

大陆岩石圈流变学研究的发展现状与前景

张进江¹⁾, 商 珊¹⁾, 魏春景¹⁾, 张 南¹⁾, 张国伟²⁾, 董云鹏²⁾,
金振民³⁾, 章军锋³⁾, 曹淑云³⁾, 刘俊来⁴⁾, 刘永江⁵⁾

1)北京大学地球与空间科学学院, 北京 100871; 2)西北大学地质学系, 陕西西安 710069;
3)中国地质大学(武汉)地球科学学院, 湖北武汉 430074; 4)中国地质大学(北京)地球科学与资源学院, 北京 100083;
5)中国海洋大学海洋地球科学学院, 山东青岛 266100

摘 要: 板块构造登陆导致大陆动力学的兴起, 但大陆动力学迄今在理论上尚无长足发展, 究其原因大陆构造的复杂性, 这一复杂性取决于大陆岩石圈复杂的流变学结构(纵向分层和横向不均一)。因此, 大陆岩石圈流变学研究是大陆动力学的核心, 并成为发展大陆动力学、完善板块构造理论的关键研究领域, 同时对构造地质学学科发展具有推动作用, 并在资源形成和地震机理方面具有实际意义。本文在阐述了岩石圈流变学的发展与现状的基础上, 较详细分析了大陆流变学的核心内容: 大陆岩石圈流变学结构特征, 大陆物质的本构方程及大陆流变学特性对大陆变形与构造演化的影响。本文还总结了我国开展大陆流变学的基础和条件, 对未来研究进行了展望: 1)形成常态的多尺度-多手段-多学科-多部门的联合研究; 2)缩小量子力学和岩石/矿物流变结构研究间的差距; 3)从全球尺度物质流动着手, 构建以流变学为基础的大陆动力学模型。

关键词: 地震; 流变学; 大陆岩石圈; 大陆构造; 本构方程

中图分类号: P313.3; P542.4 文献标志码: A doi: 10.3975/cagsb.2018.092901

Present Status and Development Prospect of Studies of Rheology of Continental Lithosphere

ZHANG Jin-jiang¹⁾, SHANG Shan¹⁾, WEI Chun-jing¹⁾, ZHANG Nan¹⁾, ZHANG Guo-wei²⁾,
DONG Yun-peng²⁾, JIN Zhen-min³⁾, ZHANG Jun-feng³⁾, CAO Shu-yun³⁾, LIU Jun-lai⁴⁾, LIU Yong-jiang⁵⁾

1) School of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing 100871;
2) Department of Geology, Northwest University, Xi'an, Shaanxi 710069;
3) School of Earth Sciences, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan, Hubei 430074;
4) School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083;
5) College of Marine Geosciences, Ocean University of China, Qingdao, Shandong 266100

Abstract: Landing of the Plate Tectonics gave the birth of the Continental Dynamics, but Continental Dynamics has had no significant development in theory until now. This is because the complexity of the continental structures and tectonics, and this complexity results from the complicated rheological structures of the continental lithosphere (vertical zonation and horizontal heterogeneity). Therefore, the Rheology of Continental Lithosphere is the key study field for developing Continental Dynamics and improving Plate Tectonics. This study also promotes development of the discipline of Structural Geology, and has practical significance in natural resources and earthquake. Based on the descriptions of evolution and status, this paper makes a thorough analysis of the core studies of the continental lithospheric rheology, the rheological structures of continental lithosphere, the constitutive equation of continental material, and effects of rheological properties on continental deformation and tectonics. Finally, the authors analyze the basis and condition for carrying out study of continental rheology in

本文由国家重点研发计划“深地资源勘查开采”重点专项(编号: 2016YFC0600303)和国家自然科学基金重点项目(编号: 41730210)联合资助。

收稿日期: 2018-09-19; 改回日期: 2018-09-21; 网络首发日期: 2018-10-09。责任编辑: 魏乐军。

第一作者简介: 张进江, 男, 1964年生。博士, 教授。主要从事构造地质学研究。通讯地址: 100871, 北京大学地球与空间科学学院。

E-mail: zhjj@pku.edu.cn。

China, and propose the opinions for the future research: forming regular joint study of multiple-scales, -methods, -disciplines, and -institutions; bridging the gap between quantum mechanics and microstructural analysis; starting from global scale flow to constructing continental dynamic models based on rheology.

Key words: earthquake; rheology; continental lithosphere; continental structures and tectonics; constitutive equation

作为 20 世纪自然科学重大突破, 60 年代建立的板块构造理论, 在阐释大洋演化、板缘地震/火山活动及自然资源等方面获得成功, 从而成为固体地球科学的指导学说(Morgan and Series, 1968; West et al., 2014)。然而板块构造理论基于大洋板块刚性运动, 并认为变形集中于板块边界; 但越来越多的研究显示, 大陆板块除边缘变形外, 内部也发育弥散透入性的变形和宽泛的陆内造山带(图 1), 因而传统板块构造理论难以对非刚性大陆的内部变形和构造演化予以科学全面解释(金振民和姚玉鹏, 2004)。究其原因在于大陆岩石圈具有比大洋岩石圈更复杂的流变学性质, 并经长期演化而具有强烈的流变学横向不均一和纵向分层性, 这种不均一性决定了大陆物质在不同应力及物/化条件下的不同流变学行为。

流变学是研究材料变形和流动规律的物理力学, 大陆岩石圈流变学是将该物理力学应用于大陆岩石圈复杂介质, 研究矿物-岩石的变形与流动规律及其物理-化学过程, 建立力学本构关系或方程($\dot{\epsilon} = f(\sigma)$), 定量揭示大陆岩石圈的流变强度与结构, 定量刻画大陆的变形和构造演化, 为构建大陆构造与动力学理论提供科学支撑。因此, 研究大陆物质流变学与大陆构造的关系, 即大陆岩石圈流变学, 是发展与完善板块构造理论发展的基础之一(Burov and Watts, 2006)。

1 大陆岩石圈流变学发展与现状

1989 年, 美国启动“大陆动力学计划”, 以解决板块构造的“登陆”难题。此后, 国际地学界相继实施了一系列重大地学研究计划, 在大陆岩石圈结构与演化、层圈相互作用等方面都取得了重大进展(张国伟等, 2011)。但迄今为止, 固体地球科学界还没有建立起统一的、以物理力学(如流变学)为核

心的大陆动力学理论系统。

21 世纪初, 美国自然科学基金会(NSF)将大陆岩石圈流变学确定为 21 世纪构造地质学研究的新启航(NSF, 2003); 以此同时, 我国科学家同样提出了大陆流变学的重要性(金振民和姚玉鹏, 2004; 刘俊来, 2004)。近年来, 国际地学界兴起了大陆岩石圈流变学的研究热潮。2015 年 4 月, 欧盟启动 Horizon 2020 计划, 专门设立由 10 家著名地质研究机构和 10 个工业伙伴支撑的地球与工业过程中的复杂流变学, 即 CREEP 研究课题, 旨在加强地球物质和工业材料的流变性质和地球动力学研究; 几乎同时, 74 家国际知名研究机构和大学的流变学领域的科学家向美国基金会提交了岩石矿物研究前沿的变形实验, 即 DEFORM 联盟研究计划, 旨在加强岩石圈矿物和岩石变形与流变研究, 推动流变学领域的技术创新和理论发展。在 2017 年 4 月出版的《中国学科发展战略·板块构造与大陆动力学》(国家自然科学基金委员会和中国科学院, 2017), 已将“大陆流变性状与大陆变形”列为中国未来大陆动力学研究的优先领域之一。

美国地质学会(GSA)和美国地球物理联合会(AGU)在 2018 年初发布的《大地构造研究的挑战与机遇》(Huntington and Klepeis, 2018), 将“认识岩石圈流变学变化”作为重大挑战, 认为岩石变形不仅强烈制约着地球不同时空尺度的演化, 也通过地震、地貌和资源形成过程而直接影响人类社会的发展, 而地球岩石圈各种时空尺度的变形都取决于岩石的流变学。因此, 地球物质流变学研究已成为固体地球科学的最前沿课题, 而目前固体地球科学家们所面临科学挑战和目标是: 对大陆岩石圈岩石流变学的定量化, 并定量确定流变学如何通过变形过程控制固体地球的物理与化学演化及地质过程, 建

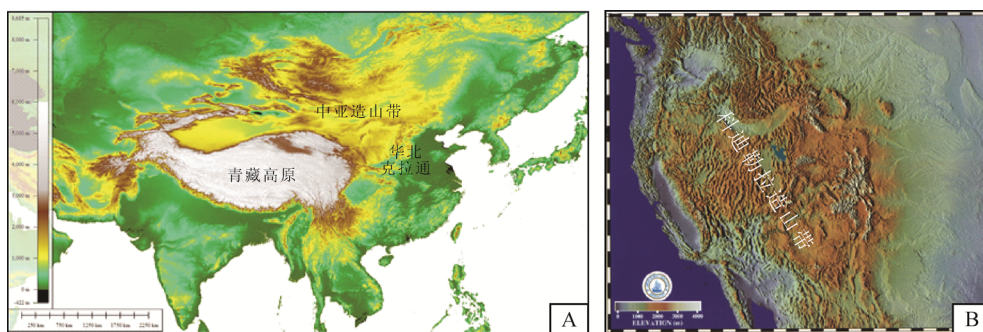


图 1 亚洲东部(A)和北美洲西部(B)的大陆内部变形

Fig. 1 Intra-continental deformation of eastern Asia (A) and western America (B)

立定量描述固体地球变形的概念模型。

2 大陆岩石圈流变学研究的核心内容

结合国内外研究现状, 我们认为目前中国固体地球科学家在大陆流变学领域需要深入开展研究的核心内容为: 1) 大陆岩石圈三维流变学结构; 2) 大陆物质流变学性质的控制因素与机制(流变学本构关系); 3) 大陆流变学特性对大陆变形与构造演化的影响。

2.1 大陆岩石圈三维流变学结构

大陆岩石圈流变学三维结构的特征是其流变学性质的纵向分层性(图 2)和横向不均一性(图 3, Deng and Tesauro, 2016), 纵向流变学结构决定了岩石圈变形行为, 横向流变学结构决定的大陆构造格局, 并共同形成了大陆构造的复杂性。

流变学纵向分层性指大陆岩石圈不同深度流变学性质的显著差异, 对大陆变形影响巨大。对此, 科学家提出了不同分层模型(图 2; Kohlstedt et al., 1995; Burov and Watts, 2006; Bürgmann and Dresen, 2008), 但尚未形成统一认识, 因此, 准确揭示大陆岩石圈流变学结构剖面仍是一个巨大的科学挑战。

2.2 大陆物质流变学性质的控制因素与机制(本构关系)

岩石圈不同深度岩石的流变学性质为其内在性质(矿物、粒度、流/熔体等)和外在因素(温度、压

700~1100°C 下干、无熔体橄榄岩中橄榄石的变形机制

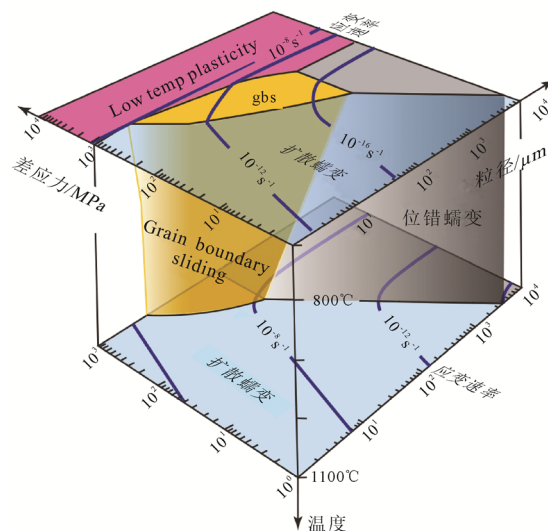


图 4 矿物(橄榄石)变形机制与内外变量关系

Fig. 4 Deformation mechanisms minerals, in this case olivine, as a function of the internal and external variables

力、应力及流/熔体)等变量的函数, 即本构关系(Jackson, 2002; Burov, 2011), 具体表现为在各变量影响下的岩石强度和黏度、矿物变形机制(图 4; Warren and Hirth, 2006)及其主导的岩石圈变形性质与行为、变形尺度和速率等。

矿物变形: 岩石圈的物质基础是岩石, 岩石是矿物集合体。因此, 矿物变形的物理/化学过程直接影响岩石的流变学性质, 岩石流变学性质直接控制岩石圈的变形与构造(Liu et al., 2012; Oliot et al., 2014)。因此, 矿物变形研究是岩石流变学研究的基础, 但现有研究尚不能满足大陆流变学研究需要。因为, 以往的研究多集中于简单矿物(如石英)和地幔矿物(如橄榄石), 而对大陆地壳主要造岩矿物(如长石、角闪石和辉石等)重视不够(Czaplińska et al., 2015); 过去的研究侧重于单矿物变形, 而自然界多矿物相变形研究则相对薄弱(Platt, 2015)。更为重要的是, 目前研究多是矿物颗粒级别的变形, 而新的挑战将是从小分子水平认识矿物变形的物理化学过程及其流变效应, 结合新观测手段与实验模拟, 缩小量子力学和显微结构研究间的差距, 解决大陆复杂介质条件下、复杂矿物组合相的变化过程, 为深入探索更长时间尺度行星过程铺路(NRC, 2008)。

热结构与热过程: 大陆岩石圈流变学分层除矿物组成等内在因素外, 还受到温度、流/熔体和应变速率等外在因素影响, 其中温度或热为最重要因素之一(Ranalli and Murphy, 1987; 王勤, 2016), 反映在地质研究中则为变质反应所揭示的温度条件。除相关实验模拟研究外, 采用构造与变质地质学相结合手段, 建立典型大陆构造带流变学和热结构剖面,

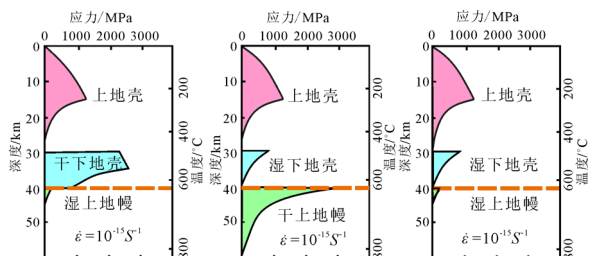


图 2 大陆岩石圈流变学结构的不同模型

Fig. 2 Different models of the rheological structure of continental lithosphere

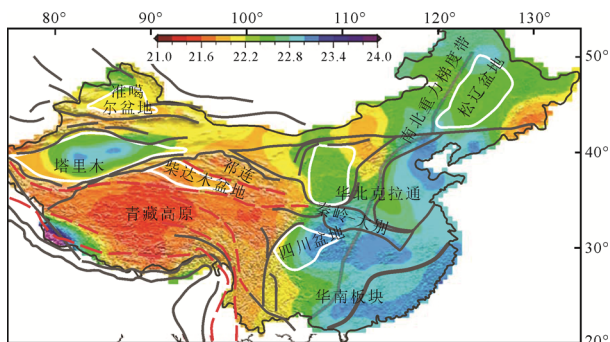


图 3 中国大陆岩石圈强度图

(修改自 Deng and Tesauro, 2016)

Fig. 3 Lithospheric strength map of mainland China (modified after Deng and Tesauro, 2016)

探索变形机制、流变学性质与热结构的关联性;通过变形历史和热过程分析,建立 P - T - d - t 轨迹,揭示热过程对大陆流变过程和大陆构造过程的影响和控制,是大陆岩石圈流变学研究的核心内容之一。

流/熔体与流变分层: 流/熔体既是岩石圈的物质组成,又是流变的介质条件,直接影响岩石流变学性质(Brown et al., 2011; Getsinger et al., 2013; Diener and Fagereng, 2014; Carvalho, et al., 2016)。流体既可影响地壳浅部岩石的破裂行为,也可通过矿物内部与边界的物理过程和化学反应影响深部地壳的流变强度。而熔体的出现使固相岩石变成固-液两相,对岩石流变学性质影响巨大,是岩石圈流变分层的重要机制;并且随熔体增加,岩石变形机制从固态蠕变向液态流动转变,从而导致地壳的弱化流动、造山带的垮塌和高级变质岩的折返等。流/熔体直接影响岩石流变学性质,但定量计算流/熔体的流变学效应仍是一个科学难题(Diener and Fagereng, 2014; Huntington and Klepeš, 2018)。应用新分析、测试、实验和计算技术,从固-液两相分子水平着手,探讨亚固相线水-岩相互作用和超固相线熔体行为的物理化学过程及其流变学效应,将会给岩石圈流变分层、地壳流变行为和变形局部化以及地震机制研究带来新突破(Hirth and Beeler, 2015)。

P - T 轨迹与本构方程的耦合: 有关大陆地壳热/流体与流变关系的研究中,将 P - T 轨迹与实时本构关系相结合将是一个有望突破的方向。目前,基于相平衡计算和精确定年技术,可得到精确的 P - T - t 轨迹,但这些信息尚未应用于流变学,仍仅用于地壳岩石的状态变化。如果将相图计算所得的 P - T 条件、矿物组合、流/熔体含量等,与微观矿物变形观测及精确定年相结合,可望建立起随时间变化的本构方程,这将是变形-变质关系研究的突破,将会定量再现地壳的流变学与变形过程,使“构造”活起来。

应变速率: 应变速率对岩石流变学影响早已形成共识(Jaeger and Cook, 1969),速率变化将对岩石的“脆-韧”性行为产生关键影响。岩石天然应变速率定量研究最近有所突破,高精度年代学、单矿物温度计和变形实验结合,不仅实现了露头应变速率的精确测量,并与室内流变律研究结合,优化了本构方程(Sassier et al., 2009; Boutonnet et al., 2013)。最近研究还表明,大陆变形的速率多为非稳态,单一变形过程呈现出从碎裂、摩擦滑动到位错蠕变的全谱非稳态行为(Freed et al., 2012; Regan et al., 2014; Lyakhovsky et al., 2014; Kidder et al., 2016; Pec et al., 2016),而速率的“失稳”则指示了重要构

造事件(如地震)。建立变形带地壳详细的天然速率剖面,揭示应变速率与流变学性质的关系;查明构造带非稳态历史,探讨速率“失稳”与构造事件的关系,为解决大陆物质流变律和大陆地震等重大问题提供科学依据。

深部地壳: 在目前的大陆岩石圈流变分层研究中,地幔因其成分与结构相对简单、地球物理制约充分而得到良好的观测与实验研究,并对其流变学性质和弱化机理有了很好认识(Mei et al., 2010; 王勤, 2016; Liao et al., 2017)。反观地壳,成分和演化的复杂性是导致大陆岩石圈流变学结构不均一的根本原因,其中,孕震带之下的深部地壳,即传统意义上的中-下地壳,其流变结构与强度是岩石圈是否解耦及地壳整体变形行为的决定因素;深部地壳中所发生的变形、变质与岩浆活动是壳-幔间物质和热交换的驱动力,是孕震地壳与地幔过程间的物理与化学链接。因此,大陆岩石圈流变学应从地壳、特别是深部地壳着手,获取其变质反应、热条件、流/熔体和矿物状态等的定量信息,建立精确的 P - T - t - d 轨迹,探讨深部地壳变形、变质和岩浆过程及其流变学特性,是大陆岩石圈流变学研究的关键核心。

造山带和陆内变形带: 大陆岩石圈流变学三维结构特征除纵向分层外,就是其横向不均一性。不同大陆单元经不同演化而形成不同的流变学结构,它们的拼合和增生导致大陆流变学性质的横向不均一(Rudnick et al., 1998; Deng et al., 2017)。这种流变学性质的纵向分层、横向不均一性控制着大陆的变形样式与过程(Gueydan et al., 2014);特别是流变不均一引发的变形局部化,影响着大陆边缘造山过程(Diener and Fagereng, 2014; Vogt et al., 2017),控制着陆内造山(Raimondo et al., 2014)和大陆裂谷(Gueydan and Precigout, 2014b)等陆内变形过程,并对大陆地震等重大地质事件起着控制作用(Menegon et al., 2017; Soto-Cordero et al., 2018)。

造山带和陆内变形带是大陆岩石圈流变学三维不均一性的典型代表,它们夹于较刚性的克拉通之间,形成大陆流变学最显著的横向不均一性,从而控制着大陆总体变形样式。造山带记录了俯冲-碰撞-增厚-折返等地质过程,而陆内变形带(如滇西)则叠加了更为复杂的陆内改造过程,如增厚、走滑、滑脱和挤出等,从而形成复杂的流变学分层结构(Dai et al., 2017);造山带和陆内变形带内不同层次、时代和不同类型的岩石,经历不同 P - T 及流/熔体条件下的流变过程(Beaumont et al., 2001; Le Pape et al., 2015),并经差异折返而剥露,使造山带和陆内变形带成为直接观测大陆岩石圈流变学分层的野

外实验室。因此,选择典型造山带和陆内变形带,建立流变学和热结构剖面,研究温-压、流/熔体等对岩石变形的影响,探索变形与热结构的关联性;通过变形历史和热过程分析,揭示造山带热状态如何通过流变过程而控制造山带动变形与力学过程,是岩石圈流变学研究的核心内容。

总之,造山带及陆内变形带揭露了最为完整的深部地壳剖面,较为完整地记录了大陆流变学特征、流变过程和构造动力过程。因此,造山带及陆内变形带深部地壳将是大陆岩石圈流变学研究的核心内容。

3 开展大陆岩石圈流变学研究的理论与实践意义

3.1 推进大陆动力学的发展

大陆岩石圈流变学将物理力学应用于大陆变形,从而形成大陆动力学的物理力学基础,并通过该理论将目前尚不系统的大陆构造研究统一起来,推进大陆动力学的发展,促进大陆动力学理论体系的建立。板块理论阐释了板缘成矿及地震机理,面对大陆却遇到挑战。如大型剪切带与金、钼等多金属矿床的成因关系,构造应力下大陆岩石圈的挠曲与含油气盆地的演化,这些均需新的大陆流变学理论予以解释。中国境内大陆地震多发,人们已经意识到地壳黏弹性是控制应力传递和发震机制的重要因素,大陆流变及变形局部化将是理解大陆地震周期和定位的重要基础(Burchfiel et al., 2008; Zhao et al., 2012; Huang et al., 2014; Liu et al., 2015; Mene-gon et al., 2017; Soto-Cordero et al., 2018)。

3.2 推进构造地质学学科的阶段发展

以物理力学为基础的大陆岩石圈流变学研究,将促进构造地质学学科的发展,推动大陆动力学向定量化方向发展。1960年之前,构造地质学以描述为主,涉及的力学也以弹性力学为主(Billings, 1954)。之后,该学科吸纳了有限应变理论,进入量化的第二阶段(Ramsay, 1967),即有限应变阶段;但该阶段所描述的变形只有位移,没有时间、速率与过程;也不能定量研究随时间增长的大变形。由于地球上所有岩石的变形都是具有不同时间尺度的流变行为,研究变形就必须考虑物质的黏度与速率因素等。因此,大陆岩石圈流变学研究将推动构造地质学学科进入其第三阶段,即流变构造地质学阶段(Hobbs and Ord, 2015)。

3.3 “超越板块”

大陆岩石圈流变学最为崇高的科学意义,将是其在不久的将来“超越板块”而对地球动力学的贡献。2008年,地学界将地球内部物质流动与板块及

地表过程的关系列入优先研究方向(NRC, 2008);从全球动力学角度来看,从外核到地壳,地球是一个由密度和热不均一态驱动下的超级流变体系,包括板块在内的地球上所有变形与构造演化都受控于这一体系(Maruyama, 1994; Gerya et al., 2015),这一流变系统还可解释陆内变形与造山(Colucci et al., 2017)。大陆岩石,尤其是大陆地壳岩石的流变特性及其对地球演变历史近乎全程的记录,使我们从大陆地壳研究开始,以流变学为基础,对全球动力学体系进行定量研究,为解决外核热动力、地幔柱、板块运动及全球物质循环等重大科学问题提供流变学约束,进而助力固体地球科学领域的真正革命。

4 中国开展大陆岩石圈流变学研究的机遇和条件

中国复杂多样的大陆构造,为大陆岩石圈流变学研究提供了得天独厚的研究条件,为完成大陆动力学研究的“追赶-超越”提供了基础。中国大陆经历复杂演化而形成世界上最复杂的岩石圈结构:印度-欧亚大陆碰撞形成了具巨厚地壳的青藏高原,所导致的陆内变形遍及太行以西;东部太平洋俯冲导致岩石圈剧烈改变;北部受中亚构造域叠加,形成世界上最宽泛的大陆变形域。对这种复杂大陆构造的研究目前尚待突破,而其代表性进展,就是利用 channel-flow 等流变学概念重建青藏高原的形成与隆升过程(Beaumont et al., 2001; Royden et al., 2008; Chen et al., 2017)。

由此可见,从中国典型大陆构造着手,开展大陆岩石圈流变学研究,既解决中国大陆构造问题,又参与国际竞争,并对大陆动力学理论的发展做出贡献,是中国地质学家的使命。20世纪五六十年代,中国地球科学界因客观原因未能参与板块构造理论的构建;今天,我们不能再去失去参与建设新理论的机遇;而近40年的科学积累、科研能力的提升和科研人才的储备,已使我们成为创建地学新理论的中坚力量。

5 未来展望

大陆岩石圈流变学是以野外观测为基础,以物理实验、数值模拟为手段,获得岩石流变学参数、变形机理和本构方程的综合性研究;该研究从矿物晶格变形开始,探讨岩石变形与流动行为,阐述大陆岩石圈的流变学特性,进而揭示流变学对大陆变形、构造演化以及资源与灾害的影响。可见,该研究具有高度综合性,囊括地质学中的矿物、岩石、构造地质、变质地质、岩浆动力、实验和模拟等诸多学科,并包括了地球物理和地球化学等,甚至涉

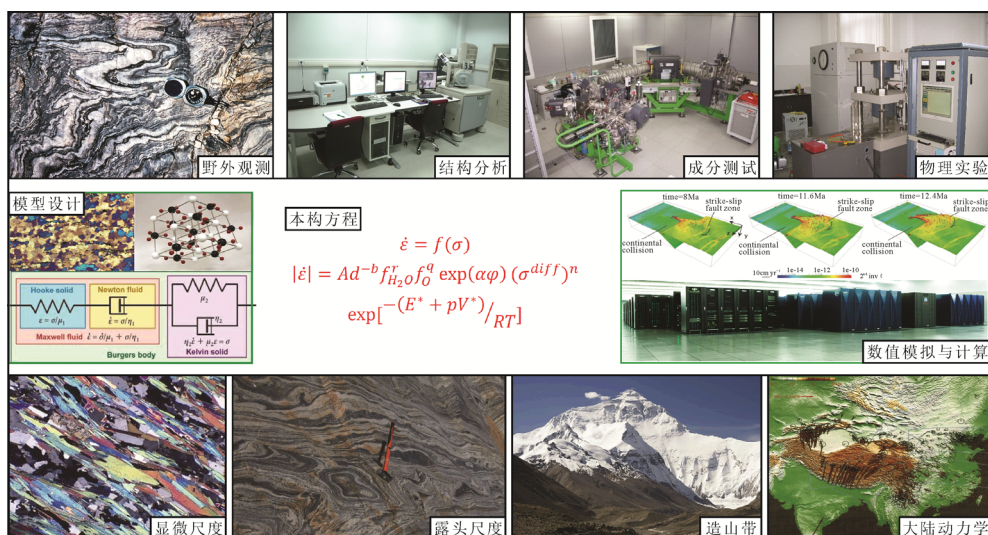


图5 大陆岩石圈流变学研究程序示意图

Fig. 5 Schematic diagram for research procedure of continental lithospheric rheology

及物理、化学等大学科交叉。国际岩石流变学界也正在形成由不同团队合作与共享、野外观测-实验数据-物理/数值模拟深度融合的学术联盟(Huntington and Klepeis, 2018)。因此, 中国将来的大陆岩石圈流变学研究必须实施多学科联合攻关, 才能实现突破。

我们相信, 中国的固体地球科学家和有关资助机构, 已经认识到了大陆岩石圈流变学研究的重要性和迫切性, 并正在围绕大陆岩石圈流变学的核心问题开展开拓性研究, 并将形成一个重要研究方向与领域。现在及未来的研究, 将选择中国大陆典型的造山带和陆内变形带, 开展多部门联合下的野外观测-岩石实验-物理/数值模拟相结合的综合研究。在建立典型造山带和陆内变形带流变分层结构剖面 and 热结构剖面基础上, 深入探讨矿物、热、流/熔体及应变速率等对岩石流变学的影响, 从分子结构水平研究矿物-岩石流变行为和流变学本构关系; 通过变形历史和变质过程分析, 揭示造山带和陆内变形带流变过程及构造动力学过程; 通过数值模拟计算, 从岩石圈尺度构建以流变学为基础的大陆动力学模型(图5)。

我们预期, 不久的将来, 研究有望在以下方面取得突破: 1)从分子学角度揭示矿物变形和流/熔体行为的物理/化学过程及其岩石流变学效应; 2)以流变学为基础对典型构造带流变结构与过程、变形与构造演化进行定量化表达。此研究领域更为久远的愿景包括: 1)形成常态的多尺度-多手段-多学科-多部门的联合研究; 2)缩小量子力学和岩石/矿物流变结构研究间的差距; 3)从全球尺度物质流动着手, 构建以流变学为基础的大陆动力学模型; 4)为创建大陆动力学新理论、发展板块构造理论提供实例与

理论支持。

致谢: 本文是国内数十位构造地质学家多年学术探讨的成果, 署名作者只是其中的一部分, 对本文做出学术贡献还有很多学者, 如南京大学的舒良树和王勤教授、合肥工业大学的朱光教授、中国科学院的林伟和何建坤研究员、中国科学院大学的李忠海教授、中国地震局的周永胜和苏哲研究员等。多次的学术活动都得到了大陆动力学国家重点实验室的全力支持。

Acknowledgements:

This study was supported by National Key Research and Development Program (No. 2016YFC0600303), and the Key Program of National Natural Science Foundation of China (No. 41730210).

参考文献:

- 国家自然科学基金委员会, 中国科学院. 2017. 中国学科发展战略-板块构造与大陆动力学[M]. 北京: 科学出版社.
- 金振民, 姚玉鹏. 2004. 超越板块构造——我国构造地质学要做什么?[J]. 地球科学, 29(6): 644-650.
- 刘俊来. 2004. 变形岩石的显微构造与岩石圈流变学[J]. 地质通报, 23(9-10): 980-985.
- 王勤. 2016. 橄榄石的同系温度 T/Tm: 对上地幔蠕变与橄榄石组构转变的启示[J]. 中国科学: 地球科学, 46(5): 618-638.
- 张国伟, 郭安林, 董云鹏, 姚安平. 2011. 大陆地质与大陆构造和大陆动力学[J]. 地学前缘, 18(3): 1-12.

References:

- BEAUMONT C, JAMIESON R A, NGUYEN M H, LEE B. 2001. Himalayan tectonics explained by extrusion of a low-viscosity crustal channel coupled to focused surface denudation[J]. Nature, 414(6865): 738-742, doi: 10.1038/414738a.

- BILLINGS M P. 1954. Structural geology (second edition): Englewood Cliffs[M]. New Jersey: Prentice-Hall: 514.
- BOUTONNET E, LELOUP P H, SASSIER C, GARDIEN V, RICARD Y. 2013. Ductile strain rate measurements document long-term strain localization in the continental crust[J]. *Geology*, 41(8): 819-822.
- BROWN M, KORHONEN F J, SIDDOWAY C S. 2011. Organizing Melt Flow through the Crust[J]. *Elements*, 7(4): 261-26.
- BURCHfiEL B C, ROYDEN L H, VAN DER HILST R D, HAGER B H, CHEN Z, KING RW, LI C, LÜ J, YAO H, KIRBY E. 2008. A geological and geophysical context for the Wenchuan earthquake of 12 May 2008, Sichuan, People's Republic of China[J]. *GSA Today*, 18(7), doi: 10.1130/GSATG18A.1.
- BÜRGMANN R, DRESEN G. 2008. Rheology of the lower crust and upper mantle: Evidence from rock mechanics, geodesy, and field observations[J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 36(36): 531-567.
- BUROV E B, WATTS A B. 2006. The long-term strength of continental lithosphere: "jelly sandwich" or "crème brûlée"?[J]. *GsaToday*, 16(1): 4-10.
- BUROV E B. 2011. Rheology and strength of the lithosphere[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 28(8): 1402-1443.
- CARVALHO B B, SAWYER E W, JANASI V A. 2016. Crustal reworking in a shear zone: transformation of metagranite to migmatite[J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 34(3): 237-264.
- CHEN L, CAPITANIO F A, LIU L J, GERYA T V. 2017. Crustal rheology controls on the Tibetan plateau formation during India-Asia convergence[J]. *Nature Communication*, 8(15992), doi: 10.1038/ncomms15992.
- COLTICE N, GERAULT M, ULVROVA M. 2017. A mantle convection perspective on global tectonics[J]. *Earth-Science Reviews*, 165: 120-150, doi: 10.1016/j.earscirev.2016.11.006.
- CZAPLINSKA D, PIAZOLO S, ZIBRA I. 2015. The influence of phase and grain size distribution on the dynamics of strain localization in polymineralic rocks[J]. *Journal of Structural Geology*, 72: 15-32.
- DAI L M, LI S Z, LI ZH, SOMERVILLE I, LIU X C. 2017. Dynamic processes and mechanisms for collision to post-orogenic extension in the Western Dabie Orogen: Insights from numerical modeling[J]. *Geological Journal*, 52(S1): 44-58, doi: 10.1002/gj.2993.
- DENG Y F, CHEN L, XU T, WU J, ROMANELLI F, PANZA G F. 2017. Lateral variation in seismic velocities and rheology beneath the Qinling-Dabie orogen[J]. *Science China Earth Sciences*, 60(3): 576-588, doi: 10.1007/s11430-016-0101-6.
- DENG Y F, TESAURO M. 2016. Lithospheric strength variations in Mainland China: Tectonic implications[J]. *Tectonics*, 35: 2313-2333.
- DIENER J F A, FAGERENG A. 2014. The influence of melting and melt drainage on crustal rheology during orogenesis[J]. *Journal of Geophysical Research-Solid Earth*, 119(8): 6193-6210.
- FREED A M, HIRTH G, BEHN M D. 2012. Using short-term postseismic displacements to infer the ambient deformation conditions of the upper mantle[J]. *Journal of Geophysical Research-Solid Earth*, 117(B1): 1-15, doi: 10.1029/2011JB008562.
- GERYA T V, STERN R J, BAES M, SOBOLEV S V, WHATTAM S A. 2015. Plate tectonics on the Earth triggered by plume-induced subduction initiation[J]. *Nature*, 527(7577): 221-225, doi: 10.1038/nature15752.
- GETSINGER A J, HIRTH G, STUNITZ H, GOERGEN E T. 2013. Influence of water on rheology and strain localization in the lower continental crust[J]. *Geochemistry Geophysics Geosystems*, 14(7): 2247-2264.
- GUEYDAN F, PRECIGOUT J, MONTESI L G J. 2014a. Strain weakening enables continental plate tectonics[J]. *Tectonophysics*, 631(SI): 189-196.
- GUEYDAN F, PRECIGOUT J. 2014b. Modes of continental rifting as a function of ductile strain localization in the lithospheric mantle[J]. *Tectonophysics*, 612-613(3): 18-25.
- HIRTH G, BEELER N M. 2015. The role of fluid pressure on frictional behavior at the base of the seismogenic zone[J]. *Geology*, 43(3): 223-226.
- HOBBS B, ORD A. 2015. Structural Geology: The Mechanics of Deforming Metamorphic Rocks, Volume I: Principles[M]. Amsterdam: Elsevier: 665.
- HUANG M H, BURGMANN R, FREED A M. 2014. Probing the lithospheric rheology across the eastern margin of the Tibetan Plateau[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 396: 88-96, doi: 10.1016/j.epsl.2014.04.003.
- HUNTINGTON K W, KLEPEIS K A. 2018. Challenges and Opportunities for Research in Tectonics[C]//Department of Earth and Space Sciences Faculty Research.
- JACKSON J. 2002. Faulting, flow, and the strength of the continental lithosphere[J]. *International Geology Review*, 44(1): 39-61.
- JAEGER J C, COOK N G W. 1969. Fundamentals of Rock Mechanics[M]. London: Methuen.
- JIN Zhen-min, YAO Yu-peng. 2004. Beyond Plate Tectonics: What Do We Do in Structural Geology?[J]. *Earth Science-Journal of China University of Geoscience*, 29(6): 644-650(in Chinese with English abstract).
- KIDDER S, HIRTH G, AVOUAC J P, BEHR W. 2016. The influence of stress history on the grain size and microstructure of experimentally deformed quartzite[J]. *Journal of Structural Geology*, 83: 194-206, doi: 10.1016/j.jsg.2015.12.004.
- KOHLSTEDT D L, EVANS B, MACKWELL S J. 1995. Strength of the lithosphere - constraints imposed by laboratory experiments[J]. *Journal of Geophysical Research-Solid Earth*, 100(B9): 17587-17602.
- LE PAPE F, JONES A G, UNSWORTH M J, VOZAR J, WEI W B, JIN S, YE G F, JING J N, DONG H, ZHANG L T. 2015. Constraints on the evolution of crustal flow beneath Northern Tibet[J]. *Geochemistry Geophysics Geosystems*, 16(12): 4237-4260.
- LIAO J, WANG Q, GERYA T, BALLMER M D. 2017. Modeling craton destruction by hydration-induced weakening of the upper mantle[J]. *Journal of Geophysical Research-Solid Earth*, 122: 7449-7466, <https://doi.org/10.1002/2017JB014157>.
- LIU C, ZHU B J, YANG X L, SHI Y L. 2015. Crustal rheology

- control on earthquake activity across the eastern margin of the Tibetan Plateau: Insights from numerical modeling[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 100: 20-30, doi: 10.1016/j.jseaes.2015.01.001.
- LIU G, ZHOU Y S, SONG J, HE C R. 2012. Microstructures and melt characteristics of deformed quartz diorite under high temperature and high pressure[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 28(3): 1005-1016.
- LIU Jun-lai. 2004. Microstructures of deformed rocks and rheology of the lithosphere[J]. *Geological Bulletin of China*, 23(9-10): 980-985[0](in Chinese with English abstract).
- LYAKHOVSKY V, SAGY A, BONEH Y, RECHES Z E. 2014. Fault wear by damage evolution during steady-state slip[J]. *Pure and Applied Geophysics*, 171(11): 3143-3157, <https://doi.org/10.1007/s00024-014-0787-x>.
- MARUYAMA S. 1994. Plume Tectonics[J]. *Geological Survey of Japan*, 100(1): 24-49.
- MEI S, SUZUKI A M, KOHLSTEDT D L, DIXON N A, DURHAM W B. 2010. Experimental constraints on the strength of the lithospheric mantle[J]. *Journal of Geophysical Research-Solid Earth*, 115, B08204, doi:10.1029/2009JB006873.
- MENEGON L, PENNACCHIONI G, MALASPINA N, HARRIS K, WOOD E. 2017. Earthquakes as precursors of ductile shear zones in the dry and strong lower crust[J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 18: 4356-4374, <https://doi.org/10.1002/2017GC007189>.
- MORGAN W J, SERIES C R. 1968. Rises, Trenches, Great Faults, and Crustal Blocks[J]. *Journal of Geophysical Research*, 73(6): 1959-182.
- National Research Council (NRC). 2008. Origin and evolution of earth: Research questions for a changing planet[M]. Washington D C: National Academy Press: 138.
- National Science Foundation of China, Chinese Academy of Science. 2017. Strategic Plan for Development of Disciplines: Plate Tectonics and Continental Dynamics[M]. Beijing: Science Press[0](in Chinese).
- National Science Foundation of USA (NSF). 2003. New Departures in Structural Geology and Tectonics[OL/EB]. [2018-05-16]. <http://www.pangea.stanford.edu/~dpollard/NSF/>.
- OLIOT E, GONCALVES P, SCHULMANN K, MARQUER D, LEXA O. 2014. Mid-crustal shear zone formation in granitic rocks: Constraints from quantitative textural and crystallographic preferred orientations analyses[J]. *Tectonophysics*, 612: 63-80.
- PEC M, STÜNITZ H, HEILBRONNER R, DRURY M. 2016. Semi-brittle flow of granitoid fault rocks in experiments[J]. *Journal of Geophysical Research-Solid Earth*, 121: 1677-1705, doi:10.1002/2015JB012513.
- PLATT J P. 2015. Rheology of two-phase systems: A microphysical and observational approach[J]. *Journal of Structural Geology*, 77: 213-227.
- RAIMONDO T, HAND M, COLLINS W J. 2014. Compressional intracontinental orogens: Ancient and modern perspectives[R]. *Earth-Science Reviews*, 130: 128-153.
- RAMSAY J G. 1967. Folding and fracturing of rocks[M]. New York: McGraw-Hill Book Company, 568.
- RANALLI G, MURPHY D C. 1987. Rheological stratification of the lithosphere[J]. *Tectonophysics*, 132(4): 281-295.
- REGAN S, WILLIAMS M, LESLIE S, MAHAN K, JERCINOVIC M, HOLLAND M, GIBSON D. 2014. The Cora Lake shear zone, Athabasca granulite terrane, an intraplate response to far-field orogenic processes during the amalgamation of Laurentia[J]. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 51(9): 877-901.
- ROYDEN L H, BURCHFIEL B C, VAN DER HILST R D. 2008. The geological evolution of the Tibetan plateau[J]. *Science*, 321(5892): 1054-1058, doi: 10.1126/science.1155371.
- RUDNICK R L, MCDONOUGH W F, O'CONNELL R J. 1998. Thermal structure, thickness and composition of continental lithosphere[J]. *Chemical Geology*, 145(3-4): 395-411.
- SASSIER C, LELOUP P H, RUBATTO D, GALLAND O, YUE Y, LIN D. 2009. Direct measurement of strain rates in ductile shear zones: A new method based on syntectonic dikes[J]. *Journal of Geophysical Research*, 114(B1), doi:10.1029/2008JB005597.
- SOTO-CORDERO L, MELTZER A, STACHNIK J C. 2018. Crustal Structure, Intraplate Seismicity, and Seismic Hazard in the Mid-Atlantic United States[J]. *Seismological Research Letters*, 89(1): 241-252, doi: 10.1785/0220170084.
- VOGT K, MATENCOL, CLOETINGH S. 2017. Crustal mechanics control the geometry of mountain belts. Insights from numerical modeling[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 460: 12-21, <http://dx.doi.org/10.1016/j.epsl.2016.11.016>.
- WANG Qin. 2016. Homologous temperature of olivine: Implications for creep of the upper mantle and fabric transitions in olivine[J]. *Science China-Earth Sciences*, 46(5): 618-638(in Chinese).
- WARREN J M, HIRTH G. 2006. Grain size sensitive deformation mechanisms in naturally deformed peridotites[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 248(1-2): 438-450.
- WEST G F, FARQUHAR R M, GARLAND G D, HALLS H C, MORLEY L W, RUSSELL R D. 2014. John Tuzo Wilson: a man who moved mountains TRIBUTE[J]. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 51(3): XVII-XXXI.
- ZHANG Guo-wei, GUO An-lin, DONG Yun-peng, YAO An-ping. 2011. Continental geology, tectonics and dynamics[J]. *Earth Science Frontiers*, 18(3): 1-12(in Chinese with English abstract).
- ZHAO G Z, UNSWORTH M J, ZHAN Y, WANG L F, CHEN X B, JONES A G, TANG J, XIAO Q B, WANG J J, CAI J T. 2012. Crustal structure and rheology of the Longmenshan and Wenchuan Mw 7.9 earthquake epicentral area from magnetotelluric data[J]. *Geology*, 40(12): 1139-1142.