横向接触以及形成扩张盆地^[19-21]。产生走滑断裂的力学机制以及逃逸块体与周边地质体的刚性差异是形成逃逸构造的必备条件。在欧亚—印度板块碰撞研究中,Tapponier等^[22]基于滑线场理论解析碰撞后期陆内变形和块体逃逸构造,认为块体逃逸为上地壳尺度的水平位移,并未探讨块体逃逸与深部构造活动的关联性,当然滑线场理论在地质学中的应用也存在争议;许志琴等^[17,23]综合构造几何学、运动学和年代学方法,提出青藏高原东南缘块体逃逸机制,认为岩石圈横弯褶皱作用与层间滑脱是块体逃逸的主要机制。该机制重点强调陆内地壳的三维变形,否定深部下地壳流对逃逸构造的影响。Liu等^[24]通过层析成像技术,提出中、上地壳的块体逃逸与下地壳流共同作用导致现今青藏高

原东南缘向东挤出构造。桐柏—大别造山带作为典型的中生代逃逸构造,杨志华等^[21,25-26]曾提出秦岭—大别造山带抽拉-逆冲岩片构造模式;Liu等^[16]和Cui等^[27]通过年代学研究和造山带两侧韧性剪切带运动学分析,提出桐柏—大别造山带向东南斜向挤出模式,但未限定造山带挤出构造的底界滑脱面。此外,土耳其块体和东阿尔卑斯楔状挤出块体也是典型的大陆逃逸构造^[28-30]。文章在现有的逃逸构造研究基础上重点研究陆内逃逸构造,综述了大陆逃逸构造力学机制和构造模型。

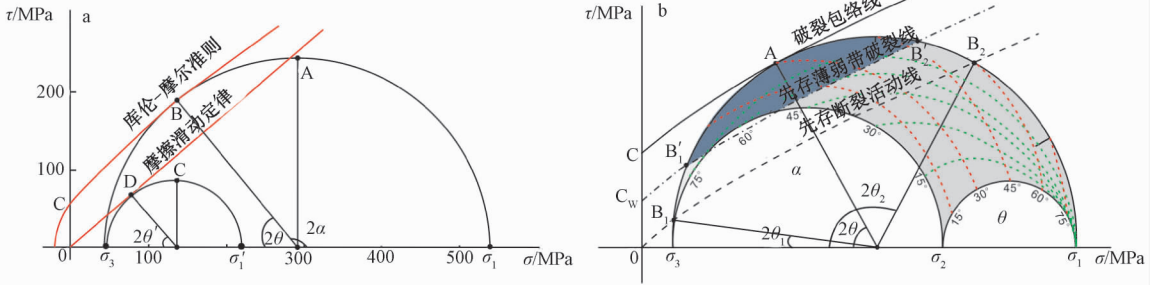
1 理论基础

东亚大陆由多个板块或微板块拼合而成^[31-34],早期板块拼合形成的缝合带成为后期陆内变形的潜在滑动面,这些缝合带是由被动大陆边缘沉积物和增生杂岩等相对软弱的物质组成。当岩石圈受到应力作用时,古缝合带为主要的构造软弱带和应变集中带,因此,许多与逃逸构造相关的大型走滑断裂主要沿着古缝合带附近优先发育^[18]。地震研究也表明块体周围往往是地震多发带,块体内部则是无震区,如鄂尔多斯块体^[35]。滑线场理论较好地解释了新生代以来东亚大陆主要变形方式^[3,36]。力学分析表明,在刚性块体楔入相对塑性的均质介质中,主应力 σ_1 、 σ_3 被分解为两个共轭方向的剪应力,当最大剪应力 $\tau = (\sigma_1 - \sigma_3) / 2$ 大于材料屈服强度时,塑性材料沿着共轭方向发生剪切破裂,形成共轭破裂线即滑移线(走滑断层)。滑线场理论是材料力学中研究均匀塑性材料变形的理论基础,但不能完全适用于大陆岩石圈变形机制^[22]。

通常认为上地壳岩石破裂一般符合库伦-摩尔准则,当岩体承受的最大剪应力超过自身抗剪强度时会发生破裂,物理表达式为 $\tau_n = C + \mu\sigma_n$ ^[37],从公式中可以看出克服内聚力 C 和内摩擦力 $\mu\sigma_n$ 是岩石破裂的实质。库伦-摩尔准则的适用条件为均质材料,由于节理、断层和先存薄弱面等因素的影响,库伦-摩尔准则不符合一般地质体的破裂滑动^[38-39]。由于具有先存滑动面的地质体不存在抗剪强度,该类岩石在承受剪应力时遵循摩擦滑动定律 $\tau_n = \mu_r\sigma_n$ ^[40],当应力施加时,岩石的滑动破裂只需克服内摩擦力。随着时间的推移断裂面会发生局部愈合或者断裂面未完全分离,这种情

况下岩石破裂需要克服的内聚力小于完整岩体的内聚力, 内摩擦系数也不同于上文所述的两种情况。在此基础上, Tong 等^[41-42]提出先存构造活动性准则, 物理公式为 $\tau_n = C_w + \mu_w \sigma_n$, 系统阐述三者之间的力学关系, 认为库伦-摩尔准则和摩擦滑动定律是先存构造活动性准则的两个端元, 先存薄弱面破裂线分布在摩尔包络线和断裂滑动线之间区域, 岩体破裂的临界剪应力 τ 与先存薄弱面的

内聚力 C_w 、摩擦系数 μ_w 、和空间方位 α 、 θ 有关, α 、 θ 分别代表先存构造面与 σ_3 、 σ_1 的夹角 (见图 1)。因此, 理解先存薄弱带的破裂机制对研究大陆岩石圈变形最有重要意义。此外, 统计发现大多数逃逸构造的共轭走滑断裂带夹角为 $30^\circ \sim 50^\circ$, 明显不符合库伦-摩尔准则和最大有效力矩准则, 在此基础上 Yin 等^[43]提出 PGS 模型, 认为“V”字型走滑断裂带与 σ_1 夹角应为 $65^\circ \sim 75^\circ$ (见图 2)。



a—新生断裂与先存断裂再活动的破裂曲线; b—标准化摩尔破裂包络线与先存断层活动线和先存薄弱带破裂线

图 1 库伦-摩尔准则和摩擦滑动定律与先存构造活动性准则的关系 (据文献 [41] 修改)

Fig. 1 The relationship between the Coulomb-Mohr fracture criterion, the Byerlee law and the Pre-Structure activity criterion (modified after [41])

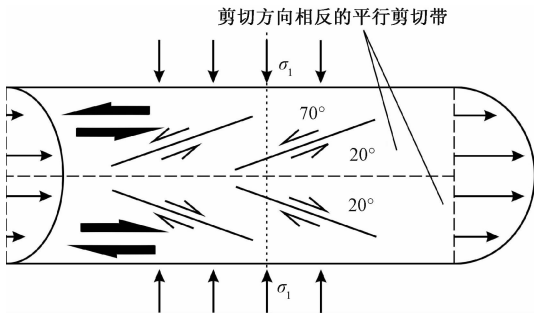


图 2 PGS 模型“V”字型共轭剪切带^[43]

Fig. 2 V-shaped conjugate shear zone in paired general-shear model^[43]

上述力学机制是控制逃逸构造形成过程的重要因素, 基于此建立的逃逸构造模式能够准确反应其变形特征。目前, 大陆构造逃逸模型主要有侧向逃逸和斜向挤出两种说法^[3,16-17,19,22,27,44], 但是, 无论从成因还是变形样式方面, 都揭示的是类似的构造过程。侧向逃逸构造在欧亚陆内变形中广泛发育, 该模型遵循先存构造活动性准则和 PGS 模型, 强调块体的平面运动。斜向挤出模型着重强调逃逸构造的垂向运动, 先存构造活动性准则适用该模型, 地质体温压条件的横向变化与垂向变化相对应是斜向挤出模型的最大特征。

2 研究方法

目前, 大陆逃逸构造主要通过野外构造分析和同构造年代学等方法进行识别^[18]。利用构造模拟手段再现构造变形过程和形成机制, 可定量揭示其构造演化过程。地球物理资料和 GPS 数据能够更加直观验证逃逸构造变形过程。

2.1 构造解析

逃逸构造通常指块体沿着两条滑向相反的走滑断裂带运动或旋转, 因此这两条断裂带的活动时间应该是同时或准同时, 并且是同一断裂带的不同部分, 或是二者相互连接^[16,36]。大陆逃逸构造通常受一条或两条大型韧性剪切带控制, 通过 S-C 组构指示标志识别韧性剪切带的剪切方向是确定韧性剪切带运动性质的重要方法, 针对韧性剪切带内新生矿物年代学研究是确定韧性剪切带活动时间的常用方法, 也是确定逃逸构造活动时的重要依据。所以, 构造几何学、运动学分析和年代学研究是识别大陆逃逸构造的最基本手段, 是厘定大陆逃逸构造的基础工作。相关学者^[16,17,18,27,45]利用构造解析方法成功识别出南秦岭造山带、桐柏—大别造山带和青藏高原周缘的逃

逸构造。构造解析也可为后期实验模拟提供最可靠、最准确、最丰富的一手资料。此外,结合地震层析成像技术可进一步加强逃逸构造的动力学研究,佐证大陆构造逃逸的可能性^[24]。中-下地壳构造热运动促进了逃逸构造的启动和发展,利用地震层析成像技术分别呈现地壳中不同深度平面热分布图,从而建立地壳三维热分布,为探讨大陆逃逸构造启动过程提供可靠依据。

2.2 构造模拟

构造模拟是分析构造变形过程和形成机制的重要方法。物理模拟具有可视化程度高、操作简单、结果直观等优势,不仅可直观地观察构造变形过程,分析构造变形机制,还可以研究各构造要素之间的内在联系,有助于建立合理的构造解释模型^[46-51]。施炜等^[52]利用松散石英砂为相似材料模拟罗布泊地壳浅层次构造变形,成功揭示塔里木地块逃逸变形过程。数值模拟综合利用地质、地球物理、地球化学等方法的研究成果,建立可视化、数值化、立体化的地质演化模型^[53-54]。曾佐勋等^[55]利用有限元数值模拟提出高喜马拉雅结晶地体的垂向挤出模式。基于 FLAC^{2D} 技术王洪才等^[56]认为胶辽地块和渤鲁地块的侧向逃逸导致渤海湾盆地中生代构造格局的形成。事实证明,构造模拟已成为研究逃逸构造的有效手段。

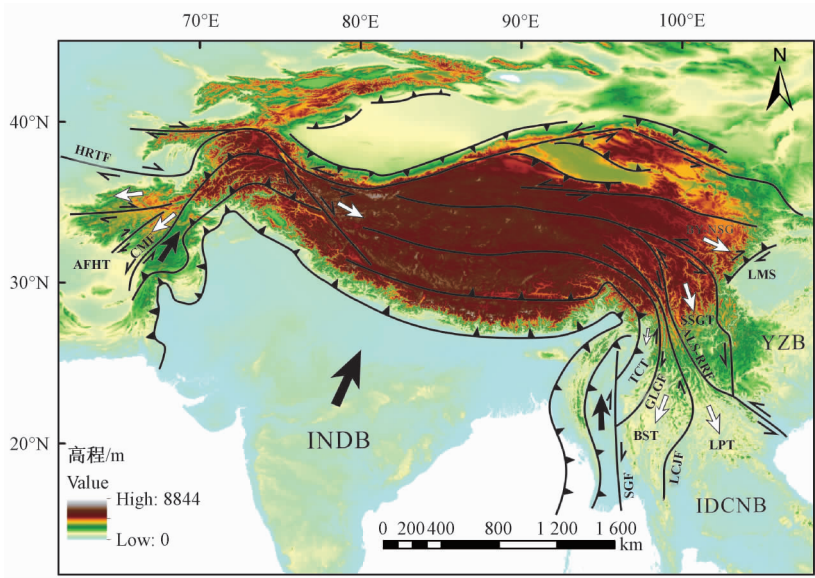
3 典型实例

3.1 青藏高原周缘逃逸构造

印度—欧亚板块碰撞是新生代最重要的构造事件,碰撞造成青藏高原地壳增厚两倍。由于板块碰撞的远程效应,印度板块与西伯利亚板块之间形成南北宽 2000 km,东西长 3000 km 的新生代陆内变形带^[3,36],带内广泛发育逃逸构造(见图 3)。关于青藏高原的变形方式存在巨大争议,“连续变形”模型和“块体运动”模型都能解释一部分现象。“连续变形”模型认为青藏高原的地壳变形不仅仅局限在深大断裂带附近,高原内部存在广泛的变形,一系列大型走滑断裂带是青藏高原变形后期次生现象,GPS 位移场表明青藏高原变形从内部向周缘逐渐削减^[57-60]。“块体运动”模型认为青藏高原地壳以刚性块体的形式沿着大型走滑断裂带逃逸^[3,44]。基于滑线场理论,模拟实验进一步提出东亚大陆的构造挤出模式。实验的三个

连续阶段如图 4 所示,随着刚性块体的挤入,开始发育共轭走滑断裂,印支块体(I)和华南块体(II)沿着哀牢山—红河左行走滑断裂带(F_1)和秦岭北缘左行走滑断裂带(F_2)先后向东南和向东挤出,随后,印支块体存在顺时针旋转(约 40°),模型块体之间存在开裂空隙。Tapponnier^[44]发现模拟实验结果与实际地质现象存在耦合性,刚性块体与块体 I 之间的空隙对应安达曼海、缅甸中央盆地及其北部的滇西裂谷带;块体 I、II 之间空隙对应中国南海,扩张初期红河裂谷与南海盆地整体呈向东张开的楔形断裂带,后期华南块体挤出,印支块体顺时针旋转,南海盆地才与红河裂谷错开并继续扩张。由于东亚大陆东部西太平洋俯冲带的存在,向东(东南)散开的走滑断层系更为发育,且断距更大,造成了东亚大陆块体向东和东南的大规模挤出,海原断裂带错距 30~90 m,平均滑动速率为 5~7 mm/yr^[61],阿尔金断裂的滑移速率为 20~30 mm/yr^[62];受欧亚板块主体的阻挡,东亚大陆西侧发育的走滑断裂系活动性较弱,喀喇昆仑断裂最大右旋错距为 11 ± 1 km,最大走滑速率 4.0 ± 0.3 mm/yr^[63],西侧块体内部有较大应力集中,形成次级挤压构造。模拟实验将东亚陆内变形与印度—欧亚板块的碰撞联系起来,把东亚大陆构造南北差异解释为同一构造事件的不同发展阶段,东西侧构造差异用块体逃逸的自由边界加以解释。

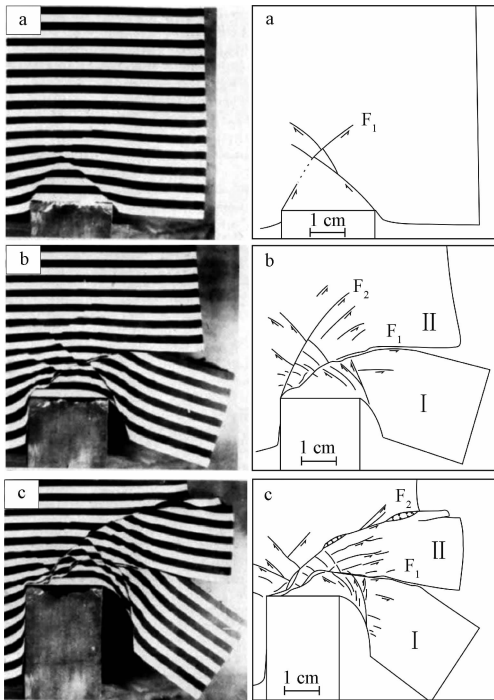
随着研究的深入,不同学者先后提出了多种构造逃逸模式。许志琴等^[17]通过构造分析和年代学研究提出了独特的青藏高原东南缘块体逃逸模式。青藏高原东南缘由思茅—印支地体、保山—掸帮地体、腾冲—Mogok—西缅地体组成,块体间的大型走滑断裂从东向西依次为哀牢山—红河断裂带、澜沧江断裂带、高黎贡断裂带、实皆断裂带。⁴⁰Ar/³⁹Ar 热年代学研究表明哀牢山—红河断裂带的左行走滑活动时间 34~17 Ma^[64-65];近南北向的澜沧江走滑断裂其北段为崇山走滑断裂带,淡色花岗岩测年显示左行走滑活动时间 34~14 Ma^[66];高黎贡右行走滑断裂带至少开始于 32 Ma,并持续到 18~10 Ma^[67];锆石变质边 U-Pb 年龄和角闪石⁴⁰Ar/³⁹Ar 年龄揭示那邦右行韧性走滑的活动时间为 41~19 Ma^[23]。年代学分析表明高黎贡右行走滑断裂带不是青藏高原地体逃逸的西边界;澜沧江走滑断裂带与哀牢山—红河走滑



YZB—扬子陆块；IDCNB—印支陆块；INDB—印度陆块；LMS—龙门山挤压转换带；SSGT—南松甘挤出地体；BST—保山挤出地体；TCT—腾冲挤出地体；AFHT—阿富汗挤出地体；LPT—兰坪挤出地体；BY-NSG—巴颜喀拉-北松甘地体；ALS-RRF—哀牢山—红河断裂；LCJF—澜沧江断裂；GLGF—高丽贡断裂；CMF—恰曼断裂；SGF—沙盖断裂；HRTF—赫拉特断裂

图 3 青藏高原及其周缘构造格架图

Fig. 3 Tectonic framework of Tibetan plateau and surrounding regions



I—印支块体；II—华南块体；F₁—哀牢山—红河左行走滑断裂带；F₂—秦岭北缘左行走滑断裂带
a—刚性块体位移距离 1.2 cm；b—刚性块体位移距离 3.5 cm；c—刚性块体位移距离 6.3 cm

图 4 刚性块体楔入橡皮泥的三个连续阶段 (左边界受限, 右边界为自由边界; 据文献 [44] 修改)

Fig. 4 Three successive stages of indentation experiments on plasticine (confine side on left, free side on right; modified after [44])

断裂带的左行韧性走滑同时开始于 34 Ma, 那邦右行走滑断裂活动开始于 41 Ma, 说明青藏高原东南缘断裂自西向东发展。青藏高原东南缘除了大型走滑断裂带还发现大量近水平的韧性剪切带, 这些韧性剪切带与走滑断裂的产状逐渐过渡, 并未发现相互切割关系。腾冲地体前寒武纪变质基底与古生代沉积盖层之间发育近水平韧性剪切带, 拉伸线理北东—南西向 (近水平), 剪切标志指示上盘向北东的剪切, 拆离层活动年龄大约 35 ~ 15 Ma, 与那邦右行走滑断裂带 (41 ~ 19 Ma) 和高黎贡右行走滑断裂带 (32 ~ 10 Ma) 具有同时性。保山地体和思茅地体中也发现了类似的变质基底与上覆古 (中) 生代地层之间的拆离断层。此外, 腾冲地体中新发现三条北东走向的苏典、盈江、梁河走滑断裂带与那邦和高黎贡右行走滑断裂带具有相近的产状和剪切指向, 可能都在 41 Ma 开始活动。基于以上地质事实推测, 腾冲地体可能在 41 Ma 围绕东喜马拉雅古构造结以岩石圈横弯褶皱的模式向西南挤出, 地体中发育的拆离断层是地壳层间滑动调整地层弯曲的结果 (见图 5)。35 Ma 之后, 变形集中在那邦和高黎贡右行走滑断裂带。晚始新世以来, 羌塘地块和拉萨地块围绕东构造结顺时针向青藏高原东南逃逸。中、上地壳块体不仅仅沿着切穿岩石圈大型走滑断裂

作水平方向的平动，还存在块体的掀斜、扭转、壳内拆离等多种形式相互叠加的复杂运动。许志琴等^[17]把大型韧性拆离带和走滑断裂带视为块体运动的导滑断层，岩石圈横弯褶皱和壳内解耦是块体逃逸的重要机制，板块汇聚的持续作用和大陆岩石圈流变学结构不均一性是导致该机制的重要原因，但是仍然缺乏深部动力影响的直接证据。

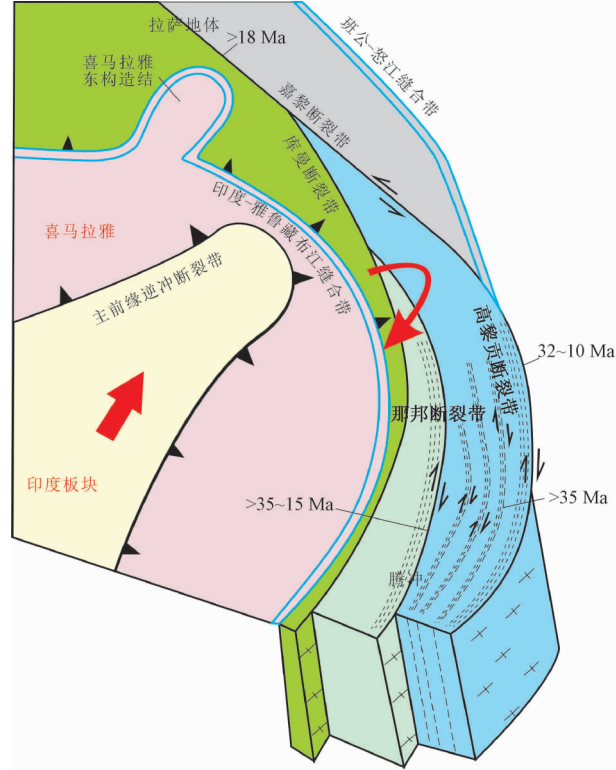


图5 腾冲地体的岩石圈横弯褶皱模式^[17]
 Fig. 5 Lithospheric bending model of the Tengchong terrane in SE Tibet^[17]

地震层析成像可以有效反演研究区三维结构，Liu等^[24]利用该手段获取青藏高原东部地壳和上地幔三维结构图，认为中、上地壳块体运动与下地壳流相关。青藏高原下地壳高导低速层解释为由于巨厚地壳和应变热共同作用而形成的低粘度“下地壳流”。四川盆地和青藏高原地壳厚度的差异，造成青藏高原下地壳高导低速层与四川盆地上地幔高速层处于同一深度，因此四川盆地高密度的上地幔势必阻挡青藏高原下地壳流的向东运移，下地壳流可能转而向南运动^[68]。由于陆内强震的余震周期与断层加载速率成反比关系^[69]，龙门山断裂带GPS位移矢量较小正是陆内强震之后断层长周期、低速加载阶段，虽然汶川地震发生前的GPS测量结果显示龙门山断裂带附近地壳运

动矢量极小，但是青藏高原东部中上地壳依然持续向扬子克拉通推挤，汶川地震的发生是最好的证明。所以，受印度板块持续推挤和四川盆地阻挡，青藏高原东部中、上地壳向东发育一系列逆冲—走滑断裂，中、上地壳以块体的形式围绕东构造结作顺时针运动，数值模拟证实边界断裂带吸收了大部分水平应变^[70-71]。青藏高原向东的横向扩展变形是中、上地壳逃逸挤出和下地壳通道流共同作用的结果，二者在运动学上协调一致。

西构造结作为青藏高原西部强烈的构造响应区，也是研究大陆碰撞和地壳变形的重要区域。西构造结南北向的宽度明显比东构造结窄，说明青藏高原西部的地壳缩短量比东部大，GPS观测数据也证实西构造结东侧的地壳物质向东逃逸^[72-73]。喀喇昆仑右行走滑断裂和阿尔金左行走滑断裂共同作用导致两条断裂夹持的甜水海地体向东南方向挤出。西构造结西侧同样发生块体的横向逃逸，阿富汗地体在恰曼左行走滑断裂和赫拉特右行走滑断裂的共同作用下向西逃逸。这些广泛发育的大尺度走滑断裂为印度—欧亚大陆碰撞诱发青藏高原内部块体逃逸的直接证据。

3.2 秦岭—大别造山带

秦岭—大别造山带是调节中朝板块、华南板块之间陆内构造变形的重要地带。桐柏山造山带位于秦岭—大别造山带中段，是秦岭—大别造山带中各地质体之间构造关系及地质演化差异的关键地区^[16,18,27,74]。桐柏山造山带主体由桐柏杂岩及其南北两侧的高压变质岩群组成，桐柏杂岩体南北两侧高压变质岩群分别向南南西和北北东倾斜，各岩石构造单元大都呈北西西—南东东走向，其间被两条大型韧性剪切带分隔。传统观点认为以桐柏杂岩为核心的穹隆状构造格局是印支期伸展作用形成^[75]。

桐柏杂岩体主体为花岗质片麻岩，内含变质岩包裹体，包括英云闪长质片麻岩、副片麻岩、麻粒岩、斜长角闪岩、大理岩和钙硅酸岩盐等。桐柏杂岩体向北依次为北部含榴辉岩高压变质带、构造混杂岩、南湾复理石以及古生代的秦岭群、二郎坪群和宽坪群，其间为鸿仪河—桐柏大型韧性剪切带；向南则为南部含榴辉岩高压变质带、蓝片岩带、绿片岩带，其间为新城—广水大型韧性剪切带。两条高压变质岩带直接覆盖在桐柏杂岩之上，二者岩石组合非常相似且与桐柏杂岩存

在明显差异。北带榴辉岩 P-T 条件比南带榴辉岩 P-T 条件高, 推测它们可能是同一构造岩片的不同部位^[75-76]。南界韧性剪切带中最常见的是花岗质糜棱岩, 通过对不同构造部位野外统计测量, 糜棱面理总体倾向南南西, 拉伸线理总体倾伏向为 103°~142°, 倾伏角多数为 2°~8°, 运动学标志指示该韧性剪切带为右行剪切。北界韧性剪切带中糜棱岩面理倾向以北北东为主, 倾角主要在 10°~43°之间; 矿物拉伸线理倾伏向多数为 105°~135°, 倾伏角多数为 1°~8°; 运动学标志分析表明北界剪切带为左行剪切。桐柏杂岩体周缘韧性剪切带有白垩纪未变形花岗岩侵入, 发育在高压变质岩带之下, 将韧性剪切带的活动时间限定在高压变质作用之后到白垩纪花岗岩侵位之前。基于 U-Pb 和 ⁴⁰Ar/³⁹Ar 实验结果和野外构造数据, 重建白垩纪桐柏山构造-热事件。早白垩世 (140 Ma) 桐柏地区开始区域伸展, 135~130 Ma 强烈的伸展导致桐柏杂岩形成岩北西西—南东东方向的线理和南北两侧的韧性剪切带, 伸展作用持续到 128 Ma^[27]。

桐柏杂岩与北大别杂岩在岩石组合、地壳结构和变质变形序列上的相似性证明北大别杂岩与桐柏杂岩经历了相同的构造-热事件。岩石学特征和温压计算表明, 秦岭—大别造山带中由东向西

出露的变质岩 P-T 条件逐渐降低。东部大别山造山带出露超高压变质岩, 向西桐柏杂岩周围露高压变质岩, 再向西南阳盆地 (秦岭) 出现低温高压的蓝片岩。北大别杂岩包裹体中榴辉岩变质幕 P-T 条件也高于桐柏杂岩^[77], 这种变化规律可能是中央造山带东部发生深俯冲作用, 俯冲深度向西变浅。构造解析和年代学研究表明桐柏—大别造山带框架定格在早白垩世的构造伸展事件, 同构造年代学和运动学标志确定这一事件导致了桐柏—大别高压/超高压地体向东的侧向挤出, 岩石抬升约 10~15 km。桐柏杂岩体和北大别杂岩体出露面积不同说明中央造山带几个次级造山带存在差异隆升, 合肥盆地上侏罗统发现包含超高压榴辉岩的砾石也说明大别地体先于桐柏山地体隆升到地表^[78-79]。

综上所述, 桐柏—大别造山带经历了早白垩世北西—南东方向的伸展, 伸展作用引起桐柏—大别造山带上部向北西的剪切作用, 同时桐柏—大别造山带地壳向南东斜向上被动挤出。桐柏山与西大别之间的大悟断裂和西大别与东大别之间的商麻断裂是分隔各次级造山带的滑脱带, 在统一的伸展剪切过程中各造山带分别斜向挤出 (见图 6)。平面测量发现南北韧性剪切带夹角大约 30°, 力学机制符合 PGS 模型。

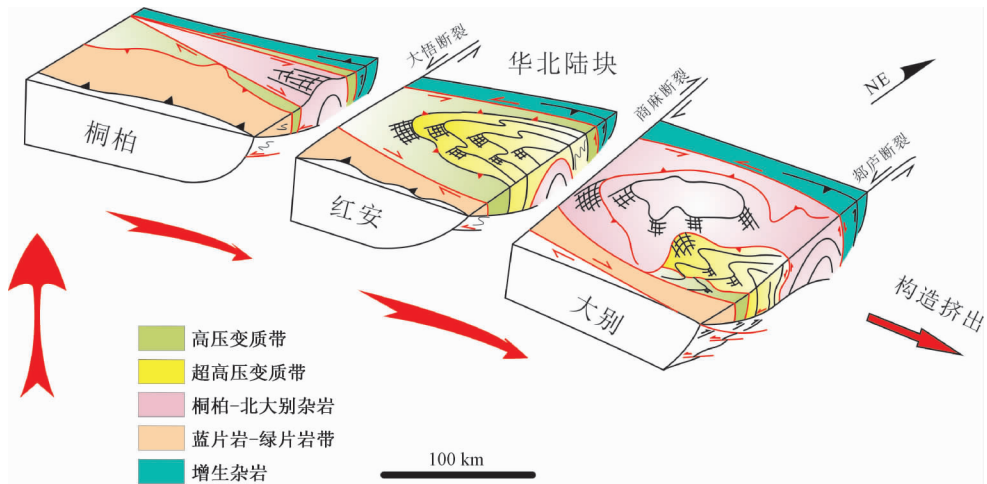


图 6 桐柏、红安和大别高压/超高压变质地体的地壳结构模型 (据文献 [16] 修改)

Fig. 6 Interpretative model for the crustal structure of the Tongbai, Hong'an and Dabie HP/UHP metamorphic terraces (modified after [16])

晚中生代太平洋板块的俯冲作用和蒙古—鄂霍次海的闭合导致中国东部大陆动力学体制发生重大转折, 由早中生代的南北向缩短或挤压转变为与古太平洋俯冲有关的北西西—南东东向的板内变形和伸展^[80-81]。在此构造背景下, 早中侏罗

世桐柏—大别造山带经历北东—南西向挤压, 导致岩石圈垂向加厚, 造山带南北两侧广泛发育逆冲推覆构造。早白垩世, 桐柏—大别造山带发生北西—南东的伸展, 主要成因可能是西太平洋板块陡俯冲引发的局部地幔不均一流动, 地幔水平

流动引起水平方向的剪切作用,上部地壳岩石圈形成反方向的拆离构造。非稳态地幔流动同时导致上覆岩石圈弱化,并进一步促进岩石圈构造薄弱带的构造活化,有利于拆离构造形成。早中生代的缩短和挤压造成桐柏—大别造山带山根加厚,非稳态地幔流动加速了桐柏—大别造山带去山根化。许长海^[82]通过岩石地球化学分析发现桐柏—大别造山带山根大约在 156 Ma 发生大规模的拆沉作用。拆沉作用之后持续的地幔流动引起桐柏—大别造山带北西—南东向的剪切作用,拆沉作用引起的岩浆热作用促进了岩石圈的软化和后期北西—南东向伸展剪切变形的发生。因此,桐柏—大别造山带的斜向挤出是岩石圈拆沉和热-化学/机械侵蚀共同作用的结果。此外,杨志华等^[21,25,26,83]曾提出秦岭—大别造山带抽拉构造模式,并用涡旋—热核反应—甩出机制加以解释。

3.3 东阿尔卑斯

大陆逃逸构造国外很早就开展了研究,东阿尔卑斯楔状挤出块体的研究是第一次将大陆楔状挤出构造模式引入造山带,Ratschbacher 等^[30,84]将伸展垮塌和构造逃逸归纳为侧向挤出的两种情形,分析认为伸展垮塌的应力来源于板块碰撞后增加的重力势能,而构造逃逸发展往往取决于持续的构造应力。东阿尔卑斯楔状块体北边界受控于一系列左行走滑断裂带,南边受控于 Periadriatic 右行走滑断层和 Molital 右行走滑断层,在走滑方向相反的共轭走滑断裂带共同作用下,楔状块体向东逃逸挤出(见图 7)。由于块体逃逸的地壳减薄效应,断裂带收敛的西侧形成板片窗构造^[30]。引发东阿尔卑斯侧向逃逸的主要因素有:坚硬的前陆(Foreland)、广阔的楔入体前锋(Indenter)、地壳热软化、自由边界和垂向增厚的地壳及其梯度厚度。其中,地壳热软化对东阿尔卑斯侧向挤出提供了力学依据,通常岩石圈上部脆性变形遵循滑动律^[40],下部符合幂律流动^[85],温度变化影响岩石圈流变性强弱,岩石圈连续性变形则取决于下部岩石圈流强流变性,因此温度是岩石圈强度变化的控制因素^[86]。在地壳热软化的影响下,早期地壳加厚造成一系列逆冲断裂,后期热松弛引发构造反转,块体受重力作用持续向自由边界移动,东阿尔卑斯整体向东挤出。此外,土耳其地块也是造山带侧向逃逸的典型实例,在阿拉伯半岛和欧亚板块南北向挤压作用下,土耳其块体沿着东安

纳托里亚左行走滑断裂和北安纳托里亚右行走滑断裂向西南侧逃逸^[28-29]。

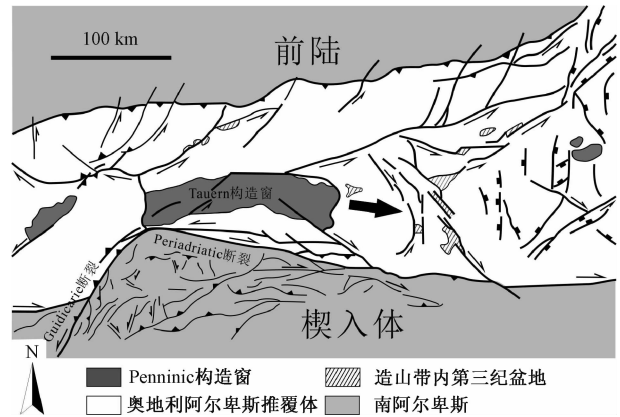


图 7 东阿尔卑斯挤出构造断裂型式及南阿尔卑斯楔入体内的中新世走滑和逆冲断裂型式^[30]

Fig. 7 Fault pattern of extrusion tectonics in Eastern Alps and Miocene fault (strike and thrust) pattern within the indenter (South Alps)^[30]

4 结论

综合目前大陆逃逸构造研究成果,论述了大陆逃逸构造的力学机制和构造模型:(1)逃逸构造走滑断裂带的破裂过程符合多种力学机制,控制逃逸构造平面挤出的力学机制是 PGS 模型和先存构造活动性准则;(2)构造解析、物理模拟和数值模拟方法相结合是研究逃逸构造或挤出构造的有效手段,构造解析能够准确识别逃逸构造,构造模拟是再现变形过程和分析变形机制的有效手段,地球物理资料有助于探讨逃逸构造的深部过程;(3)侧向逃逸和斜向挤出是大陆逃逸构造的主要模式,从岩石圈流变学、地幔动力学、壳幔/壳内解耦等角度探讨逃逸构造形成模式,能更加准确揭示其演化历史。

致谢 在成文过程中,中国科学院张开均研究员、丁林院士给予了很多启示与意见,在此表示诚挚的感谢。

参考文献/References

- [1] Laurent O, Martin H, Moyen J F, et al. The diversity and evolution of late-Archean granitoids: evidence for the onset of "modern-style" plate tectonics between 3.0 and 2.5 Ga [J]. *Lithos*, 2014, 205: 208 ~ 235.

- [2] 李三忠,郭玲莉,戴黎明,等. 前寒武纪地球动力学(V): 板块构造起源[J]. 地学前缘, 2015, 22(6): 65~76.
LI Sanzhong, GUO Lingli, DAI Liming, et al. Precambrian geodynamics(V): origin of plate tectonics[J]. Earth Science Frontiers, 2015, 22(6): 65~76. (in Chinese with English abstract)
- [3] Molnar P, Tapponnier P. Cenozoic tectonics of Asia: effects of a continental collision[J]. Science, 1975, 189(4201): 419~426.
- [4] 董树文,吴锡浩,吴珍汉,等. 论东亚大陆的构造翘变—燕山运动的全球意义[J]. 地质论评, 2000, 46(1): 8~13.
DONG Shuwen, WU Xihao, WU Zhenhan, et al. On tectonic seesawing of the East Asia continent—global implication of the Yanshanian Movement[J]. Geological Review, 2000, 46(1): 8~13. (in Chinese with English abstract)
- [5] 万天丰,赵维明. 论中国大陆的板内变形机制[J]. 地学前缘, 2002, 9(2): 451~463.
WAN Tianfeng, ZHAO Weiming. On the mechanism of intraplate deformation in Chinese continent[J]. Earth Science Frontiers, 2002, 9(2): 451~463. (in Chinese with English abstract)
- [6] Shi W, Zhang Y Q, Dong S W, et al. Intra-continental Dabashan orocline, southwestern Qinling, Central China[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2012, 46: 20~38.
- [7] Shi W, Dong S W, Liu Y, et al. Cenozoic tectonic evolution of the South Ningxia region, northeastern Tibetan Plateau inferred from new structural investigations and fault kinematic analyses[J]. Tectonophysics, 2015, 649: 139~164.
- [8] 李建华,张岳桥,施炜,等. 大巴山前陆带东段神农架地区构造变形研究[J]. 地质力学学报, 2009, 15(2): 162~177.
LI Jianhua, ZHANG Yueqiao, SHI Wei, et al. Tectonic deformation features of Shennongjia region in eastern Dabashan foreland structural belt[J]. Journal of Geomechanics, 2009, 15(2): 162~177. (in Chinese with English abstract)
- [9] Wang E, Meng Q R, Burchfiel B C, et al. Mesozoic large-scale lateral extrusion, rotation, and uplift of the Tongbai-Dabie Shan belt in east China[J]. Geology, 2003, 31(4): 307~310.
- [10] Meng Q R, Wang E, Hu J M. Mesozoic sedimentary evolution of the northwest Sichuan basin: implication for continued clockwise rotation of the South China block[J]. Geological Society of America Bulletin, 2005, 117(3/4): 396~410.
- [11] 张岳桥,廖昌珍. 晚中生代—新生代构造体制转换与鄂尔多斯盆地改造[J]. 中国地质, 2006, 33(1): 28~40.
ZHANG Yueqiao, LIAO Changzhen. Transition of the Late Mesozoic-Cenozoic tectonic regimes and modification of the Ordos basin[J]. Geology in China, 2006, 33(1): 28~40. (in Chinese with English abstract)
- [12] 张岳桥,廖昌珍,施炜,等. 论鄂尔多斯盆地及其周缘侏罗纪变形[J]. 地学前缘, 2007, 14(2): 182~196.
ZHANG Yueqiao, LIAO Changzhen, SHI Wei, et al. On the Jurassic deformation in and around the Ordos Basin, North China[J]. Earth Science Frontiers, 2007, 14(2): 182~196. (in Chinese with English abstract)
- [13] Dong S W, Zhang Y Q, Zhang F Q, et al. Late Jurassic-early cretaceous continental convergence and intracontinental orogenesis in East Asia: a synthesis of the Yanshan Revolution[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2015, 114: 750~770.
- [14] Li J H, Zhang Y Q, Dong S W, et al. Structural and geochronological constraints on the Mesozoic tectonic evolution of the North Dabashan zone, South Qinling, central China[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2013, 64: 99~114.
- [15] Li J H, Dong S W, Yin A, et al. Mesozoic tectonic evolution of the Daba Shan Thrust Belt in the southern Qinling orogen, central China: constraints from surface geology and reflection seismology[J]. Tectonic, 2015, 34(8): 1545~1575.
- [16] Liu X C, Jahn B M, Cui J J, et al. Triassic retrograded eclogites and Cretaceous gneissic granites in the Tongbai Complex, central China: implications for the architecture of the HP/UHP Tongbai-Dabie-Sulu collision zone[J]. Lithos, 2010, 119(3/4): 211~237.
- [17] 许志琴,王勤,李忠海,等. 印度-亚洲碰撞: 从挤压到走滑的构造转换[J]. 地质学报, 2016, 90(1): 1~23.
XU Zhiqin, WANG Qin, LI Zhonghai, et al. Indo-Asian collision: tectonic transition from compression to strike slip[J]. Acta Geologica Sinica, 2016, 90(1): 1~23. (in Chinese with English abstract)
- [18] 王二七,苏哲,许光. 我国的一些造山带的侧向挤出构造[J]. 地质科学, 2009, 44(4): 1266~1288.
WANG Erchie, SU Zhe, XU Guang. A case study on lateral extrusion occurred along some orogenic belts in China[J]. Chinese Journal of Geology, 2009, 44(4): 1266~1288. (in Chinese with English abstract)
- [19] Sengör A M C, Görür N, Saroglu F. Strike-slip faulting and related basin formation in zones of tectonic escape: turkey as a case study[A]. Biddle K T, Christie B N. Strike-Slip Deformation, Basin Formation, and Sedimentation[M]. Tulsa: SEPM, 1985, 227~264.
- [20] Burke K, Sengör C. Tectonic escape in the evolution of the continental crust[A]. Barazangi M, Brown L. Reflection Seismology: the Continental Crust[M]. Washington: America Geophysics Union, 1986, 41~53.
- [21] 杨志华,王北颖. 抽拉-逆冲岩片构造——秦岭造山带的新模式[J]. 地球科学—中国地质大学学报, 1993, 18(5): 565~575.
YANG Zhihua, WANG Beiyang. Drawng-thrusting sheet tectonics—a new model for Qinling orogenic belt[J]. Earth Science—Journal of China University of Geosciences, 1993, 18(5): 565~575. (in Chinese with English abstract)
- [22] Tapponnier P, Molnar P. Slip-line field theory and large-scale continental tectonics[J]. Nature, 1976, 264(5584): 319~324.
- [23] Xu Z Q, Wang Q, Cai Z H, et al. Kinematics of the Tengchong Terrane in SE Tibet from the late Eocene to early Miocene: insights from coeval mid-crustal detachments and strike-slip shear zones[J]. Tectonophysics, 2015, 665: 127~148.

- [24] Liu Q Y, Van Der Hilst R D, Li Y, et al. Eastward expansion of the Tibetan Plateau by crustal flow and strain partitioning across faults [J]. *Nature Geoscience*, 2014, 7 (5): 361 ~ 365.
- [25] 杨志华, 周义, 苏生瑞, 等. 抽拉构造——岩石圈板块重要的运动方式 [J]. *矿物岩石*, 2001, 21 (3): 165 ~ 168.
YANG Zhihua, ZHOU Yi, SU Ruisheng, et al. The drawing-out tectonics: an important movement way of lithosphere plate [J]. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 2001, 21 (3): 165 ~ 168. (in Chinese with English abstract)
- [26] 杨志华, 晁会霞, 吴旭, 等. 秦岭—大别陆内造山带构造特征及抽拉构造造山模式 [J]. *地学前缘*, 2016, 23 (4): 63 ~ 71.
YANG Zhihua, CHAO Huixia, WU Xu, et al. The structural characteristics of Qinling intra-continental orogenic belt and its Choula (drawing-out) tectonic orogenic model [J]. *Earth Science Frontiers*, 2016, 23 (4): 63 ~ 71. (in Chinese with English abstract)
- [27] Cui J J, Liu X C, Dong S W, et al. U-Pb and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ Ar geochronology of the Tongbai complex, central China: implications for Cretaceous exhumation and lateral extrusion of the Tongbai-Dabie HP/UHP terrane [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2012, 47: 155 ~ 170.
- [28] Dewey J F, Şengör A M C. Aegean and surrounding regions: complex multiplate and continuum tectonics in a convergent zone [J]. *Geological Society of America Bulletin*, 1979, 90 (1): 84 ~ 92.
- [29] Jackson J, McKenzie D. The relationship between plate motions and seismic moment tensors, and the rates of active deformation in the Mediterranean and Middle East [J]. *Geophysical Journal International*, 1988, 93 (1): 45 ~ 73.
- [30] Ratschbacher L, Merle O, Davy P, et al. Lateral extrusion in the Eastern Alps, Part I: boundary conditions and experiments scaled for gravity [J]. *Tectonics*, 1991, 10 (2): 245 ~ 256.
- [31] Huang T K. On major tectonic forms of China [J]. *The Journal of Geology*, 1947, 55 (1): 59 ~ 60.
- [32] 任纪舜, 姜春发, 张正坤, 等. 中国大地构造及其演化: 1: 400 万中国大地构造图简要说明 [M]. 北京: 科学出版社, 1980.
REN Jishun, JIANG Chunfa, ZHANG Zhengkun, et al. Geotectonic evolution of China [M]. Beijing: Science Press, 1980. (in Chinese)
- [33] 任纪舜, 陈廷愚, 牛宝贵, 等. 中国东部及邻区大陆岩石圈的构造演化与成矿 [M]. 北京: 科学出版社, 1990.
REN Jishun, CHEN Tingyu, NIU Baogui, et al. Tectonic evolution and mineralization of lithosphere in eastern China [M]. Beijing: Science Press, 1990. (in Chinese)
- [34] Wang H Z, Mo X X. An outline of the tectonic evolution of China [J]. *Episodes*, 1995, 18 (1/2): 6 ~ 16.
- [35] 稽少丞, 王茜, 孙圣思, 等. 亚洲大陆逃逸构造与现今中国地震活动 [J]. *地质学报*, 2008, 82 (12): 1644 ~ 1667.
JI Shaocheng, WANG Qian, SUN Shengsi, et al. Continental extrusion and seismicity in China [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2008, 82 (12): 1644 ~ 1667. (in Chinese with English abstract)
- [36] Yin A. Cenozoic tectonic evolution of Asia: a preliminary synthesis [J]. *Tectonophysics*, 2010, 488 (1/4): 293 ~ 325.
- [37] 郑颖人, 高红. 材料强度理论的讨论 [J]. *广西大学学报 (自然科学版)*, 2008, 33 (4): 337 ~ 345.
ZHENG Yingren, GAO Hong. Discussion of strength theory for materials [J]. *Journal of Guangxi University (Natural Science Edition)*, 2008, 33 (4): 337 ~ 345. (in Chinese with English abstract)
- [38] Morley C K. How successful are analogue models in addressing the influence of pre-existing fabrics on rift structure? [J]. *Journal of Structural Geology*, 1999, 21 (8/9): 1267 ~ 1274.
- [39] Morley C K, Haranya C, Phoosongsee W, et al. Activation of rift oblique and rift parallel pre-existing fabrics during extension and their effect on deformation style: examples from the rifts of Thailand [J]. *Journal of Structural Geology*, 2004, 26 (10): 1803 ~ 1829.
- [40] Byerlee J. A review of rock mechanics studies in the United States pertinent to earthquake prediction [J]. *Pure and Applied Geophysics*, 1978, 116 (4/5): 586 ~ 602.
- [41] Tong H M, Yin A. Reactivation tendency analysis: a theory for predicting the temporal evolution of preexisting weakness under uniform stress state [J]. *Tectonophysics*, 2011, 503 (3/4): 195 ~ 200.
- [42] Tong H M, Koyi H, Huang S, et al. The effect of multiple pre-existing weaknesses on formation and evolution of faults in extended sandbox models [J]. *Tectonophysics*, 2014, 626: 197 ~ 212.
- [43] Yin A, Taylor M H. Mechanics of V-shaped conjugate strike-slip faults and the corresponding continuum mode of continental deformation [J]. *Geological Society of America Bulletin*, 2011, 123 (9/10): 1798 ~ 1821.
- [44] Tapponnier P, Peltzer G, Le Dain A Y, et al. Propagating extrusion tectonics in Asia: new insights from simple experiments with plasticine [J]. *Geology*, 1982, 10 (12): 611 ~ 616.
- [45] 陈鹏, 施炜. 南秦岭造山带韧性剪切系中一晚侏罗世运动学分析与力学机制探讨 [J]. *地球科学进展*, 2015, 30 (1): 69 ~ 77.
CHEN Peng, SHI Wei. The Mid-Late Jurassic kinematic model and mechanical mechanism of the ductile shear zones in the south Qinling structural belt [J]. *Advances in Earth Science*, 2015, 30 (1): 69 ~ 77. (in Chinese with English abstract)
- [46] McClay K R, White M J. Analogue modelling of orthogonal and oblique rifting [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 1995, 12 (2): 137 ~ 151.
- [47] Gutscher M A, Kukowski N, Malavieille J, et al. Material transfer in accretionary wedges from analysis of a systematic series of analog experiments [J]. *Journal of Structural Geology*, 1998, 20 (4): 407 ~ 416.
- [48] 周建勋, 陆克政. 构造形成序列的砂箱实验研究——以黄

- 骅盆地中区新生代构造为例 [J]. 大地构造与成矿学, 1999, 23 (1): 65~71.
- ZHOU Jianxun, LU Kezheng. Sandbox experiments on formation sequence of structures: a case study of Cenozoic structures in the central part of the Huanghua basin, north China [J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 1999, 23 (1): 65~71. (in Chinese with English abstract)
- [49] 周建勋. 伸展方式对伸展构造形成特征影响的相似模拟 [J]. 大地构造与成矿学, 2000, 24 (1): 70~74.
- ZHOU Jianxun. Analogue modeling of influence of stretch manner on geometries of extensional structures [J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 2000, 24 (1): 70~74. (in Chinese with English abstract)
- [50] Chemenda A, Déverchère J, Calais E. Three-dimensional laboratory modelling of rifting: application to the Baikal Rift, Russia [J]. *Tectonophysics*, 2002, 356 (4): 253~273.
- [51] 单家增. 对称褶皱形成的三维构造物理模拟实验 [J]. 石油勘探与开发, 2004, 31 (5): 8~10.
- SHAN Jiazeng. Three-dimensional physical experiments of symmetrical fold [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2004, 31 (5): 8~10. (in Chinese with English abstract)
- [52] 施炜, 刘成林, 杨海军, 等. 基于砂箱模拟实验的罗布泊盆地新构造变形特征分析 [J]. 大地构造与成矿学, 2009, 33 (4): 529~534.
- SHI Wei, LIU Chenglin, YANG Haijun, et al. Research on neotectonic of the Lop Nur basin based on sandbox experiments [J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 2009, 33 (4): 529~534. (in Chinese with English abstract)
- [53] 施炜, 田蜜, 马寅生, 等. 罗布泊盆地新构造变形数值模拟分析 [J]. 地质力学学报, 2011, 17 (3): 223~231.
- SHI Wei, TIAN Mi, MA Yinsheng, et al. A numerical simulating research on neotectonics in the Lop Nur basin [J]. *Journal of Geomechanics*, 2011, 17 (3): 223~231. (in Chinese with English abstract)
- [54] 胡杨, 李亚东, 许帅玲. 浅析数值模拟软件在地质学中的应用 [J]. 科技创新与应用, 2016, (20): 38.
- HU Yang, LI Yadong, XU Shuailing. The application of numerical simulation software in geology [J]. *Technology Innovation and Application*, 2016, (20): 38. (in Chinese with English abstract)
- [55] 曾佐勋, 杨巍然, NEUBAUER F, 等. 造山带挤出构造 [J]. 地质科技情报, 2001, 20 (1): 1~7.
- ZENG Zuoxun, YANG Weiran, NEUBAUER F, et al. Extrusion tectonics in orogenic belt [J]. *Geological Science and Technology Information*, 2001, 20 (1): 1~7. (in Chinese with English abstract)
- [56] 王洪才, 李三忠, 索艳慧, 等. 燕山期挤出构造在渤海湾盆地形成中的作用: 基于 FLAC^{2D} 的数值模拟 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 2013, 33 (5): 81~88.
- WANG Hongcai, LI Sanzhong, SUO Yanhui, et al. Relation of Yanshanian extrusion tectonics to the formation of the Bohai bay basin: numerical simulation based on FLAC^{2D} [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2013, 33 (5): 81~88. (in Chinese with English abstract)
- [57] England P, McKenzie D. A thin viscous sheet model for continental deformation [J]. *Geophysical Journal International*, 1982, 70 (2): 295~321.
- [58] Houseman G, England P. Finite strain calculations of continental deformation: 1. Method and general results for convergent zones [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1986, 91 (B3): 3651~3663.
- [59] Houseman G, England P. Crustal thickening versus lateral expulsion in the Indian-Asian continental collision [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1993, 98 (B7): 12233~12249.
- [60] England P, Molnar P. The field of crustal velocity in Asia calculated from Quaternary rates of slip on faults [J]. *Geophysical Journal International*, 1997, 130 (3): 551~582.
- [61] 张培震, 郑德文, 尹功明, 等. 有关青藏高原东北缘晚新生代扩展与隆升的讨论 [J]. 第四纪研究, 2006, 26 (1): 5~13.
- ZHANG Peizhen, ZHENG Dewen, YIN Gongming, et al. Discussion on late Cenozoic growth and rise of northeastern margin of the Tibetan plateau [J]. *Quaternary Sciences*, 2006, 26 (1): 5~13. (in Chinese with English abstract)
- [62] 熊熊, 王继业, 滕吉文. 阿尔金断裂不同时间尺度下的滑移速率及构造意义 [J]. 地质科技情报, 2006, 25 (3): 21~28.
- XIONG Xiong, WANG Jiye, TENG Jiwen. Slip-rate of the Altyn Tagh fault under various time-scales and its tectonic implications [J]. *Geological Science and Technology Information*, 2006, 25 (3): 21~28. (in Chinese with English abstract)
- [63] 王世锋, 江万, 王超. 喀喇昆仑断裂沿雅鲁藏布江缝合带活动的构造地貌特征 [J]. 地球科学与环境学报, 2016, 38 (4): 483~493.
- WANG Shifeng, JIANG Wan, WANG Chao. Geomorphic evidence for recent right-lateral shear of Karakorum fault along Indus-Yalu suture zone of Tibet [J]. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 2016, 38 (4): 483~493. (in Chinese with English abstract)
- [64] Leloup P H, Lacassin R, Tapponnier P, et al. The Ailao Shan-Red River shear zone (Yunnan, China), Tertiary transform boundary of Indochina [J]. *Tectonophysics*, 1995, 251 (1/4): 13~84.
- [65] Wang E, Buichfiel B C, Royden L H, et al. Late Cenozoic Xianshuihe-Xiaojiang, Red River, and Dali fault Systems of Southwestern Sichuan and Central Yunnan, China [M]. Boulder: Geological Society of America, 1998, 108.
- [66] Akciz S, Burchfiel B C, Crowley J L, et al. Geometry, kinematics, and regional significance of the Chong Shan shear zone, Eastern Himalayan Syntaxis, Yunnan, China [J]. *Geosphere*, 2008, 4 (1): 292~314.
- [67] Zhang B, Zhang J J, Zhong D L, et al. Polystage deformation of the Gaoligong metamorphic zone: structures, ⁴⁰Ar/³⁹Ar mica ages, and tectonic implications [J]. *Journal of Structural Geology*, 2012, 37: 1~18.

- [68] 杨文采, 侯遵泽, 徐义贤, 等. 青藏高原下地壳热变形和管道流研究 [J]. 地质论评, 2017, 63 (5): 1141~1152.
YANG Wencai, HOU Zunze, XU Yixian, et al. A study on thermal deformation and lower crust channel flows in Qinghai—Xizang (Tibet) Plateau [J]. Geological Review, 2017, 63 (5): 1141~1152. (in Chinese with English abstract)
- [69] Stein S, Liu M. Long aftershock sequences within continents and implications for earthquake hazard assessment [J]. Nature, 2009, 462 (7269): 87~89.
- [70] 范桃园, 孙玉军, 吴中海. 青藏高原东缘旋转变形机制的数值模拟 [J]. 地质通报, 2014, 33 (4): 497~502.
FAN Taoyuan, SUN Yujun, WU Zhonghai. Numerical modeling analysis of the rotation deformation mechanism of the eastern margin of the Tibetan Plateau [J]. Geological Bulletin of China, 2014, 33 (4): 497~502. (in Chinese with English abstract)
- [71] 吴中海, 龙长兴, 范桃园, 等. 青藏高原东南缘弧形旋扭活动构造体系及其动力学特征与机制 [J]. 地质通报, 2015, 34 (1): 1~31.
WU Zhonghai, LONG Changxing, FAN Taoyuan, et al. The arc rotational-shear active tectonic system on the southeastern margin of Tibetan Plateau and its dynamic characteristics and mechanism [J]. Geological Bulletin of China, 2015, 34 (1): 1~31. (in Chinese with English abstract)
- [72] 黎敦朋. 青藏高原西北缘上新世—早更新世构造变形与高原隆升 [D]. 北京: 中国地质科学院, 2008.
LI Dunpeng. Tectonic deformation on northwestern margin of Tibetan Plateau during Pliocene-Pleistocene and uplift of the Tibetan Plateau [D]. Beijing: Chinese Academy of Geological Sciences, 2008. (in Chinese with English abstract)
- [73] 王敏. GPS 观测结果的精化分析与中国大陆现今地壳形变场研究 [D]. 北京: 中国地震局地质研究所, 2009.
WANG Min. Analysis of GPS data with high precision & study on present-day crustal deformation in China [D]. Beijing: Institute of Geology, China Earthquake Administration, 2009. (in Chinese with English abstract)
- [74] Liu H, Lin S F, Song C Z. Orogen-scale L tectonite domain in the Tongbai orogenic belt, central China: geological setting and origin [J]. Journal of Structural Geology, 2017, 94: 184~194.
- [75] Suo S T, Zhong Z Q, You Z D, et al. Post-collisional ductile extensional tectonic framework in the UHP and HP metamorphic belts in the Dabie-Sulu region, China [J]. Acta Geologica Sinica, 2001, 75 (2): 151~160.
- [76] 刘晓春, 娄玉行, 董树文. 桐柏山地区低温榴辉岩变质作用的 P-T 轨迹 [J]. 岩石学报, 2005, 21 (4): 1081~1093.
LIU Xiaochun, LOU Yuxing, DONG Shuwen. P-T path of low-temperature eclogites from the Tongbaishan area [J]. Acta Petrologica Sinica, 2005, 21 (4): 1081~1093. (in Chinese with English abstract)
- [77] Liu X C, Jahn B M, Dong S W, et al. High-pressure metamorphic rocks from Tongbaishan, central China: U-Pb and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ age constraints on the provenance of protoliths and timing of metamorphism [J]. Lithos, 2008, 105 (3/4): 301~318.
- [78] Eide E A, Liou J G. High-pressure blueschists and eclogites in Hong'an: a framework for addressing the evolution of high-and ultrahigh-pressure rocks in central China [J]. Lithos, 2000, 52 (1/4): 1~22.
- [79] 刘少峰, 杨士恭. 鄂尔多斯盆地西缘具限制性边界的侧向挤出构造 [J]. 地质通报, 1996, (4): 353~360.
LIU Shaofeng, YANG Shigong. Lateral extrusion tectonics with restricted boundaries on the western margin of the Ordos basin [J]. Regional Geology of China, 1996, (4): 353~360. (in Chinese with English abstract)
- [80] Ratschbacher L, Hacker B R, Webb L E, et al. Exhumation of the ultrahigh-pressure continental crust in east central China: cretaceous and Cenozoic unroofing and the Tan-Lu fault [J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 2000, 105 (B6): 13303~13338.
- [81] 刘俊来, DAVIS G A, 纪沫, 等. 地壳的拆离作用与华北克拉通破坏: 晚中生代伸展构造约束 [J]. 地学前缘, 2008, 15 (3): 72~81.
LIU Junlai, DAVIS G A, JI Mo, et al. Crustal detachment and destruction of the North China Craton: constraints from Late Mesozoic extensional structures [J]. Earth Science Frontiers, 2008, 15 (3): 72~81. (in Chinese with English abstract)
- [82] 朱日祥, 陈凌, 吴福元, 等. 华北克拉通破坏的时间、范围与机制 [J]. 中国科学: 地球科学, 2011, 41 (5): 583~592.
ZHU Rixiang, CHEN Ling, WU Fuyuan, et al. Timing, scale and mechanism of the destruction of the North China Craton [J]. Science China Earth Sciences, 2011, 54 (6): 789~797.
- [83] 许长海. 大别造山带碰撞后构造热/岩浆演化过程 [D]. 上海: 同济大学, 2002.
XU Changhai. Tectonic thermal/magmatic evolution after the collision of Dabie mountain [D]. Shanghai: Tongji University, 2002. (in Chinese with English abstract)
- [84] 杨志华, 晁会霞, 吴旭, 等. 行星地球元素的演化与地球内部的相对运动: 再论中国大地构造发展演化的新全球动力学理论 [J]. 地学前缘, 2016, 23 (4): 166~182.
YANG Zhihua, CHAO Huixia, WU Xu, et al. Element evolution of the planet earth and the relative movement of the earth-interior: rediscuss on the new global geodynamic theory about the development and evolution of tectonics in China [J]. Earth Science Frontiers, 2016, 23 (4): 166~182. (in Chinese with English abstract)
- [85] Carter N L, Tsenn M C. Flow properties of continental lithosphere [J]. Tectonophysics, 1987, 136 (1/2): 27~63.
- [86] Kusznir N J, Park R G. Intraplate lithosphere deformation and the strength of the lithosphere [J]. Geophysical Journal International, 1984, 79 (2): 513~538.